



Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração

LUÍS RAFAEL FARIA FERREIRA

novembro de 2017

ESTUDO PARAMÉTRICO NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO

Luís Rafael Faria Ferreira

1120553

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO PARAMÉTRICO NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO

Luís Rafael Faria Ferreira

1120553

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

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Lucas Filipe Martins da Silva

Professor Associado, FEUP

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor Duarte Salgueiral Gomes Campilho pela oportunidade que me concedeu, apoio, disponibilidade e incentivo que me prestou ao longo da realização desta dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pela oportunidade concedida para a realização desta tese e por todos os ensinamentos que me foram transmitidos ao longo da licenciatura e mestrado.

Aos meus amigos e família, em especial aos meus pais pelo apoio incansável e compreensão que me foram transmitidos.

PALAVRAS CHAVE

Epóxido, Poliuretano, Juntas adesivas tubulares, Método de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo, Parâmetros geométricos.

RESUMO

O método de união com ligações adesivas está cada vez mais a ser utilizado na concepção de estruturas mecânicas, por causa das vantagens significativas desta técnica em comparação com as ligações tradicionais. De facto, as juntas com ligação adesiva estão sob investigação intensa há bastante tempo. Entre as vantagens, destaca-se a redução de peso e possibilidade de unir diferentes materiais, incluindo compósitos, sem danificar as estruturas a ligar. Os adesivos comerciais variam desde resistentes e frágeis (por exemplo, Araldite® AV138) a menos resistentes e dúcteis (por exemplo, Araldite® 2015). Uma nova família de adesivos de poliuretano combina elevada resistência e ductilidade (por exemplo, Sikaforce® 7752).

Esta dissertação compara o desempenho à tração dos três adesivos supracitados, em juntas tubulares de alumínio (AW6082-T651), considerando a variação dos parâmetros geométricos principais e alteração geométrica das mesmas. Os parâmetros principais são o comprimento de sobreposição (L_0) e a espessura dos tubos interior e exterior (t_{SI} e t_{SE} , respetivamente). As alterações geométricas consistem na consideração da existência de um chanfro exterior dos aderentes, chanfro interior dos aderentes e na adição de um filete de adesivo nas extremidades de L_0 . A análise numérica de modelos de dano coesivo (MDC) foi realizada para analisar as tensões de arrancamento (σ_y) e as de corte (τ_{xy}) na camada adesiva e para avaliar a capacidade MDC na previsão da resistência da junta.

O estudo paramétrico numérico em juntas adesivas tubulares demonstra que não se dão alterações significativas na resistência das mesmas relativamente à aplicação de chanfro externo ou interno dos aderentes ou de filete de adesivo. Por outro lado, verifica-se um acréscimo considerável de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 , sendo que as juntas com o Araldite® 2015 são as que apresentam a resistência mais elevada. As juntas adesivas com menor resistência são as que utilizam o SikaForce® 7752. Estes resultados repetem-se considerando a variação crescente de t_{SI} e $t_{SI}-t_{SE}$. O aumento do valor de t_{SE} provoca um aumento considerável de $P_{m\acute{a}x}$ para o Araldite® 2015 mas que estabiliza rapidamente para valores de t_{SE} reduzidos. Relativamente ao Araldite® AV135 não se observam melhorias na resistência das juntas e, no que toca às do SikaForce® 7752, conclui-se que o aumento de t_{SE} prejudica o seu desempenho, uma vez que ocorre uma redução gradual de $P_{m\acute{a}x}$.

KEYWORDS

Epoxy, Polyurethane, Tubular adhesive joints, Finite Element Method, Cohesive Zone Models, Geometric parameters.

ABSTRACT

Bonding with adhesives is increasingly being used in the design of mechanical structures, because of the significant advantages of this technique compared to traditional joints. In fact, adhesive bonded joints have been under intense investigation for quite some time. Among the advantages, it is worth mentioning the weight reduction and the possibility of joining different materials, including composites, without damaging the structures to be connected. Commercial adhesives range from strong and brittle (for example, Araldite® AV138) to less strong and ductile (for example, Araldite® 2015). A new family of polyurethane adhesives combines high strength and ductility (e.g. Sikaforce® 7752).

This dissertation compares the tensile performance of the three above-mentioned adhesives on aluminum tubular joints (AW6082-T651), considering the variation of the main geometric parameters and their geometric alteration. The main parameters are the overlap length (L_0) and the thickness of the inner and outer tubes (t_{SI} and t_{SE} , respectively). The geometric changes consist on the consideration of the existence of an outer chamfer of the adherends, inner chamfer of the adherends and the addition of a fillet of adhesive at the ends of L_0 . The numerical analysis by cohesive zone models (CZM) was performed to analyze peel (σ_y) and shear stresses (τ_{xy}) in the adhesive layer and to evaluate the CZM capacity in the joint strength prediction.

A numerical parametric study of tubular adhesive joints demonstrates that there are no significant changes in their strength relative to the application of external or internal chamfers of adherends or adhesive fillets. On the other hand, there is a considerable increase of $P_{m\acute{a}x}$ with the increase of L_0 , and the joints with Araldite® 2015 are those with the highest strength. The less strong adhesive joints are those using SikaForce® 7752. These results are repeated considering the increasing variation of t_{SI} and $t_{SI}-t_{SE}$. Increasing the t_{SE} value causes a considerable increase in $P_{m\acute{a}x}$ for the Araldite® 2015 but which stabilizes rapidly at reduced t_{SE} values. Concerning the Araldite® AV138, there is no strength improvement of the joints and, as regards to the SikaForce® 7752, it is concluded that the increase of t_{SE} reduces its performance, since a gradual reduction of $P_{m\acute{a}x}$ occurs.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
a.C.	Antes de Cristo
CFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EF	Elementos Finitos
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
MFVF	Método de Fecho da Fenda Virtual
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i> (Placas de circuito impressas)
pH	Potencial hidrogeniónico
PMMA	Polimetacrilato de metila
PVC	Policloreto de vinilo
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>

 Lista de Unidades

GPa	Gigapascal
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton

 Lista de Símbolos

γ_f	Deformação de rotura ao corte
$\delta_{\text{máx}}$	Deslocamento máximo
$\Delta P_{\text{máx}}$	Aumento percentual
ϵ	Deformação
ϵ_f	Deformação de rotura à tração
θ	Ângulo entre os aderentes
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão principal
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_r	Tensão na direção r
σ_y	Tensão de cedência à tração
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte
τ_{zr}	Tensão de corte no plano z e direção r
$\tau_{\theta r}$	Tensão de corte no plano θ e direção r

GLOSSÁRIO DE TERMOS

a_{SI}	Ângulo do chanfro na extremidade do substrato exterior
a_{SO}	Ângulo do chanfro na extremidade do substrato exterior
b	Ângulo do chanfro na extremidade do substrato exterior
c	Metade do comprimento de sobreposição
D	Rigidez de flexão do aderente
d_{SE}	Diâmetro externo do substrato exterior
d_{SI}	Diâmetro externo do substrato interior
E	Módulo de elasticidade longitudinal/Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
G_C	Tenacidade
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
G_t	Taxa de libertação de energia
k	Fator de momento fletor
K	Rigidez coesiva do adesivo
L	Comprimento da junta
l_{ASI}	Comprimento do chanfro no aderente exterior
l_{ASO}	Comprimento do chanfro no aderente exterior
L_O	Comprimento de sobreposição
L_S	Comprimento dos substratos
L_T	Comprimento total da junta adesiva tubular

M	Momento fletor
N	Força aplicada na direção normal
P	Força aplicada
$P_{\text{máx}}$	Força máxima aplicada
$P_{\text{máx Méd}}$	Força máxima média
r	Direção radial
t	Espessura do substrato
T	Força aplicada na direção transversal
t_A	Espessura do adesivo
t_m^0	Resistência em modo misto
t_n	Componente de tensão normal
t_s	Componente de tensão ao corte
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
t_{SE}	Espessura do substrato exterior
t_{SI}	Espessura do substrato interior
z	Direção longitudinal

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NAS LIGAÇÕES SOLDADAS, APARAFUSADAS/REBITADAS E ADESIVAS [7].....	8
FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDADURA AO LONGO DO TEMPO [10].....	9
FIGURA 3 – LIGAÇÃO DE DIVERSOS COMPONENTES DE MATERIAIS DISSIMILARES, NUM FOKKER FRIENDSHIP F27, ALTERADO DE ADHESIVES IN CIVIL ENGINEERING [17].....	15
FIGURA 4 – DIFERENTES LOCAIS DE APLICAÇÃO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS EM VEÍCULOS LIGEIOS DE PASSAGEIROS [20].....	16
FIGURA 5 – A) REFORÇO DA ESTRUTURA DE UMA PONTE COM PLACAS DE AÇO [17]; B) CONSTRUÇÃO DE UMA PONTE POR SEGMENTOS, TIRANDO-SE VANTAGEM DO ENDURECIMENTO À TEMPERATURA AMBIENTE DOS ADESIVOS DE EPÓXIDO [24].....	17
FIGURA 6 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS DIVERSAS APLICAÇÕES DE ADESIVOS ESTRUTURAIS NUM BARCO EM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (ALTERADO DE [25]).....	18
FIGURA 7 – UTILIZAÇÃO DE UM ADESIVO ACRÍLICO, COM CAPACIDADE DE ENDURECER À TEMPERATURA AMBIENTE, PARA LIGAR CHIPS EM CIRCUITOS IMPRESSOS EM PLACAS [24].....	19
FIGURA 8 – ESQUEMA INDICATIVO DOS DIVERSOS COMPONENTES DE UM SAPATO SUJEITOS A LIGAÇÃO ADESIVA [26].....	20
FIGURA 9 – ESFORÇOS TÍPICOS NUMA JUNTA ADESIVA: A) COMPRESSÃO; B) TRAÇÃO; C) CORTE; D) ARRANCAMENTO; E) CLIVAGEM [30]	20
FIGURA 10 – DIFERENÇA NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES CAUSADA PELA NÃO AXIALIDADE DA CARGA APLICADA [29].....	21
FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NUMA JUNTA ADESIVA SUJEITA A ESFORÇOS DE COMPRESSÃO/TRAÇÃO [7]	22
FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO NUMA JSS SUJEITA A ESFORÇOS DE CORTE, SEGUNDO O MODELO ANALÍTICO DE VOLKERSEN [31]	22
FIGURA 13 – EFEITO DO COMPRIMENTO E DA LARGURA DE SOBREPOSIÇÃO [7]	23
FIGURA 14 – ÂNGULO DE SEPARAÇÃO DOS ADERENTES EM: A) CLIVAGEM; B) ARRANCAMENTO [30] ...	23
FIGURA 15 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NUMA JUNTA ADESIVA SOB ESFORÇO DE CORTE (À ESQUERDA) E ESFORÇO DE CLIVAGEM (À DIREITA) [4]	23
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE TENSÕES DE ARRANCAMENTO NUMA JSS [29]	24
FIGURA 17 – COMPORTAMENTO DE UM ADESIVO RÍGIDO (À ESQUERDA) E FLEXÍVEL (À DIREITA) AQUANDO SUJEITOS A ESFORÇOS DE ARRANCAMENTO [4]	24
FIGURA 18 – MODOS DE RUTURA EM JUNTAS ADESIVAS [7]	26

FIGURA 19 – TIPOS DE JUNTAS MAIS COMUNS UTILIZADAS EM ENGENHARIA [7]	33
FIGURA 20 – MODO COMO UMA JSS SOBRE ESFORÇOS DE FLEXÃO DEVIDO AO DESALINHAMENTO DA FORÇA DE CORTE, RELATIVAMENTE À CARGA APLICADA [4]	34
FIGURA 21 – CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS DE JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO [30]	34
FIGURA 22 – VARIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CORTE NUMA JSS: 1 – SEM CHANFRO, COM UMA ESPESSURA DE ADESIVO FINITA; 2 – COM CHANFRO; 3 – COM CHANFRO E MENOR ESPESSURA DE ADESIVO [4]	35
FIGURA 23 – EFEITO DA EXISTÊNCIA DE CHANFRO NUMA JSS AO LONGO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO, SOB ESFORÇO DE CORTE. ALTERADO DE HANDBOOK OF ADHESIVES AND SEALANTS [4].....	35
FIGURA 24 – CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS DE JUNTAS COM TIRA. ADAPTADO DE HANDBOOK OF ADHESIVES AND SEALANTS [4]	36
FIGURA 25 – CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS DE JUNTAS TOPO A TOPO [30]	37
FIGURA 26 – CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS PARA JUNTAS TUBULARES: A) LIGAÇÕES EM VARÕES; B) LIGAÇÕES EM TUBOS. ALTERADO DE HANDBOOK OF ADHESIVES AND SEALANTS [4]	37
FIGURA 27 – JUNTA TUBULAR COM AS EXTREMIDADES DOS SUBSTRATOS: A) SEM A PRESENÇA DE CHANFRO NOS TUBOS; B) COM A PRESENÇA DE CHANFROS NOS TUBOS T [12].....	38
FIGURA 28 – JUNTAS TUBULARES COM A EXISTÊNCIA DE ORIFÍCIOS PARA PERMITIR A LIBERTAÇÃO DE AR [30].....	38
FIGURA 29 – TIPOS DE JUNTAS EM T [12]	39
FIGURA 30 - TIPOS DE JUNTAS DE CANTO [30]	40
FIGURA 31 – EFEITO DE POISSON TRIDIMENSIONAL NUMA JSS [42].....	42
FIGURA 32 – MODOS DE PROPAGAÇÃO DE UMA FENDA [89]	49
FIGURA 33 – A) ZONA DE PROCESSO DE FRATURA À FRENTE DA PONTA DA FENDA; B) ZONA COESIVA EQUIVALENTE [52]	50
FIGURA 34 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ZONA DO PROCESSO DE DANO NUMA JUNTA ADESIVA E A CORRESPONDENTE LEI DE TRAÇÃO-SEPARAÇÃO BI-LINEAR [52]	51
FIGURA 35 – APLICAÇÃO DE ELEMENTOS COESIVOS EM CONJUNTO COM ELEMENTOS DE VOLUME (CONTÍNUOS) [99].....	51
FIGURA 36 – A) ELEMENTOS COESIVOS PARA SIMULAR CAMINHOS DE ROTURA COM ESPESSURA NULA: APROXIMAÇÃO LOCAL; B) MODELAÇÃO DE UMA CAMADA FINA DE ADESIVO: APROXIMAÇÃO CONTÍNUA [65]	52
FIGURA 37 - PRINCIPAIS FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS [27]	54

FIGURA 38 – RESISTÊNCIA DE UMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO [14]	55
FIGURA 39 – EFEITO DA FORÇA DE ROTURA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO, PARA ADESIVOS FRÁGEIS E DÚCTEIS [4].....	56
FIGURA 40 – REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO FLETOR GERADO NUMA JSS AQUANDO SUJEITA A ESFORÇOS DE CORTE. ALTERADO DE [4]	56
FIGURA 41 – EFEITO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DOS SUBSTRATOS NA RESISTÊNCIA DA JUNTA [114]	57
FIGURA 42 – JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES COM UM FILETE DE ADESIVO [14]	57
FIGURA 43 – DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CORTE EM JSS COM E SEM CHANFRO EXTERIOR [118]	58
FIGURA 44 – PERFIL ÓTIMO PARA UMA JSS DE ACORDO COM GROTH E NORDLUND [14].....	58
FIGURA 45 – SUGESTÕES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA DE UMA JSS SEGUNDO HART-SMITH [53]	58
FIGURA 46 – JUNTAS ADESIVAS COM VÁRIOS TIPOS DE CHANFRO:1) JUNTA ADESIVA TÍPICA; 2) JUNTA ADESIVA COM CHANFRO EXTERIOR; 3) JUNTA ADESIVA COM CHANFRO INTERIOR; 4) JUNTA ADESIVA COM CHANFRO DE ADESIVO; 5) JUNTA ADESIVA COM CHANFRO INTERIOR NO ADERENTE E CHANFRO DE ADESIVO (DIMENSÕES EM MM) [67].....	59
FIGURA 47 – GEOMETRIA DE UMA JUNTA ADESIVA: A) JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES; B) JUNTA ONDULADA [123]	62
FIGURA 48 – CURVAS DE FORÇA VS. DESLOCAMENTO OBTIDAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS. A) JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES; B) JUNTA ONDULADA [123]	62
FIGURA 49 – MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UMA JUNTA COM RASGO TRANSVERSAL [128]	63
FIGURA 50 – GEOMETRIA DA: A) JUNTA TUBULAR; B) JUNTA TUBULAR COM CHANFRO [40].....	64
FIGURA 51 – MODELO AXISSIMÉTRICO 2D DE EF DA JUNTA ADESIVA TUBULAR, REPRESENTANDO TODOS OS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS, CARGA E CONDIÇÕES FRONTEIRA [2]	65
FIGURA 52 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA JUNTA ADESIVA TUBULAR: A) MODELO COMPLETO; B) ZONA APROXIMADA DA REGIÃO DE SOBREPOSIÇÃO [130].....	66
FIGURA 53 – UMA JUNTA CIRCULAR COM UMA MANGA SOB TENSÃO AXIAL: A) GEOMETRIA GLOBAL; B) TÍPICO ELEMENTO DIFERENCIAL [131]	67
FIGURA 54 – COMPORTAMENTO PLÁSTICO DE DOIS COMPRIMENTOS DE SOBREPOSIÇÃO DIFERENTES, L, RESULTANTE DO TESTE DE TORÇÃO ESTÁTICO, MOSTRANDO O NÚMERO DE AMOSTRAS PARA CADA COMPRIMENTO [129]	68
FIGURA 55 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE VON MISES AO LONGO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO EM FUNÇÃO DA TORÇÃO APLICADA PELA ANÁLISE DE EF [129].....	69
FIGURA 56 – MODELOS DE EF UTILIZADOS DAS DUAS JUNTAS ADESIVAS DELAMINADAS: A) JUNTA ADESIVA TUBULAR TÍPICA; B) JUNTA ADESIVA TUBULAR COM CASQUILHO [134]	70

FIGURA 57 – ESQUEMA DA JUNTA TUBULAR EM ESTUDO: A) VISTA ISOMÉTRICA; B) VISTA TRANSVERSAL [135].....	71
FIGURA 58 – DIMENSÕES DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NO ESTUDO REALIZADO POR REEDY ET AL. [138]	73
FIGURA 59 – CONFIGURAÇÃO DA GEOMETRIA DO PROVETE	77
FIGURA 60 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO (σ - ε) DA LIGA DE ALUMÍNIO AW6082-T651 [140]	79
FIGURA 61 – CURVAS Σ - ε DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [140]	79
FIGURA 62 – CURVAS Σ - ε DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [141].....	81
FIGURA 63 – CURVAS Σ - \bar{E} DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [37].....	82
FIGURA 64 – CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA O ARALDITE® AV138: A) $L_0=20$ MM; B) $L_0=40$ MM	84
FIGURA 65 – CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA O ARALDITE® 2015: A) $L_0=20$ MM; B) $L_0=40$ MM	86
FIGURA 66 – CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA O SIKAFORCE® 7752: A) $L_0=20$ MM; B) $L_0=40$ MM	87
FIGURA 67 – VARIAÇÃO DE $P_{MÁX}$ COM L_0 PARA AS JUNTAS ADESIVAS COM OS TRÊS ADESIVOS	89
FIGURA 68 – LEI COESIVA TRIANGULAR [150].....	90
FIGURA 69 – MDC TRIANGULAR [142]	91
FIGURA 70 – ATRIBUIÇÃO DOS RESPECTIVOS MATERIAIS AOS SUBSTRATOS E ADESIVO PARA ANÁLISE POR MDC NO ABAQUS®	94
FIGURA 71 – JUNTA ADESIVA TUBULAR MODELADA NO ABAQUS®	95
FIGURA 72 – DESENHO 2D DE UMA JUNTA ADESIVA TUBULAR COM $L_0=20$ MM NO ABAQUS®	96
FIGURA 73 – DIFERENTES PARTIÇÕES EXISTENTES NO MODELO CRIADO NO ABAQUS®	96
FIGURA 74 – DEFINIÇÃO DE INCREMENTOS PARA ANÁLISE NO ABAQUS®	97
FIGURA 75 – REPRESENTAÇÃO DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA NA SIMULAÇÃO.....	98
FIGURA 76 – DETALHE DA MALHA DE MEF NA ZONA DE SOBREPOSIÇÃO PARA UMA JUNTA COM $L_0=20$ MM	99
FIGURA 77 – ASPETO DA JUNTA ADESIVA TUBULAR APÓS A SIMULAÇÃO NO ABAQUS®	100
FIGURA 78 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES σ_Y NAS JUNTAS ADESIVAS TUBULARES: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	101
FIGURA 79 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES T_{XY} NAS JUNTAS ADESIVAS TUBULARES: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	103

FIGURA 80 – CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, COM (A) $L_0=20$ MM E (B) $L_0=40$ MM	104
FIGURA 81 – CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, COM (A) $L_0=20$ MM E (B) $L_0=40$ MM	105
FIGURA 82 – CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, COM (A) $L_0=20$ MM E (B) $L_0=40$ MM	105
FIGURA 83 – $P_{M\acute{A}X}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS TRÊS ADESIVOS: RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISÃO POR MDC PARA AS JUNTAS ADESIVAS TUBULARES.....	108
FIGURA 84 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES σ_Y/T_{AVG} NAS JUNTAS ADESIVAS TUBULARES EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE L_0 : (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752.....	111
FIGURA 85 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES T_{XY}/T_{AVG} NAS JUNTAS ADESIVAS TUBULARES EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE L_0 : (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752.....	113
FIGURA 86 – CURVAS P- Δ OBTIDAS POR MDC NO ABAQUS® EM FUNÇÃO DE L_0 , PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	114
FIGURA 87 – ESTRICÇÃO GERADA NO TUBO INTERIOR PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015, COM $L_0=40$ MM	115
FIGURA 88 – EVOLUÇÃO DE $P_{M\acute{A}X}$ EM FUNÇÃO DE L_0 , PARA OS TRÊS ADESIVOS.....	116
FIGURA 89 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y/T_{AVG} CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SI} PARA: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	118
FIGURA 90 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY}/T_{AVG} CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SI} PARA: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752.....	120
FIGURA 91 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y/T_{AVG} CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SE} PARA: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	121
FIGURA 92 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY}/T_{AVG} CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SE} PARA: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752.....	123
FIGURA 93 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES Σ_Y NAS JUNTAS ADESIVAS TUBULARES EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DAS ESPESSURAS T_{SI} E T_{SE} : (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	124
FIGURA 94 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES T_{XY} NAS JUNTAS ADESIVAS TUBULARES EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DAS ESPESSURAS T_{SI} E T_{SE} : (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	126
FIGURA 95 – CURVAS P- Δ OBTIDAS POR MDC NO ABAQUS® EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE T_{SI} , PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	127
FIGURA 96 – CURVAS P- Δ OBTIDAS POR MDC NO ABAQUS® EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE T_{SE} , PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	129

FIGURA 97 – CURVAS P- Δ OBTIDAS POR MDC NO ABAQUS® EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE T_{SI} E T_{SE} , PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752.....	130
FIGURA 98 – EVOLUÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE T_{SI} , PARA OS TRÊS ADESIVOS.....	132
FIGURA 99 – EVOLUÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE T_{SE} , PARA OS TRÊS ADESIVOS.....	133
FIGURA 100 – EVOLUÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DE T_{SI} - T_{SE} , PARA OS TRÊS ADESIVOS.....	134
FIGURA 101 – DETALHE DA MALHA USADA NO CHANFRO EXTERIOR DO ADERENTE	136
FIGURA 102 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_V/T_{AVG} EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO EXTERIOR DOS ADERENTES, PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	137
FIGURA 103 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY}/T_{AVG} EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO EXTERIOR DOS ADERENTES, PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	138
FIGURA 104 – CURVAS P- Δ OBTIDAS POR MDC NO ABAQUS® EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO EXTERIOR DOS ADERENTES, PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	140
FIGURA 105 – EVOLUÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO EXTERIOR DOS ADERENTES, PARA OS TRÊS ADESIVOS	141
FIGURA 106 – DETALHE DA MALHA USADA NO CHANFRO INTERIOR DO ADERENTE.....	142
FIGURA 107 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_V/T_{AVG} EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO INTERIOR DOS ADERENTES, PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	143
FIGURA 108 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY}/T_{AVG} EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO INTERIOR DOS ADERENTES, PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	145
FIGURA 109 – CURVAS P- Δ OBTIDAS POR MDC NO ABAQUS® EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO INTERIOR DOS ADERENTES, PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	147
FIGURA 110 – EVOLUÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO INTERIOR DOS ADERENTES, PARA OS TRÊS ADESIVOS	148
FIGURA 111 – DETALHE DA MALHA USADA NO FILETE DE ADESIVO	149
FIGURA 112 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_V/T_{AVG} EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO FILETE DE ADESIVO, PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752.....	150
FIGURA 113 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY}/T_{AVG} EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO FILETE DE ADESIVO, PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752.....	152

FIGURA 114 – CURVAS P- Δ OBTIDAS POR MDC NO ABAQUS® EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO FILETE DE ADESIVO, PARA OS TRÊS ADESIVOS: (A) ARALDITE® AV138; (B) ARALDITE® 2015; (C) SIKAFORCE® 7752	153
FIGURA 115 – EVOLUÇÃO DE $P_{MÁX}$ EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO FILETE DE ADESIVO, PARA OS TRÊS ADESIVOS	155

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – EVOLUÇÃO DOS ADESIVOS [15]	11
TABELA 2 – VANTAGENS E DESVANTAGENS NA UTILIZAÇÃO DE ADESIVOS [4]	13
TABELA 3 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS. ADAPTADO DE ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS [13].....	27
TABELA 4 – CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS SEGUNDO O SEU DESEMPENHO [7]	29
TABELA 5 – RESUMO DAS CONSIDERAÇÕES MAIS SIGNIFICATIVAS NAS TEORIAS DE DIVERSOS AUTORES [41].....	43
TABELA 6 – DESIGNAÇÃO DAS COTAS DOS PROVETES E RESPECTIVOS VALORES (EM MM)	78
TABELA 7 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [142].....	80
TABELA 8 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [141]	81
TABELA 9 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [37]	83
TABELA 10 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O ARALDITE® AV138	85
TABELA 11 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O ARALDITE® 2015	86
TABELA 12 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O SIKAFORCE® 7752	88
TABELA 13 – $P_{MÁX}$ MÉD (EM N) E AUMENTO PERCENTUAL DO MESMO ($\Delta P_{MÁX}$ [%]) EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS TRÊS ADESIVOS EM ESTUDO, PARA AS JUNTAS ADESIVAS TUBULARES.....	88
TABELA 14 – PARÂMETROS COESIVOS EM TRAÇÃO E CORTE PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 [100] 92	
TABELA 15 – PARÂMETROS COESIVOS EM TRAÇÃO E CORTE PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 [157],..93	
TABELA 16 – PARÂMETROS COESIVOS EM TRAÇÃO E CORTE PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [37] ..94	
TABELA 17 – DESLOCAMENTOS IMPOSTOS NOS MODELOS DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES EM FUNÇÃO DO ADESIVO UTILIZADO E VALOR DE L_0	98
TABELA 18 – VALORES MÁXIMOS DE σ_V/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, PARA $L_0=20$ MM E $L_0= 40$ MM102	
TABELA 19 – VALORES MÁXIMOS DE T_{XY}/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, PARA $L_0=20$ MM E $L_0= 40$ MM	104
TABELA 20 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA CADA UM DOS ADESIVOS, EM FUNÇÃO DE L_0	106
TABELA 21 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS, PARA OS TRÊS ADESIVOS EM FUNÇÃO DE L_0 , E RESPECTIVA DIFERENÇA RELATIVA.....	108
TABELA 22 – VALORES MÁXIMOS DE Σ_V/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, EM FUNÇÃO DE L_0	112
TABELA 23 – VALORES MÁXIMOS DE T_{XY}/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, EM FUNÇÃO DE L_0	113

TABELA 24 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] PARA OS TRÊS ADESIVOS EM FUNÇÃO DE L_0 , E RESPECTIVO AUMENTO PERCENTUAL	116
TABELA 25 – VALORES MÁXIMOS DE Σ_V/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SI}	119
TABELA 26 – VALORES MÁXIMOS DE T_{XY}/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SI}	120
TABELA 27 – VALORES MÁXIMOS DE Σ_V/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SE}	122
TABELA 28 – VALORES MÁXIMOS DE T_{XY}/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SE}	123
TABELA 29 – VALORES MÁXIMOS DE Σ_V/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SI} E T_{SE}	125
TABELA 30 – VALORES MÁXIMOS DE T_{XY}/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE T_{SI} E T_{SE}	126
TABELA 31 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] PARA OS TRÊS ADESIVOS EM FUNÇÃO DE T_{SI} , E RESPECTIVO AUMENTO PERCENTUAL	131
TABELA 32 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] PARA OS TRÊS ADESIVOS EM FUNÇÃO DE T_{SE} , E RESPECTIVO AUMENTO PERCENTUAL	132
TABELA 33 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] PARA OS TRÊS ADESIVOS EM FUNÇÃO DE T_{SE} , E RESPECTIVO AUMENTO PERCENTUAL	134
TABELA 34 – VALORES MÁXIMOS DE Σ_V/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO EXTERIOR DOS ADERENTES	137
TABELA 35 – VALORES MÁXIMOS DE T_{XY}/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO EXTERIOR DOS ADERENTES	139
TABELA 36 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] PARA OS TRÊS ADESIVOS EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO EXTERIOR DOS ADERENTES, E RESPECTIVO AUMENTO PERCENTUAL	141
TABELA 37 – VALORES MÁXIMOS DE Σ_V/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO INTERIOR DOS ADERENTES	144
TABELA 38 – VALORES MÁXIMOS DE T_{XY}/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO INTERIOR DOS ADERENTES	146
TABELA 39 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] PARA OS TRÊS ADESIVOS EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO CHANFRO INTERIOR DOS ADERENTES, E RESPECTIVO AUMENTO PERCENTUAL	148
TABELA 40 – VALORES MÁXIMOS DE Σ_V/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO FILETE DE ADESIVO	151

TABELA 41 – VALORES MÁXIMOS DE T_{XY}/T_{AVG} PARA OS TRÊS ADESIVOS, EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO FILETE DE ADESIVO	152
TABELA 42 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] PARA OS TRÊS ADESIVOS EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO FILETE DE ADESIVO, E RESPECTIVO AUMENTO PERCENTUAL	155
TABELA 43 – RESUMO DA RESISTÊNCIA MÁXIMA OBTIDA EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO GEOMÉTRICO CONSIDERADO, COM O RESPECTIVO AUMENTO PERCENTUAL.....	156

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do relatório	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Tipos de ligações existentes.....	7
2.1.1	Ligações aparafusadas.....	8
2.1.2	Ligações rebitadas	9
2.1.3	Ligações soldadas	9
2.1.4	Ligações adesivas.....	10
2.2	Ligações adesivas	10
2.2.1	Enquadramento histórico.....	10
2.2.2	Caracterização das juntas adesivas	12
2.2.3	Aplicações comuns das juntas adesivas	14
2.2.3.1	Indústria aeronáutica.....	14
2.2.3.2	Indústria automóvel.....	15
2.2.3.3	Construção civil.....	16
2.2.3.4	Indústria naval	17
2.2.3.5	Indústria eletrónica.....	18
2.2.3.6	Indústria do calçado.....	19
2.2.4	Tipos de esforços em juntas adesivas	20
2.2.4.1	Tração	20
2.2.4.2	Compressão	21
2.2.4.3	Corte	22
2.2.4.4	Clivagem e arrancamento.....	23
2.2.5	Modos de rotura possíveis de ocorrer em juntas adesivas	25

2.2.5.1	Rotura coesiva	25
2.2.5.2	Rotura adesiva	25
2.2.5.3	Rotura mista	25
2.2.5.4	Rotura pelo substrato	26
2.2.6	Classificação dos adesivos	26
2.2.7	Adesivos estruturais	28
2.2.7.1	Adesivos epóxicos.....	29
2.2.7.2	Adesivos fenólicos.....	30
2.2.7.3	Adesivos acrílicos	31
2.2.7.4	Adesivos de poliuretano	32
2.2.7.5	Adesivos de poliimida (Bismaleimidas).....	32
2.2.8	Configurações possíveis de junta	33
2.2.8.1	Juntas de sobreposição.....	33
2.2.8.2	Juntas com tira.....	36
2.2.8.3	Juntas topo a topo – Butt joint	36
2.2.8.4	Juntas tubulares.....	37
2.2.8.5	Juntas em T	39
2.2.8.6	Juntas de canto	40
2.3	Previsão da resistência de juntas adesivas	41
2.3.1	Modelos analíticos	42
2.3.2	Métodos numéricos	44
2.3.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	46
2.3.2.2	Mecânica da fratura.....	48
2.3.2.3	Modelos de dano coesivo	50
2.3.2.4	Mecânica do dano.....	52
2.3.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	53
2.4	Parâmetros que afetam o desempenho das juntas adesivas.....	53
2.4.1	Efeitos geométricos em juntas adesivas	55
2.4.1.1	Comprimento de sobreposição.....	55

2.4.1.2	Espessura dos aderentes	56
2.4.1.3	Utilização de filetes de adesivo.....	57
2.4.1.4	Geometria dos substratos – utilização de chanfros.....	58
2.4.1.5	Espessura do adesivo	60
2.4.2	Outras alterações geométricas	61
2.4.2.1	Juntas onduladas/dobradas.....	61
2.4.2.2	Juntas com rasgo transversal.....	62
2.5	Juntas adesivas tubulares	63
2.5.1	Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração.....	64
2.5.2	Juntas tubulares sujeitas a esforços de corte.....	67
2.5.3	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga	71
3	DESENVOLVIMENTO.....	77
3.1	Validação da técnica numérica com dados experimentais	77
3.1.1	Descrição da geometria e materiais	77
3.1.1.1	Substratos	78
3.1.1.2	Adesivos.....	79
	Araldite® AV138	79
	Araldite® 2015.....	80
	Sikaforce® 7752.....	82
3.1.2	Resultados experimentais obtidos	83
3.1.2.1	Araldite® AV138.....	84
3.1.2.2	Araldite® 2015	85
3.1.2.3	SikaForce® 7752.....	86
3.1.3	Comparação de resultados.....	88
3.1.4	Modelo de dano coesivo triangular	89
3.1.4.1	Formulação do modelo.....	90
3.1.4.2	Determinação das propriedades coesivas	92
	Araldite® AV138	92
	Araldite® 2015.....	93

SikaForce® 7752	93
3.1.5 Condições da análise numérica	94
3.1.6 Análise de tensões nas juntas	100
3.1.6.1 Tensões de arrancamento	100
3.1.6.2 Tensões de corte.....	102
3.1.7 Previsão da resistência por MDC.....	104
3.1.8 Discussão dos resultados obtidos	105
3.1.9 Validação dos resultados obtidos pelo MDC a partir dos resultados experimentais	107
3.2 Estudo numérico	109
3.2.1 Estudo dos parâmetros geométricos principais	110
3.2.1.1 Comprimento de sobreposição.....	110
3.2.1.1.1 Distribuições de tensões	110
3.2.1.1.1.1 Tensões de arrancamento	110
3.2.1.1.1.2 Tensões de corte.....	112
3.2.1.1.2 Resistência das juntas	114
3.2.1.1.3 Comparação de resultados	115
3.2.1.2 Espessura dos aderentes	117
3.2.1.2.1 Distribuições de tensões	117
3.2.1.2.1.1 Espessura do tubo interior variável	117
3.2.1.2.1.2 Espessura do tubo exterior variável.....	121
3.2.1.2.1.3 Espessura de ambos os tubos variável.....	124
3.2.1.2.2 Resistência das juntas	127
3.2.1.2.2.1 Espessura do tubo interior variável	127
3.2.1.2.2.1.5 Espessura do tubo exterior variável.....	128
3.2.1.2.2.1.6 Espessura de ambos os tubos variável.....	129
3.2.1.2.3 Comparação de resultados	130
3.2.1.2.3.1 Espessura do tubo interior variável	131
3.2.1.2.3.1.8 Espessura do tubo exterior variável.....	132
3.2.1.2.3.1.9 Espessura de ambos os tubos variável.....	133
3.2.2 Estudo de alterações geométricas	135

3.2.2.1	Chanfro exterior dos aderentes	135
3.2.2.1.1	Distribuições de tensões	136
3.2.2.1.1.1	Tensões de arrancamento	136
3.2.2.1.1.2	Tensões de corte	138
3.2.2.1.2	Resistência das juntas	139
3.2.2.1.2	Comparação de resultados	140
3.2.2.2	Chanfro interior dos aderentes.....	142
3.2.2.2.1	Distribuições de tensões	142
3.2.2.2.1.1	Tensões de arrancamento	142
3.2.2.2.1.2	Tensões de corte	144
3.2.2.2.2	Resistência das juntas	146
3.2.2.2.2	Comparação de resultados	147
3.2.2.3	Filete de adesivo	149
3.2.2.3.1	Distribuições de tensões	149
3.2.2.3.1.1	Tensões de arrancamento	149
3.2.2.3.1.2	Tensões de corte	151
3.2.2.3.2	Resistência das juntas	153
3.2.2.3.3	Comparação de resultados	154
3.2.3	Análise dos resultados obtidos.....	156
4	CONCLUSÕES.....	163
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	171

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objetivos

1.3 Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos dias de hoje, o rigor na quantificação de forças e tensões envolvidas numa estrutura é cada vez mais exigido, sobretudo quando existe um mercado em crescimento e competitivo que impõe constantemente novos produtos de elevada qualidade. As juntas adesivas revelam-se uma ótima solução quando se pretende realizar a união de componentes de uma estrutura, uma vez que possuem características que as favorecem relativamente a outras formas de ligação. As juntas adesivas apresentam uma distribuição de tensões mais uniforme, adaptam-se melhor na união de superfícies irregulares, possuem um bom comportamento quando são sujeitas a cargas cíclicas e são de fácil execução. No entanto, a sua desmontagem não é exequível na maior parte dos casos, apresentam fraca resistência ao arrancamento e por vezes são requeridas pressões e temperaturas elevadas para efetuar a cura [1].

Como referido no parágrafo anterior, existe uma crescente utilização de adesivos em diversas indústrias, das quais se destaca a de transporte. Construtores de aviões, automóveis e autocarros começaram a integrar gradualmente ligações adesivas nestas estruturas. Para estas aplicações, as uniões adesivas são sobretudo planares, tais como painéis metálicos e poliméricos. Contudo, a implementação desta tecnologia para elementos tubulares pode beneficiar a estrutura na medida em que permite reduzir o peso da mesma, distribui de forma mais uniforme as tensões, não danifica o material dos aderentes e possibilita a ligação de materiais dissimilares [2].

Uma vez que apenas uma pequena área da ligação adesiva está associada às juntas tubulares, é importante que a sua geometria seja otimizada de forma a providenciar a maior resistência mecânica possível. Uma vez que o peso reduzido da junta é uma característica importante deste método de ligação, engenheiros e *designers* têm a importante tarefa de encontrar o melhor compromisso possível entre a massa da junta e a sua resistência mecânica. Desta forma, para além dos materiais utilizados, a alteração dos aspetos dimensionais vai influenciar o comportamento da junta adesiva, como por exemplo o comprimento de sobreposição, espessura dos substratos e a espessura da camada de adesivo [2].

Devido à crescente utilização das ligações adesivas, em conjunto com os comportamentos marcadamente diferentes das juntas adesivas em função dos parâmetros referidos, torna-se necessária a existência de ferramentas que permitam o projeto expedito destas ligações. Assim, para a análise de juntas adesivas, está a ser cada

vez mais utilizado o Método de Elementos Finitos (EF) que, combinado com critérios ou modelos de dano mais ou menos complexos, pode revelar-se como uma ferramenta fundamental para o projeto de ligações adesivas. No âmbito das técnicas disponíveis, os modelos de dano coesivo (MDC) são uma ferramenta de grande importância, por combinarem os parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para previsão do desempenho das juntas adesivas. É assim possível a modelação de juntas adesivas com diferentes tipos de adesivo e configurações de junta. Desta forma, considera-se necessária a aferição desta técnica numérica para a previsão da resistência em juntas adesivas para validação de uma ferramenta que seja universal no que concerne ao seu âmbito de aplicação [3].

1.2 Objetivos

Esta dissertação visa o estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração. São criadas juntas adesivas tubulares com tubos de alumínio e ligadas com adesivos distintos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

Numa primeira fase, pretende-se construir os provetes e ensaiá-los. Os valores dos ensaios serão posteriormente recolhidos e tratados analiticamente recorrendo ao Microsoft® Excel.

O passo seguinte consiste na elaboração das análises numéricas por MDC no ABAQUS® dos modelos das respetivas juntas adesivas. Estes estudos permitem simular o ensaio mecânico à tração real e obter dados fiáveis. Como tal, pretende-se registar as tensões σ_y e τ_{xy} para aferir a forma de como as mesmas se distribuem pelas juntas e obter as curvas $P-\delta$ para cada junta adesiva. Os respetivos valores de $P_{m\acute{a}x}$ apresentados permitirão efetuar a validação dos mesmos relativamente aos valores de resistência obtidos experimentalmente.

A última fase desta dissertação concentra-se no estudo paramétrico numérico propriamente dito. Aqui, recorrendo às propriedades dos materiais validadas experimentalmente, pretende-se efetuar as alterações dos parâmetros geométricos e, em função disso, analisar o comportamento das juntas adesivas tubulares a partir de estudos numéricos por MDC. Desta forma, serão analisadas as diferentes distribuições σ_y e τ_{xy} , assim como os resultados da previsão da resistência das juntas. Com isto, pretende-se verificar a evolução no desempenho das juntas adesivas tubulares estudadas considerando diversas alterações na geometria das mesmas.

1.3 Organização do relatório

Para uma melhor interpretação e análise do trabalho desenvolvido, esta dissertação foi dividida em 4 capítulos distintos.

No capítulo 1 foi enquadrado o trabalho realizado, definidos os objetivos e apresentada a calendarização do mesmo.

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, que aborda os diferentes tipos de ligação, os diferentes tipos de juntas, os adesivos estruturais, os métodos mais importantes para a determinação das propriedades dos adesivos, os tipos de esforços aplicados em juntas adesivas tubulares e por último, os parâmetros geométricos que mais influenciam o desempenho das juntas adesivas.

A fase inicial do capítulo 3 corresponde à validação dos resultados numéricos relativamente aos experimentais. O estudo paramétrico numérico realizado no *software* ABAQUS® é apresentado na segunda parte deste capítulo, incluindo resultados obtidos e análise dos mesmos. Neste capítulo é também feita a análise das distribuições de tensões e previsão de resistência para cada variação/alteração geométrica efetuada nas juntas adesivas tubulares.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões obtidas, assim como é realizada referência a possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tipos de ligações existentes

2.2 Ligações adesivas

2.3 Previsão da resistência de juntas adesivas

2.4 Parâmetros que afetam o desempenho das juntas adesivas

2.5 Juntas adesivas tubulares

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo é dedicado à apresentação dos diferentes tipos de adesivos e respectivas ligações a que os mesmos se destinam, assim como as suas principais características e aplicações. Também são mencionados os tipos de rotura possíveis de suceder, dependendo do tipo de solicitação a que a ligação está sujeita e da configuração da mesma.

De forma a averiguar a validade/fiabilidade de uma ligação adesiva é necessário avaliá-la quanto ao seu comportamento durante a aplicação de um carregamento que simula uma situação real. Para tal, neste mesmo capítulo é feita uma breve descrição dos métodos analíticos mais comuns que se aplicam para o efeito, assim como os métodos numéricos, já que estes últimos se apresentam como uma ótima alternativa aos ensaios/testes reais devido à grande proximidade de resultados obtidos, evitando custos associados aos mesmos.

Numa fase final deste capítulo, dá-se ênfase às ligações adesivas tubulares, uma vez que será sobre estas que os estudos realizados irão incidir. Aqui são referidos os tipos de carregamentos/esforços a que as mesmas podem ser sujeitas e os diversos parâmetros que influenciam o comportamento de uma ligação adesiva.

2.1 Tipos de ligações existentes

A construção de uma estrutura mais ou menos complexa exige a união entre dois ou mais componentes que, por sua vez, implica a necessidade de aplicação de técnicas que promovam bons resultados relativamente ao seu comportamento aquando à solicitação de esforços/carregamentos. As zonas mais críticas numa estrutura são, geralmente nas uniões/juntas. Como tal, é necessário um método construtivo que garanta que estas se encontrem seguras e que apresentem o menor número de inconvenientes possíveis [4].

Existem várias formas de criar uma ligação, seja uma ligação mecânica aparafusada, rebitada, soldada ou adesiva. Todas apresentam grandes virtudes e por isso são ótimas soluções para a indústria de construções mecânicas, apesar de apresentarem igualmente as suas limitações. Na presente literatura faz-se enfoque às ligações adesivas, sendo que estas têm ganhado terreno neste tipo de indústria já que têm apresentado resultados muito positivos nas diversas aplicações a que têm sido sujeitas [4].

2.1.1 Ligações aparafusadas

A aplicação de conectores mecânicos, tais como parafusos, pregos, pinos e rebites, tem sido um sucesso no que toca à criação de uma junta estável e durável, constituindo uma solução adequada para quando se pretende uma união com requisitos elevados. A sua utilização geralmente descarta a necessidade de preparação de superfícies, é um método energeticamente económico e não necessita de mão-de-obra qualificada [5], contudo, é necessária a perfuração dos componentes. Ao contrário de muitos adesivos, estes elementos de ligação apresentam um tempo de armazenamento elevado, não são tão nocivos para o ambiente e como podem ser removidos e reinstalados com pouco ou nenhum dano na ligação, permitem uma fácil inspeção da mesma [6].

Por outro lado, uma ligação aparafusada requer um ligeiro sobredimensionamento, tornando-a mais pesada, o que geralmente é um constrangimento. Também, sobre certas circunstâncias, os parafusos podem afrouxar, além disso os furos necessários para a aplicação destes elementos diminuem a resistência das peças devido a picos de tensão gerados (Figura 1) e podem originar rotura por fadiga nesses pontos.

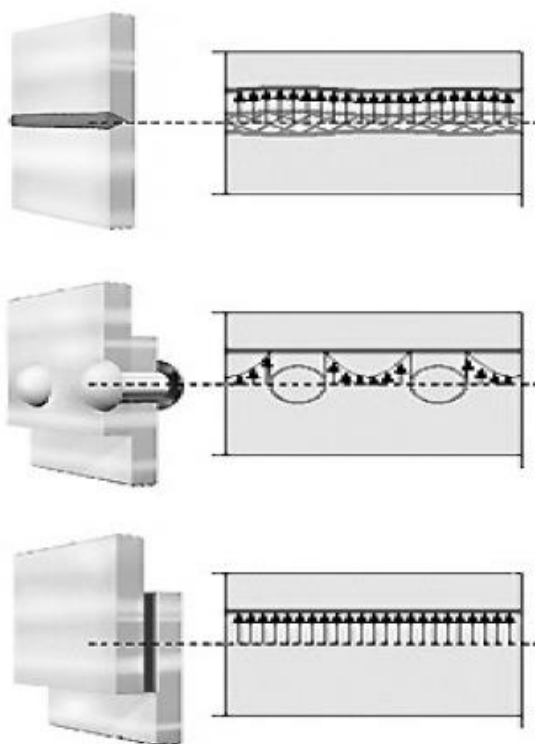


Figura 1 – Distribuição de tensões nas ligações soldadas, aparafusadas/rebitadas e adesivas [7]

Uma outra desvantagem deste tipo de ligação deve-se à força eletromotriz dos materiais que pode gerar corrosão galvânica entre os parafusos e os substratos. Para corrigir este problema, realiza-se uma vedação ou proteção do substrato, mas por outro lado, esta ação torna o processo mais dispendioso [7].

2.1.2 Ligações rebitadas

As ligações rebitadas têm igual destaque no que toca a ligações mecânicas já que são utilizadas há dezenas de anos. Esta técnica atingiu o seu auge no final do século XIX e no início do século XX na Europa e na América do Norte, na construção de pontes metálicas. Contudo, inicialmente as pontes não eram projetadas considerando os fenómenos de fadiga, o que resultou no colapso prematuro de muitas destas estruturas. Além disso, as condições de tráfego eram completamente diferentes nos dias de hoje. Desta feita, atualmente são realizados vários estudos de forma a avaliar e encontrar soluções que permitam aferir uma maior longevidade de vida útil deste tipo de estruturas, relativamente às ligações rebitadas [8]. Com isto, verifica-se que o principal problema das ligações rebitadas incide sobre a fadiga, o que obriga a aplicação de um grande número de rebites numa ligação. Para além disso, este processo origina o surgimento de picos de tensão devido aos furos feitos nos componentes (Figura 1), o que torna a ligação mais frágil [5]. Para corrigir a fragilidade da ligação, procede-se ao aumento da espessura da chapa/componente, resultando num aumento da massa que, como já foi mencionado nas ligações aparafusadas, é na maior parte das vezes um inconveniente.

2.1.3 Ligações soldadas

Outro tipo de ligação muito utilizada é a soldada. Atingiu o seu auge durante a segunda Guerra Mundial, devido à necessidade de construir navios e aviões, sendo o arco elétrico com elétrodo revestido usado como principal processo de soldadura. Com o passar dos anos foram surgindo diversos tipos de soldadura graças à evolução tecnológica (Figura 2) [9].

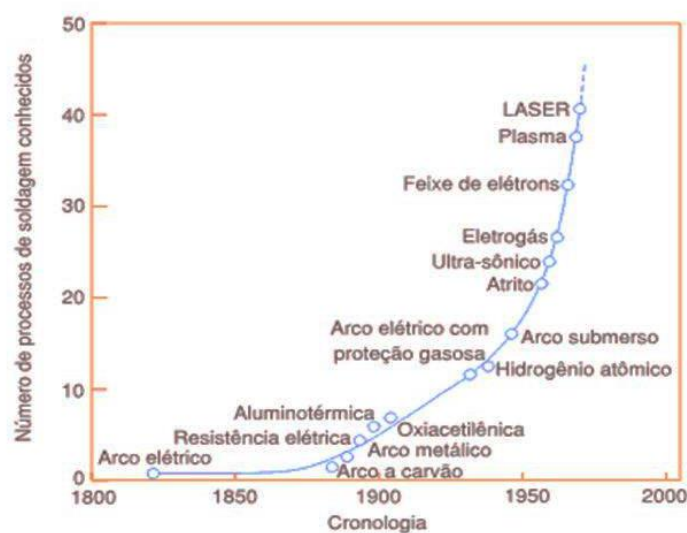


Figura 2 – Evolução dos processos de soldadura ao longo do tempo [10]

Esta técnica que combina a aplicação de calor e pressão, permite uma união forte entre dois ou mais componentes, pode ser um processo manual ou completamente automatizado. Contudo, a soldadura apresenta desvantagens, sobretudo relacionadas com o calor libertado sobre a ligação, que resulta em distorções ou empenos e, por vezes, degradação das propriedades do material constituinte da mesma. Portanto, é fulcral que o operador tenha a experiência necessária para realizar este tipo de tarefa. Além disso, o processo de soldadura é muito limitado no que toca à junção de componentes de materiais diferentes e espessuras elevadas pois implica uma preparação cuidada da junta (elaboração de chanfros) [11].

2.1.4 Ligações adesivas

Perante os casos apresentados nos três pontos anteriores, as ligações adesivas tornaram-se uma boa alternativa a ter em consideração quando se pretende uma ligação segura e fiável. Para tal, existe a necessidade de ter um cuidado especial no tratamento das superfícies. Contudo, os adesivos são de fácil aplicação e, ao contrário de uma ligação soldada, não geram zona termicamente afetada e permitem a união de componentes de materiais diferentes, de espessuras consideráveis e geometrias complexas. Em relação às ligações mecânicas, como aparafusagem e rebitagem, a inexistência de furos permite uma distribuição de tensões muito mais uniforme por toda a área de colagem (Figura 1). Uma vez que o adesivo está aplicado entre os substratos sob a forma de uma película, não existem problemas de erosão por atrito/desgaste e fadiga. Para além de colar os elementos pretendidos na ligação, os adesivos têm a capacidade de vedar, o que elimina qualquer problema relacionado com a corrosão. Além disso, devido às propriedades eletroquímicas diferentes às dos metais, também se descartam os inconvenientes gerados pela corrosão galvânica [7].

2.2 Ligações adesivas

2.2.1 Enquadramento histórico

O fenómeno da adesão tem sido do interesse do Homem já há dezenas de milhares de anos. Os nossos ancestrais mais remotos aperceberam-se da capacidade que alguns pigmentos (resultantes de sangue de animais, por exemplo) tinham em se aderir às paredes das grutas resultantes. Aristóteles fascinava-se com a aptidão dos guecos em se manterem numa superfície vertical, Galileu e Newton que mostravam um grande interesse pelas forças de adesão que se podem observar em certas superfícies de contacto íntimo [12].

A ligação adesiva foi uma das primeiras técnicas a ser utilizada pelo homem de forma a proceder à ligação de peças diferentes. A utilização desta técnica já com um certo grau de sofisticação remonta ao tempo dos egípcios, quinze séculos a.C., onde já eram

empregues colas (adesivos) à base de gelatina, albumina, ovo, grude, bálsamos e resinas extraídas de diferentes árvores, sendo mais conhecida a utilização de *gum arabic*, extraída da Acácia [13].

No início do século XX surgiram novos avanços tecnológicos com a introdução da borracha e dos adesivos sintéticos. Durante a primeira guerra mundial, recorreu-se a um derivado do leite de forma a produzir cola de caseína, considerado um material polimérico natural. Estes adesivos funcionavam bem exceto quando eram submetidos a ambientes específicos, tais como os húmidos. Quando isto acontecia, soltavam odores desagradáveis devido à absorção de água, embora esta fosse uma forma de detetar quando os mesmos se estavam a deteriorar, podendo ser realizado um controlo da ligação [14].

Foi por volta do século XX que o uso de adesivos começou a tomar grandes proporções, já que a sua produção se expandia por todo o mundo, sobretudo devido à evolução da indústria aeronáutica. Uma vez que a mesma conseguiu eliminar algumas falhas dos meios de fixação mecânicos existentes, mostrou ser um método economicamente viável e capaz de formar uma união fiável entre vários tipos de materiais [14].

A partir de 1925, os adesivos sintéticos começaram a ser desenvolvidos industrialmente, uma vez que foram obtidos resultados prometedores com adesivos fenólicos, impulsionando esta indústria no que toca à descoberta de novas soluções para as indústrias de construções mecânicas [13].

Por volta das décadas de 40 e 50 ocorreu um crescimento substancial no que toca ao desenvolvimento de adesivos estruturais e vedantes para a indústria aeronáutica militar. A durabilidade das juntas adesivas constituiu um problema até finais da década de 70, que foi o momento a partir do qual começaram a surgir novos métodos e técnicas de processamento de adesivos [4].

De forma muito resumida, na Tabela 1 estão presentes os principais avanços no desenvolvimento dos adesivos e vedantes.

Tabela 1 – Evolução dos adesivos [15]

Década aproximada de disponibilidade comercial	Adesivo/Vedante
Pré 1910	Colas a partir de ossos de animais
	Colas a partir de peixes
	Adesivos vegetais
1910	Fenol-formaldeído
	Colas de caseína
1920	Éster de celulose
	Resina alquídica
	Borracha ciclizada em adesivos

	Policloropreno (neopreno)
	Adesivos de soja
1930	Ureia-formaldeído Fitas sensíveis à pressão Filmes adesivo de resina fenólica Colas para madeira em acetato de polivinilo
1940	Nitrilo-fenólico Borracha clorada Melamina formaldeído Vinilo-fenólico Acrílico Poliuretanos
1950	Epóxidos Cianoacrilatos Anaeróbicos Ligas de epóxido
1960	Poliimadas <i>Polibenzimidazole</i> <i>Poliquinoxaline</i>
1970	Acrílico de segunda geração Acrílico sensível à pressão Poliuretanos estruturais
1980	Endurecedores para resinas termoendurecíveis Epóxidos à base de água Adesivos de contacto à base de água Termofusíveis deformáveis e em espuma
1990	Epóxido modificado com poliuretano Termofusíveis curáveis Sistemas de cura à base de luz e radiação UV
2000	Adesivos à base de água Redução de compostos orgânicos voláteis Adesivos de uma e duas partes sem solvente

2.2.2 Caracterização das juntas adesivas

O processo de criação de uma ligação adesiva implica um conhecimento prévio dos vários adesivos disponíveis e do ambiente de operação expectável. O adesivo selecionado deverá escoar corretamente pela superfície do substrato e mais tarde converter-se, após a cura, num sólido estrutural sem criar tensões internas na ligação, de forma a não comprometer o seu desempenho [4]. As ligações adesivas apresentam

grandes vantagens quando comparadas com os métodos mais tradicionais (soldadura, aparafusagem, rebitagem, entre outros), sendo que as principais causas para a sua utilização estão relacionadas com a facilidade de fabrico, o que implica maiores cadências de produção e, por isso, menores custos. Os adesivos apresentem uma boa resistência à fadiga e permitem a ligação de materiais dissimilares e de geometrias complexas. A película de adesivo entre os dois componentes que se pretendem unir, permite uma distribuição mais uniforme de tensões, tem uma ótima capacidade de absorção de choques e vibrações e faz igualmente papel de vedante na ligação [3].

Os pontos fracos das juntas adesivas incidem sobretudo na necessidade de haver uma preparação e limpeza prévia das superfícies a colar e na utilização de geometrias que minimizem a formação de tensões localizadas. Acresce também o cuidado em realizar uma manutenção minuciosa, uma vez que alguns adesivos podem sofrer alterações na sua constituição sob condições extremas (calor e humidade, por exemplo). Este procedimento é difícil de efetuar já que as ligações são permanentes na maioria dos casos.

Posto isto, podem-se definir as vantagens e desvantagens dos adesivos, de forma resumida, segundo a Tabela 2:

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens na utilização de adesivos [4]

Vantagens	Desvantagens
Existe uma maior área de distribuição de tensões	As superfícies devem ser cuidadosamente limpas
Providencia ótima resistência à fadiga	Podem ser necessários longos períodos de cura
Elimina vibrações e absorve choques	Temperatura de trabalho geralmente limitada a 350°F (177°C)
Minimiza ou previne corrosão galvânica entre metais dissimilares	Podem ser necessárias temperatura e pressão para o processo de cura
Permite ligar formas complexas e espessuras variáveis	Normalmente necessário controlo de processo rígido
Apresenta contornos/acabamentos suaves	Inspeção difícil da junta terminada
Apresenta um ótimo rácio resistência-peso	Tempo de vida útil determinado pelas condições ambientais
Veda as juntas	Considerações ambientais, de segurança e saúde importantes a ter em conta
Permite a ligação entre materiais similares ou diferentes	É necessário possuir um certo grau de experiência já que alguns adesivos necessitam de condições muito específicas para a sua aplicação
Geralmente mais barato que as ligações mecânicas	
Quando é necessário a aplicação de calor, o mesmo é demasiado baixo para afetar partes metálicas	

2.2.3 Aplicações comuns das juntas adesivas

Tal como foi referido no capítulo 2.1, as investigações bem sucedidas na área das ligações adesivas originaram uma revolução nas indústrias relacionadas com construções mecânicas, já que foi possível concluir que é economicamente viável utilizar adesivos em vez dos típicos métodos que recorrem a ligações mecânicas, tais como soldadura, brasagem, aparafusamento ou rebitagem [4].

Atualmente existem diversas aplicações relacionadas com adesivos que podem ser encontradas em muitos tipos de indústrias. A indústria aeronáutica foi um dos precursores desta tecnologia e cada vez mais recorre às ligações com adesivos uma vez que os compósitos também têm sido muito introduzidos em aviões [12]. As indústrias automóvel e ferroviária também têm recorrido a adesivos de forma a tornar os veículos mais leves [12]. Outros exemplos, residem na construção civil, sapatos e indústria eletrónica. Além disso, existem aplicações nas áreas de biologia e medicina, desenvolvendo-se processos baseados na adesão de células e adesão de proteínas em superfícies de forma a aferir a biocompatibilidade de materiais para próteses, órgãos artificiais e adesivos cirúrgicos [12].

2.2.3.1 Indústria aeronáutica

Como já foi referido, a indústria aeronáutica foi pioneira na utilização de adesivos, iniciando-se entre 1910 e 1920 para ligar placas de madeira e mais tarde na segunda Guerra Mundial, para unir componentes de alumínio e compósitos na década de 80 [12]. Muitas vezes eram utilizados rebites para efetuar as ligações na estrutura do avião, contudo, de forma a manter a integridade da mesma, era necessário utilizar um número muito elevado de rebites. Esta forma de ligação acabava por causar um aumento da massa do avião, para além dos restantes pontos negativos mencionados no capítulo 2.1.2.

A utilização de adesivos permitiu ligar os diversos tipos de materiais (Figura 3) utilizados na construção de aviões (vidro, metal, cerâmica, madeira, plástico), originando uma redução substancial da massa da estrutura, mantendo ou melhorando a sua resistência [16].

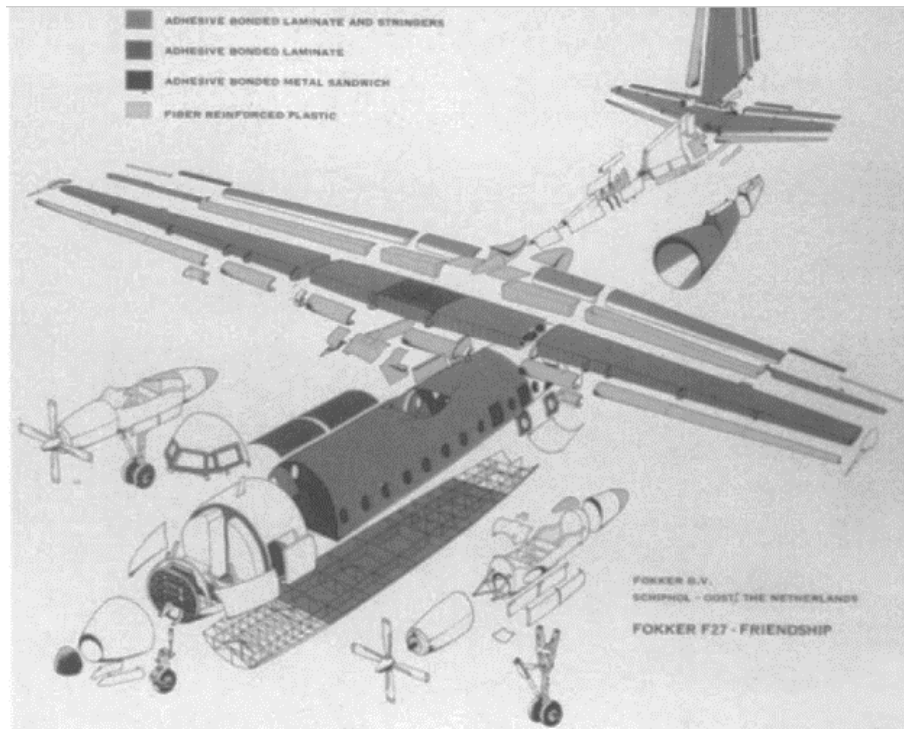


Figura 3 – Ligação de diversos componentes de materiais dissimilares, num Fokker Friendship F27, alterado de *Adhesives in Civil Engineering* [17]

2.2.3.2 Indústria automóvel

Na indústria automóvel, pretende-se sobretudo criar veículos com um bom rendimento energético. Um dos principais fatores que contribui diretamente para esta questão é o peso do automóvel: quanto menor for o peso, menores serão os consumos de combustível e, conseqüentemente, menores serão as emissões de poluentes para a atmosfera. Desta forma, a par de outras grandes indústrias, como a aeronáutica, naval e construção civil, por exemplo, assiste-se a um acréscimo na utilização de adesivos estruturais. De facto, as ligações adesivas revelam-se uma excelente ferramenta de ligação e fixação, permitindo reduzir a massa da estrutura em questão sem comprometer a sua resistência.

Nos automóveis, a utilização de ligações adesivas iniciou-se há décadas, com a colagem do para-brisas e vidros traseiros. Mais tarde começaram-se a utilizar adesivos para preencher vazios/lacunas e posteriormente aplicados de forma a melhorar a rigidez à torção da estrutura dos veículos. Observou-se que houve uma melhoria em relação à resistência à corrosão.

Nos anos 90 começaram a ser utilizados adesivos com grande capacidade de absorção de energia, ideais em caso de acidente. Após esta constatação passaram a ser utilizados como elementos estruturais da carroçaria (Figura 4).

Hoje em dia os adesivos são indispensáveis na construção de veículos devido à sua capacidade de ligar uma grande variedade de materiais [18].

Os principais adesivos estruturais utilizados na indústria automóvel são os poliuretanos, poliuretanos híbridos, epóxicos, epóxicos híbridos, fenólicos, fenólicos híbridos e poliimidas. Com estes, é possível fixar os diversos componentes do automóvel, garantir a impermeabilização e isolamento, amortecer vibrações e, com isso, aumentar a resistência à fadiga e melhorar o projeto em termos de acabamento estético [18, 19].

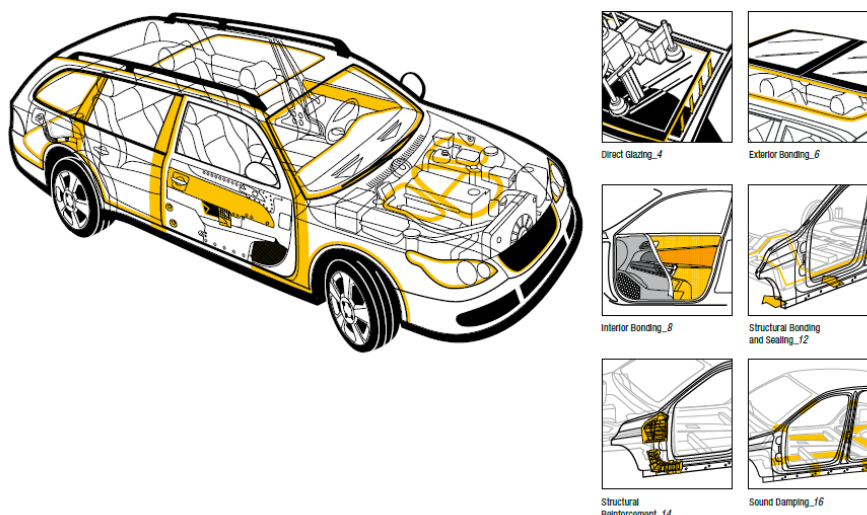


Figura 4 – Diferentes locais de aplicação de adesivos estruturais em veículos ligeiros de passageiros [20]

2.2.3.3 Construção civil

A área de engenharia civil e edificações compõe um dos maiores mercados de adesivos e selantes em toneladas, mas também em capital monetário pois estão envolvidas grandes superfícies de contacto e juntas [21]. Apesar do setor embalagens deter a maior parte do mercado de adesivos e selantes no mundo (28%), as áreas de engenharia civil e transporte seguem-se em segundo lugar com uma percentagem no mercado de 17%. Contudo, dados de mercado apontam que a construção civil é o sector com o crescimento mais acelerado [22].

Na construção civil sempre se procedeu à colagem e vedação recorrendo a cimento, gesso ou adesivos naturais para utilização em ladrilhos e azulejos de cerâmica, construção de paredes e peças de decoração. Após a Segunda Guerra Mundial, foram desenvolvidos novos materiais para construção, baseados em polímeros sintéticos. Até hoje, esses materiais evoluíram e originaram-se novas técnicas de pré-fabricação, proporcionando uma construção e montagem mais acelerada por meio de componentes pré-fabricados como painéis, coberturas e divisórias [21, 23].

Neste tipo de indústria, os adesivos têm uma grande utilização no interior de edifícios, sobretudo com propósitos decorativos tais como azulejos e mosaicos no chão e paredes,

revestimentos flexíveis para portas e janelas, revestimento térmico, entre outros. Para aplicações exteriores, a utilização de adesivos estruturais é um pouco menor, contudo as exigências que os mesmos devem cumprir são superiores. Alguns exemplos incluem [17]:

- Coberturas flexíveis;
- Ancoragem resinosa para parafusos, condutas de serviço, nós/uniões, etc.;
- União de painéis internos;
- Painéis em *sandwich* estrutural e painéis de revestimento;
- Fabricação de molduras para janelas em alumínio anodizado;
- Consolidação e ligação de elementos de madeira;
- Ligações aço/madeira em vigas no solo e telhado;
- Silicones estruturais para colar vidro;
- Juntas entre unidades pré-moldadas de betão;
- Fabricação de formas especiais para betão ou cerâmica, como telhas ou blocos para construção civil;
- Ligação entre metais e plásticos;
- Reforço de estruturas de betão com placas de aço (Figura 5).

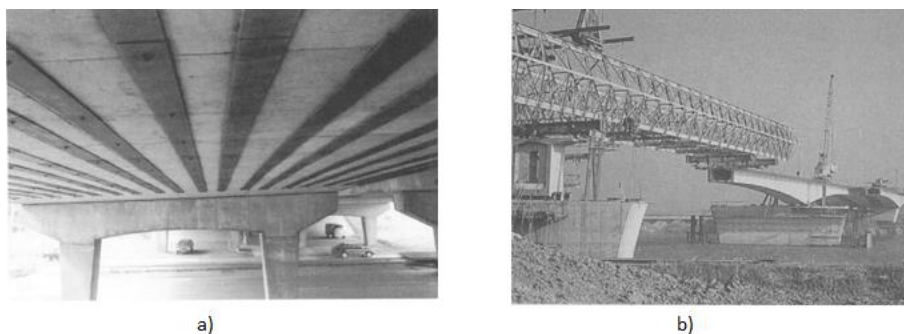


Figura 5 – a) Reforço da estrutura de uma ponte com placas de aço [17]; b) Construção de uma ponte por segmentos, tirando-se vantagem do endurecimento à temperatura ambiente dos adesivos de epóxico [24]

2.2.3.4 Indústria naval

Na indústria naval existe igualmente a aplicação de adesivos estruturais. Desde há muitos anos que são usadas resinas de caseína e formaldeído como adesivos na construção de barcos de madeira. Após a introdução das resinas de poliéster na indústria marítima, em 1950, a *Scott-Bader Company* construiu o primeiro navio em fibra de vidro reforçado com resina de poliéster. Eventualmente, o intenso desenvolvimento tecnológico levou muitos produtores a construírem navios em fibra de vidro reforçado com o que resultou numa diminuição da produção de barcos em madeira. Como mostra a Figura 6, os adesivos são utilizados na fabricação de painéis em *sandwich* e ligações de diversos componentes do barco/navio [17].

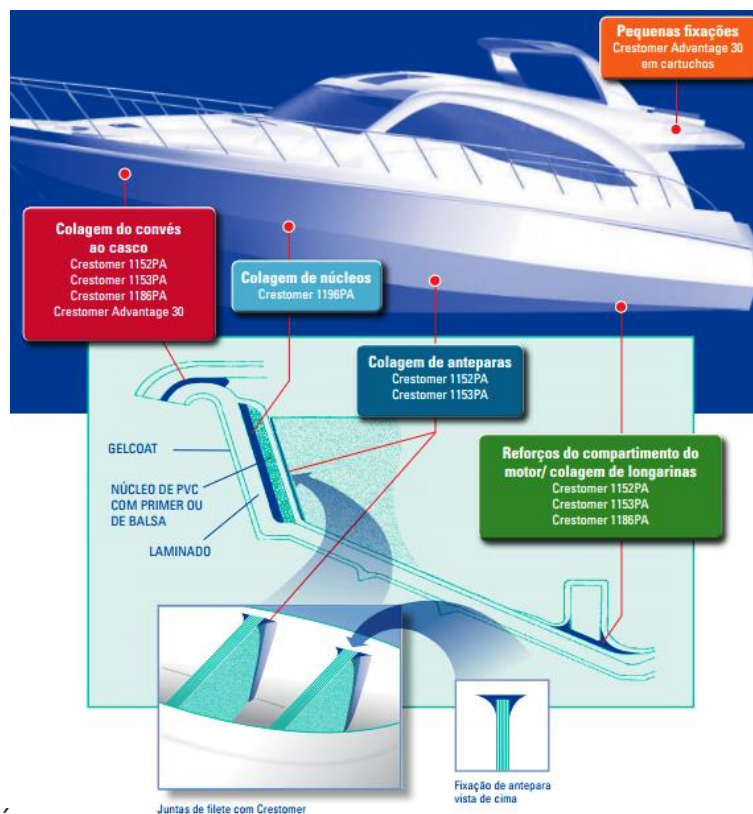


Figura 6 – Esquema representativo das diversas aplicações de adesivos estruturais num barco em polímero reforçado com fibra de vidro (alterado de [25])

2.2.3.5 Indústria eletrónica

Estima-se que mais de 50.000 tipos de adesivos diferentes eletricamente condutores, ou não, estão em circulação nesta indústria. O surgimento de adesivos teve uma grande importância na indústria eletrónica devido à possibilidade de implementação dos mesmos em sistemas eletro-termo-mecânicos, de forma a manter a sua performance e providenciar proteção às ligações elétricas. Desta forma, várias pesquisas foram recentemente realizadas de forma a ultrapassar os problemas inerentes na utilização de adesivos em componentes eletrónicos.

As ligações adesivas em componentes eletrónicos permitem a utilização de substratos económicos, processos automáticos de aplicação rápidos de extrema precisão, contribuindo para uma miniaturização dos componentes, alta integridade e posicionamento dos mesmos [26].

Na indústria eletrónica os adesivos estruturais são muito utilizados na ligação de *chips* a placas, processo denominado de *die-attach* (Figura 7). Nesta área também é muito comum a aplicação de adesivos em placas com circuitos impressos (PCI). As PCI mais comuns são compostas por uma camada de fibra reforçada com material dielétrico, alternada com uma camada de circuitos, unidas entre elas por adesivos. Na superfície

destas placas, são montados componentes eletrônicos sobre os circuitos impressos (Figura 7), recorrendo à aplicação de pequenas gotas de adesivo.

Além desta técnica, na indústria eletrônica existe a de *flip chip*, que consiste na conexão direta de diferentes tipos de componentes eletrônicos através de um condutor de solda, aplicados em dispositivos como telemóveis, cartões inteligentes e componentes automóveis [27].

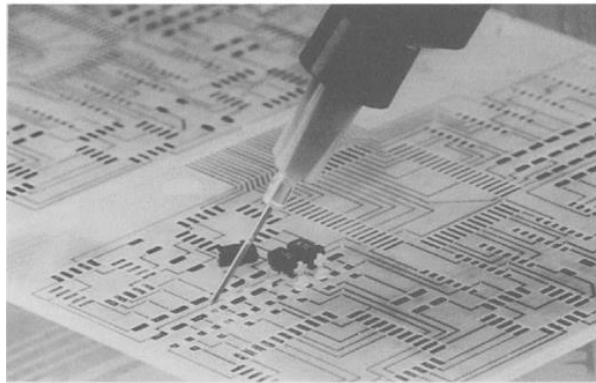


Figura 7 – Utilização de um adesivo acrílico, com capacidade de endurecer à temperatura ambiente, para ligar *chips* em circuitos impressos em placas [24]

2.2.3.6 Indústria do calçado

Desde 1950 têm sido utilizados adesivos na produção de calçado (Figura 8) como alternativa à costura ou aplicação de pregos ou agrafos para a ligação da sola à parte superior do sapato. A introdução deste tipo de tecnologia nesta indústria conferiu muitas vantagens, na medida em passou a ser possível obter juntas mais flexíveis e homogêneas, uma distribuição de tensões mais uniforme por toda a área de ligação, melhor aspeto estético e fabrico mais fácil. O maior inconveniente reside no facto de existir a necessidade de haver um grande controlo em todos os passos envolvidos na formação das juntas de forma a evitar problemas de adesão.

Dependendo do tipo de calçado, o tipo de comportamento do adesivo requerido difere. Muitas vezes, em calçado casual ou de lazer o aspeto estético possui uma importância elevada e por isso abdica-se muitas vezes da resistência mecânica, resultando numa durabilidade reduzida (cerca de cinco anos). Por outro lado, sapatos desportivos são expostos a condições mais agressivas. Portanto requerem uma boa resistência das ligações adesivas, bem como uma massa reduzida, bom comportamento aquando sujeitos a impacto e esforços de flexão, conforto e durabilidade [26].

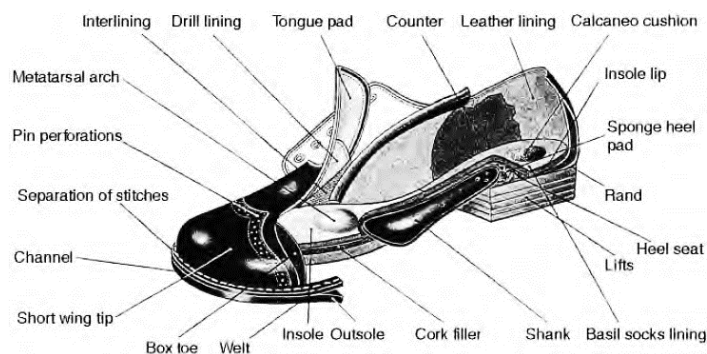


Figura 8 – Esquema indicativo dos diversos componentes de um sapato sujeitos a ligação adesiva [26]

2.2.4 Tipos de esforços em juntas adesivas

No projeto de juntas adesivas, é essencial que as mesmas sejam concebidas de modo a que os esforços sejam dirigidos ao longo das direções onde o adesivo apresenta maior resistência [28]. O projeto de uma junta adesiva tem como objetivo conhecer quais as tensões envolvidas na mesma e o modo de como influencia o seu comportamento [29].

Numa junta adesiva existem distribuições de tensões uniformes e não uniformes. Na maioria das vezes só é possível observar uma distribuição de tensões não uniformes devido a certos pontos existentes na área de sobreposição que produzem picos de tensões que ultrapassam a tensão média de rotura da junta. Estas concentrações de tensões são muitas vezes inesperadas e cabe ao engenheiro de projeto tentar minimizar ou contornar este obstáculo [30].

Existem 5 tipos de esforços: tração, compressão, corte, arrancamento e clivagem (Figura 9). É também possível encontrar, em aplicações reais, combinações de esforços numa junta adesiva.

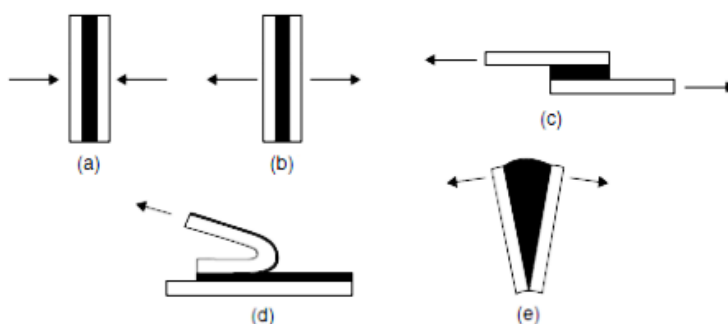


Figura 9 – Esforços típicos numa junta adesiva: a) compressão; b) tração; c) corte; d) arrancamento; e) clivagem [30]

2.2.4.1 Tração

Este tipo de esforço dá-se quando é aplicada uma força que separa os dois substratos, de forma perpendicular aos mesmos, resultando em tensões normais distribuídas

uniformemente ao longo de toda a área de ligação. Durante a tração, o adesivo sofre picos de tensão nas suas extremidades, fazendo com que as mesmas sejam mais propícias ao início de dano. O surgimento de uma pequena fenda pode originar uma propagação da mesma por toda a área de ligação e, conseqüentemente, a rutura da ligação adesiva, daí a necessidade de um bom estudo da mesma. No entanto, na prática, é impossível manter uma espessura perfeitamente constante do adesivo de forma a que a distribuição de tensões seja uniforme, ou que permita a axialidade de cargas, originando esforços de clivagem ou de arrancamento indesejáveis (Figura 10). Além disso, é necessário que os substratos possuam uma rigidez tal que permitam a distribuição dos esforços de forma equilibrada por toda a área de sobreposição [4, 30].

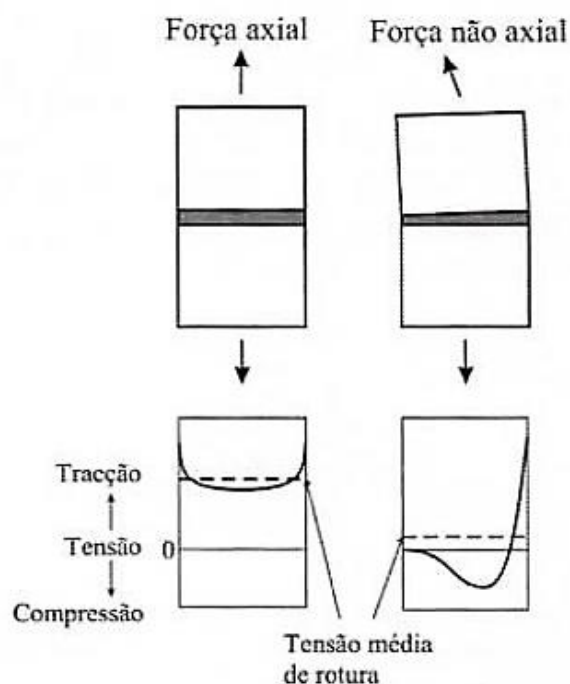


Figura 10 – Diferença na distribuição de tensões causada pela não axialidade da carga aplicada [29]

2.2.4.2 Compressão

Tal como os esforços de tração, para os de compressão é importante manter as cargas externas alinhadas de forma perpendicular aos substratos, mas no sentido oposto (Figura 11). É pouco provável que ocorra rutura numa ligação adesiva quando sujeita a uma carga de compressão, contudo o adesivo pode romper devido a picos de tensão gerados na área de ligação. Na verdade, qualquer junta que esteja à compressão “pura” não necessita de adesivo. Partindo do princípio que a carga seja elevada o suficiente, não haverá movimento relativo de ambos os substratos [4, 30].

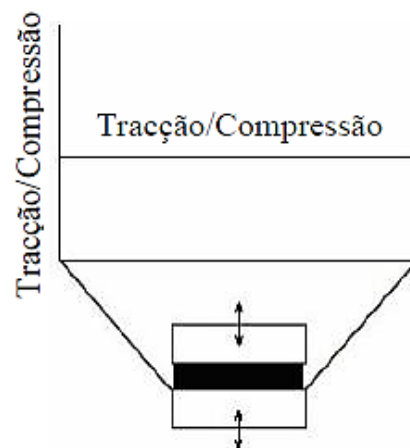


Figura 11 – Distribuição de tensões numa junta adesiva sujeita a esforços de compressão/tração [7]

2.2.4.3 Corte

Os esforços de corte dão-se quando existe um carregamento que provoca o escorregamento entre os dois aderentes. Toda a área de sobreposição está a contribuir para a distribuição de tensões e os substratos mantêm-se facilmente alinhados. Devido a estas razões os adesivos funcionam melhor quando estão sob esforços de corte [4].

A Figura 12 mostra a distribuição típica de tensões quando uma JSS está sujeita a este tipo de esforços. Pode-se observar que as extremidades estão sujeitas a tensões muito mais elevadas do que o centro da área da ligação. 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 uma extremidade à outra da sobreposição – modelo analítico de Volkersen [31]. Desta forma, o aumento do comprimento de sobreposição provoca um aumento da resistência da junta, mas a uma taxa decrescente (Figura 13), devido ao efeito acentuado de deformação dos aderentes [7].

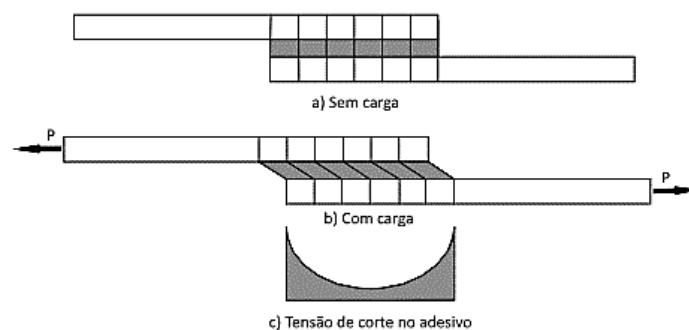


Figura 12 – Distribuição da tensão numa JSS sujeita a esforços de corte, segundo o modelo analítico de Volkersen [31]

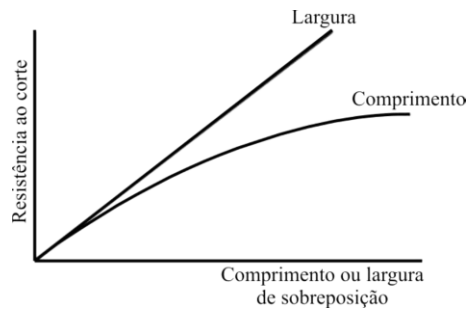


Figura 13 – Efeito do comprimento e da largura de sobreposição [7]

2.2.4.4 Clivagem e arrancamento

Os esforços de clivagem e arrancamento são aqueles que se devem evitar numa junta adesiva. A clivagem ocorre quando se geram tensões originadas por forças de tração aplicadas nas extremidades de uma ligação rígida adesiva, de forma a separar os dois aderentes. O esforço de arrancamento é similar ao de clivagem com a diferença de que pelo menos um dos aderentes envolvidos na ligação é flexível e se pode deformar plasticamente sob a ação das forças aplicadas, resultando num ângulo de separação dos substratos superior ao caso da clivagem (Figura 14).

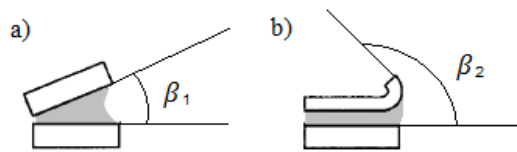


Figura 14 – Ângulo de separação dos aderentes em: a) clivagem; b) arrancamento [30]

As juntas adesivas que estejam sobre a ação de esforços de clivagem ou arrancamento apresentam menor resistência que as juntas sujeitas a esforços de corte, uma vez que existe uma concentração de tensões numa área reduzida. Toda a tensão gera-se na extremidade onde está a ocorrer a separação dos aderentes.

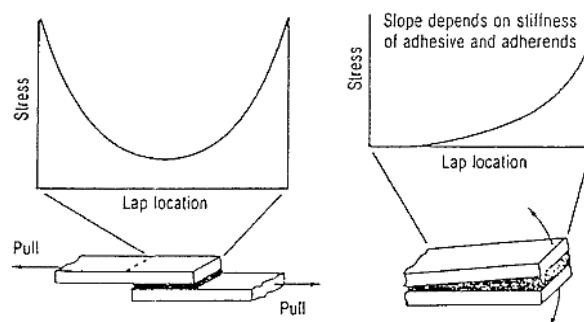


Figura 15 – Distribuição de tensões numa junta adesiva sob esforço de corte (à esquerda) e esforço de clivagem (à direita) [4]

Com o desenvolvimento dos modelos analíticos observou-se que geralmente existe combinação de esforços, nomeadamente a existência de um momento fletor que

provoca a deformação dos substratos. O mesmo surge devido à não linearidade dos substratos e das forças aplicadas, originando de arrancamento (Figura 16). Os primeiros a notarem este fenómeno foram Goland e Reissner [29].

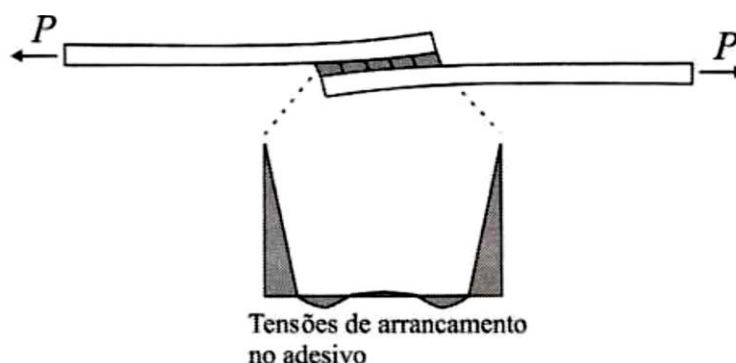


Figura 16 – Representação esquemática de tensões de arrancamento numa JSS [29]

De forma a corrigir a flexão dos substratos, compreende-se que a utilização de juntas de sobreposição dupla sejam as mais favoráveis quando existe este tipo de esforços envolvidos. Com esta solução verifica-se a simetria de esforços e diminuição drástica da flexão, fazendo com que o adesivo fique sujeito fundamentalmente a esforços de corte.

A ductilidade e a rigidez do adesivo afetam significativamente a sensibilidade da junta a esforços de clivagem ou arrancamento. Os adesivos rígidos e frágeis são particularmente sensíveis a este tipo de esforços já que o dano no adesivo inicia-se nas extremidades da ligação para deformações muito reduzidas no mesmo. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis permitem uma plastificação do adesivo nestas regiões e transferência de esforços para a zona interior do adesivo, conduzindo a uma maior resistência da junta (Figura 17) [7].

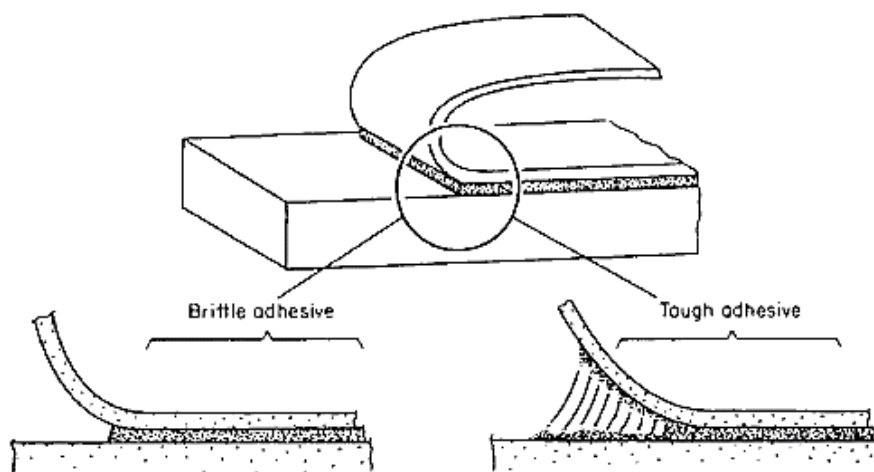


Figura 17 – Comportamento de um adesivo rígido (à esquerda) e flexível (à direita) aquando sujeitos a esforços de arrancamento [4]

Segundo Petrie [4], um adesivo epóxico comum, consegue suportar tensões de corte (τ_{xy}) superiores a 14 MPa, contudo, quando solicitados a esforços de clivagem/arrancamento, a resistência máxima que suportam ronda os 0,35 N/mm. Os adesivos mais flexíveis formulados especificamente para resistir a este tipo de esforços permitem suportar valores de resistência entre 4,38 N/mm a 8,76 N/mm [4, 30].

2.2.5 Modos de rotura possíveis de ocorrer em juntas adesivas

Quando uma junta adesiva é sujeita a um determinado tipo de esforço aplicado, requer-se que a mesma transmita os esforços entre os dois substratos ligados, de forma a manter a integridade da estrutura. Para verificar o funcionamento dos adesivos recorre-se frequentemente a ensaios destrutivos (como por exemplo o ensaio de tração de provetes de JSS). De um modo geral, existem quatro tipos principais de rutura (ver Figura 18): coesiva, adesiva, mista e pelo substrato [7].

2.2.5.1 Rotura coesiva

Ocorre quando a resistência da ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte que a resistência interna do próprio adesivo. É possível observar que, quando isto acontece, ambas as superfícies do substrato apresentam uma película de adesivo [7].

2.2.5.2 Rotura adesiva

Este tipo de rotura ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Após ocorrer rutura verifica-se que a superfície de um substrato apresenta resíduos de adesivo enquanto a superfície do outro está ausente dos mesmos. Isto resulta muitas vezes de uma má preparação/limpeza das superfícies dos substratos. Contudo, alguns trabalhos feitos mais recentemente [32-35] mostram que existem variações de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo e que os valores máximos ocorrem junto da interface.

Por vezes, algumas roturas são designadas de coesivas pois aparentemente o parecem, contudo, após uma inspeção mais rigorosa pode-se verificar a presença de uma película fina de adesivo. Por este motivo, muitos autores preferem o termo “rotura aparente na adesão” [7].

2.2.5.3 Rotura mista

Consiste na combinação de rotura adesiva com coesiva, devendo-se sobretudo à limpeza deficiente de uma dada região da superfície do substrato, ou então por defeito do próprio adesivo (prazo de validade ultrapassado, impurezas, etc.) [7].

2.2.5.4 Rotura pelo substrato

Este tipo de rutura sucede quando a resistência interna do aderente é inferior à do adesivo, tanto no seu interior como na interface. Esta rutura também é designada de rutura coesiva do aderente ou substrato.

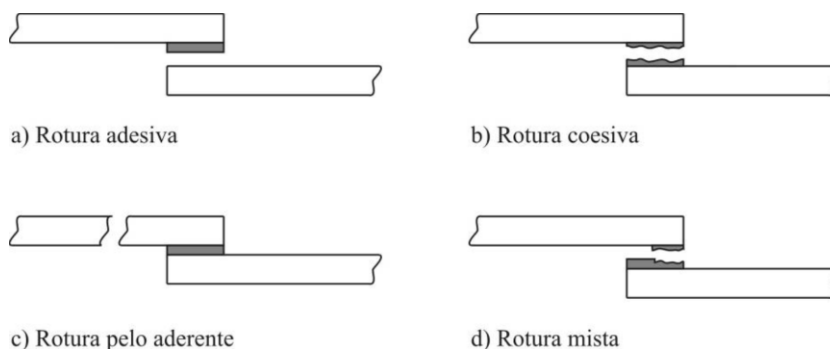


Figura 18 – Modos de rutura em juntas adesivas [7]

2.2.6 Classificação dos adesivos

Existem diversos tipos de adesivos, portanto, quando se pretende conceber uma ligação adesiva é necessário saber qual o mais apropriado a utilizar. Para tal, existem vários critérios através dos quais o engenheiro se pode orientar.

Os adesivos podem-se classificar de várias maneiras e, dependendo da aplicação pretendida e dos pré-requisitos, é possível seleccionar qual o adesivo mais adequado. Os adesivos podem-se classificar segundo a sua origem, segundo o seu processo de endurecimento, segundo a sua durabilidade, em função do material a colar ou segundo o seu modo de apresentação. Para além destes, existem outros dois critérios de extrema importância: a classificação segundo o seu desempenho (capítulo 2.2.7) e classificação segundo a sua estrutura molecular.

Relativamente a este último critério mencionado, os adesivos separam-se em três grupos distintos, relacionados com as propriedades intrínsecas à estrutura molecular do material:

- Resinas termoplásticas: acrílicas, celulósicas, vinílicas, poliamidas, etc.;
- Resinas termoendurecíveis: fenólicas, epóxido, poliéster, poliimida, etc.;
- Elastómeros: poliuretanos, nitrilos, policloroprenos, silicones, etc..

Nesta classificação, as resinas termoplásticas apresentam-se como polímeros lineares ou ramificados que podem ser fundidos através da aplicação de calor. Como tal podem ser moldados várias vezes usando técnicas convencionais, permitindo uma fácil deposição de adesivo nas juntas a serem unidas. Estas resinas podem ser subdivididas em dois grupos distintos: materiais cristalinos, que cristalizam ao arrefecer e materiais amorfos, que não cristalizam ao arrefecer e são usados como polímeros vítreos. A

capacidade de cristalizar depende de fatores como o grau de ramificação, contudo as resinas termoplásticas são geralmente semi-cristalinas e não cristalizam completamente quando arrefecidas a partir do seu estado fundido.

As resinas termoendurecíveis são polímeros com muitos pontos de ligação entre cadeias de moléculas, ou seja, são muito reticuladas, o que faz que possuam uma grande rigidez após a sua polimerização. São constituídas por uma densa rede molecular e, quando sujeitas a calor excessivo, degradam-se em vez de fundirem.

No caso dos elastómeros, estes tanto podem ser materiais termoendurecíveis como termoplásticos, consoante a sua composição. Estes materiais podem ser tracionados sob a ação de forças elevadas e conseguem recuperar rapidamente as suas dimensões iniciais quando as ditas forças são retiradas. Esta propriedade característica dos elastómeros reside no facto de a sua estrutura molecular ser levemente reticulada, permitindo o deslizamento das moléculas umas em relação às outras quando o polímero é sujeito a deformações. Quando isto acontece, o fluxo de deslizamento permanente é impedido pela reticulação da rede e graças a esta ação as moléculas conseguem recuperar a sua posição inicial após a libertação da carga aplicada. Quando se efetua aquecimento excessivo, a presença de reticulantes nos elastómeros impossibilita a sua fusão, na verdade o que acontece é a degradação do material [7, 13].

Dentro destas três famílias de polímeros, verifica-se a existência de características específicas para cada uma e todas elas apresentam pontes fortes e fracas nas suas propriedades. De forma qualitativa, as três podem ser comparadas da forma apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais poliméricos. Adaptado de *Estudo do comportamento de adesivos estruturais* [13]

Material	Propriedades			
	Flexibilidade	Resistência Mecânica	Resistência Térmica	Resistência a Agentes Químicos
Resinas Termoendurecíveis	Má	Boa	Boa	Boa
Resinas Termoplásticas	Média	Medíocre	Medíocre	Boa
Elastómeros	Muito boa	Má	Variável	Medíocre

2.2.7 Adesivos estruturais

Tal como mencionado anteriormente, os adesivos têm vindo a ser utilizados por muitos séculos. Devido à evolução tecnológica, nos últimos 70 anos os adesivos sofreram muitas alterações e melhorias ao ponto de terem um papel fulcral em várias indústrias. A criação de polímeros com propriedades adequadas para permitir a sua adesão a vários tipos de superfície abriu portas a uma nova solução de ligação entre componentes e peças de materiais e geometrias dissimilares [12].

Segundo Petrie [4], um adesivo ou vedante deve apresentar as seguintes características:

- Devem-se comportar como um líquido na fase da formação da junta, de maneira a fluir e molhar (formar contacto íntimo com) os aderentes;
- Devem formar uma superfície de ligação através do fenómeno da adesão (desenvolvimento de forças intermoleculares);
- O adesivo/vedante deverá endurecer de forma a poder suportar cargas, ora contínuas, ora aleatórias, ao longo da sua vida útil;
- O adesivo/vedante deverá transferir e distribuir a carga pelos componentes ligados;
- Devem preencher espaços vazios, lacunas e cavidades;
- Devem ser compatíveis com os restantes elementos da ligação de forma a assegurar uma boa durabilidade do produto.

Desta forma, um adesivo pode ser definido como sendo um material que, quando aplicado nas superfícies de outros materiais, pode juntá-los e resistir à sua separação. A evolução tecnológica e industrial em que existe a necessidade de aplicação de adesivos fez surgir os adesivos estruturais. Estes têm de peculiar a capacidade de resistir a cargas substanciais, sendo responsável pela resistência e integridade da estrutura. Por exemplo, a resistência ao corte pode variar entre 5 MPa para um adesivo de poliuretano a 50 MPa para um adesivo de epóxico [12]. O adesivo estrutural admite-se como parte integrante da estrutura, com a capacidade de transferir as forças aplicadas à junta em condições de serviço, mantendo a ligação intacta sem ocorrência de falha, mesmo quando a mesma está sujeita a solicitações significativas por um longo período de tempo [7].

Os adesivos estruturais estão disponíveis quer como produtos industriais quer como produtos de consumo doméstico. Na Tabela 4 estão representados os principais adesivos estruturais e não estruturais existentes no mercado.

Tabela 4 – Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho [7]

Adesivos estruturais		Adesivos não estruturais	
Fenólicos	Fenólicos-vinílicos	Borrachas sintéticas	Silicone
	Fenólico-nitrilo		Policloropreno e nitrilo
	Fenólicos-policloropreno		Polisulfureto
Acrílicos	Anaeróbicos	Poliésteres	
	Cianoacrilatos		
Poliuretano		Termofusíveis inorgânicos	
Poliimida		Colas de contacto	Cloropreno Nitrilo
Epóxico	Epóxico-poliamida		
	Epóxico-polisulfureto		
	Epóxico-fenólicos		
	Epóxico-poliuretano		
	Epóxico-nitrilo		
	Epóxico-vinilo		
	Epóxico-Nylon		
	Epóxico-polisulfido		

2.2.7.1 Adesivos epóxidos

Os adesivos de epóxico são classificados como termoendurecíveis (ou termofixos), apresentam uma ótima resistência mecânica, química e um módulo de elasticidade elevado quando comparado aos termoplásticos.

Estes adesivos permitem uma grande versatilidade na sua formulação uma vez que existem diversas resinas e endurecedores. Um caso particular está na utilização de endurecedores de poliamida para a obtenção de um bom comportamento para

temperaturas na ordem dos -200°C . Estão disponíveis numa grande variedade de formas, que vão desde adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes. São ativados através da aplicação de calor, catalisadores ou combinação de ambos.

Os adesivos epóxicos são comercializados sob a forma de dois componentes (resina e endurecedor separado) ou apenas um componente (resina e endurecedor juntos): na primeira situação, o adesivo necessita de uma temperatura mínima de 5°C para que ocorra cura, no segundo caso a temperatura requerida deverá ser superior a 120°C [7, 13, 19]. Para o sistema de dois componentes, geralmente um aumento de temperatura na ordem dos 10°C duplica a velocidade da reação. O tempo necessário para terminar o processo de cura à temperatura ambiente varia entre 10 minutos a vários dias. É importante garantir as quantidades exatas de resina e endurecedor e uma mistura adequada entre os componentes pois, sem isto, não se formará o polímero corretamente, comprometendo as suas propriedades [7]. Por esta razão é que, geralmente, os adesivos epóxicos de um só componente apresentam resistência mecânica e durabilidade superiores, quando comparados aos de dois componentes, já que a relação entre a resina e endurecedor é garantida e a sua mistura é feita no interior do dispositivo que permite aplicar o respetivo adesivo [13].

Existem também os filmes de epóxido que surgiram como resposta à necessidade de unir as folhas metálicas aos “ninhos de abelha” (*honeycomb*) das estruturas em sanduíche de algumas partes de transportes aéreos.

O processo de cura dos adesivos epóxicos não necessita de aplicação de pressão, bastando um simples posicionamento dos componentes a serem colados. As suas propriedades podem ser modificadas pela adição de outras resinas: poliamida, polisulfido, fenólico, etc.) ou por um elastómero (poliuretano ou nitrilo) [7].

Os principais tipos de adesivos de epóxido são os seguintes:

- **Epóxido-Fenólico;**
- **Epóxido-Polisulfido;**
- **Epóxido-Poliamida;**
- **Epóxido-Nitrilo;**
- **Epóxido-poliuretano.**

2.2.7.2 Adesivos fenólicos

Estes adesivos são comercializados sob a forma de filme ou em solução, são quimicamente idênticos aos adesivos de resorcinol e o mecanismo de cura é o mesmo. A mesma é feita a uma temperatura mínima que ronda os 170°C , a pressões elevadas (300 kPa a 700 kPa) numa prensa a quente ou em autoclave, de forma a evitar o aparecimento de vazios na zona da colagem. Uma vez que este tipo de processamento

liberta voláteis, os adesivos fenólicos são frequentemente substituídos por adesivos epóxicos.

Inicialmente, este tipo de adesivos resumia-se à colagem de madeira, mais tarde passaram a ser utilizados em metais.

Os adesivos fenólicos, em geral, apresentam um baixo custo e possuem boa resistência mecânica e boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Como principais limitações, apontam-se a baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e vibrações, 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). Nestes adesivos fenólicos modificados o processo de cura efetua-se a quente e sob pressão [7].

Os principais adesivos fenólicos são os seguintes:

- **Fenólico-Vinílico;**
- **Fenólico-Policloropreno;**
- **Fenólico-Nitrílico.**

2.2.7.3 Adesivos acrílicos

O primeiro desenvolvimento de adesivo acrílico foi realizado na Alemanha Oriental, na década de sessenta, tendo como base o polimetacrilato de metila (PMMA). Antes deste desenvolvimento mencionado, os adesivos acrílicos tratavam-se na verdade de soluções dissolvidas em solvente específico. Estes adesivos eram utilizados na união de alumínio (portas e janelas). A partir de então, foram realizados vários estudos foram realizados, resultando nos sofisticados adesivos acrílicos existentes hoje no mercado [36].

Os adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados [7].

- **Anaeróbicos:** Também conhecidos por “Diesters Poliacrilatos”, são apresentados, normalmente, sob a forma de um líquido tixotrópico, de um só componente. Podem ser curados à temperatura ambiente e são de fácil utilização. O processo de endurecimento dá-se por uma reação de polimerização do tipo radical-livre, uma vez eliminado o oxigénio. O adesivo fora da junta normalmente não cura, uma vez que se encontra em contacto com o oxigénio, facilitando a sua remoção assim que seja possível manusear o conjunto. Possuem uma resistência mecânica variável, podendo aproximar-se da dos adesivos epóxicos, uma boa resistência a solventes e, em geral, a sua temperatura máxima de utilização situa-se próxima dos 150°C. Têm grande aplicação na ligação de peças com geometria cilíndrica, como a fixação de peças estriadas ou roscadas e na fixação de rolamentos. Aplicam-se igualmente na colagem de diversos materiais com o acetal, as poliolefinas, o nylon e o policloreto de vinilo (PVC) [7, 13].

- **Cianoacrilatos:** Trata-se de um adesivo instantâneo, que permite colagens muito rápidas. Apresentam-se sob a forma de líquidos monocomponentes sem solventes. Estes adesivos são conhecidos como “colas instantâneas”, “supercolas” ou, ainda, por “cola tudo”. O processo de cura destes adesivos é influenciado pela humidade, pelo teor em pH do meio e pela espessura da junta adesiva. A humidade e a presença de grupos aniónicos são os principais responsáveis pelo rápido processo de cura destes adesivos. Apresentam excelente resistência à tração, mas baixa resistência ao arrancamento, fragilidade e custo elevado. São adequados para colar pequenas partes de plásticos e borrachas [7, 13].
- **Acrílicos modificados:** Devido à sua rápida cura e alta resistência (20-35 MPa), os acrílicos modificados são usados em operações altamente automatizadas. Possuem uma boa resistência ao arrancamento, impacto e ao corte numa ampla gama de temperaturas. Apresentam também uma boa resistência à alta humidade. A modificação faz-se com a introdução de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo. Demonstrem baixa contração durante o processo de cura e permitem ligações fortes, toleram uma preparação mínima das superfícies e podem ser aplicados para unir uma grande variedade de materiais (especialmente os plásticos e metais). Como desvantagens citam-se a baixa resistência mecânica, resultante da exposição do adesivo a elevadas temperaturas, e elevada flamabilidade [7, 37].

2.2.7.4 Adesivos de poliuretano

Os adesivos de poliuretano apresentam resistências ao corte e à tração inferiores quando comparados aos outros adesivos. Por outro lado, distinguem-se pela boa resistência ao arrancamento, a produtos químicos e abrasão, boa resistência às vibrações e ao choque, bom comportamento a baixas temperaturas e boas características de adesão em superfícies metálicas. Resultam da reação de um polioli (ou poliéter-polioli) com um isocianato e apresentam-se geralmente sob a forma de dois componentes. São apresentados sob a forma de dois componentes, com um tempo de cura de aproximadamente 24h. Distinguem-se dos adesivos à base de borracha sintética pois são os únicos que possuem aplicações estruturais, com uma resistência ao corte na ordem de 20 MPa. Estes adesivos geralmente não recebem grande destaque porque são utilizados em aplicações de menor importância, mas ocupam a maior parte do mercado. São muito utilizados em juntas náuticas, juntas de dilatação em edifícios e sistemas de ventilação e ar condicionado [7, 13].

2.2.7.5 Adesivos de poliimida (Bismaleimidas)

Estes adesivos apresentam, à temperatura ambiente, resistências à tração e ao corte relativamente baixas, da ordem da dos adesivos de poliuretano. Desta forma são utilizados sobretudo em aplicações cujas temperaturas de serviço ultrapassam os 150°C,

em virtude de estes adesivos conservarem as suas propriedades sem grandes alterações até uma temperatura máxima de utilização da ordem de 300°C.

Estão disponíveis sob a forma de líquidos e filmes, mas são relativamente caros e difíceis de manusear. Requerem longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevada, pelo que a sua aplicação é complexa, sendo necessário aplicar temperaturas da ordem dos 200°C a 400°C. Além disso, possuem uma grande dureza e, conseqüentemente, alguma fragilidade, o que os torna sensíveis a choques e vibrações [7, 13].

2.2.8 Configurações possíveis de junta

Segundo Petrie [4], a ligação adesiva ideal é aquela em que o adesivo é solicitado a um esforço que esteja aplicado na direção em que o mesmo tenha maior resistência à rutura. Posto isto, a junta deverá ser concebida de forma a favorecer a distribuição de tensões pela mesma. Por vezes uma junta pode ser pouco prática de conceber, de fabrico dispendioso ou de difícil alinhamento e por isso o engenheiro deve pesar todos estes fatores de forma a otimizar a ligação adesiva. Na Figura 19 estão presentes as configurações de junta mais comuns, não obstante de existirem outras.

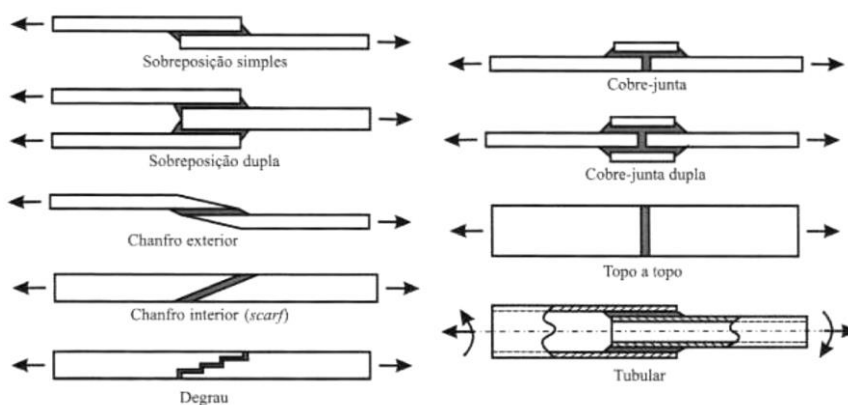


Figura 19 – Tipos de juntas mais comuns utilizadas em engenharia [7]

2.2.8.1 Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição são as mais usadas pois são as mais fáceis de conceber, aplicáveis em situações em que os aderentes são finos e a junta está sujeita a esforços de corte. Por outro lado, uma vez que os aderentes não estão no mesmo plano, é gerado um momento fletor que cria esforços de clivagem/arrancamento, que comprometem o funcionamento da ligação adesiva (ver Figura 20).

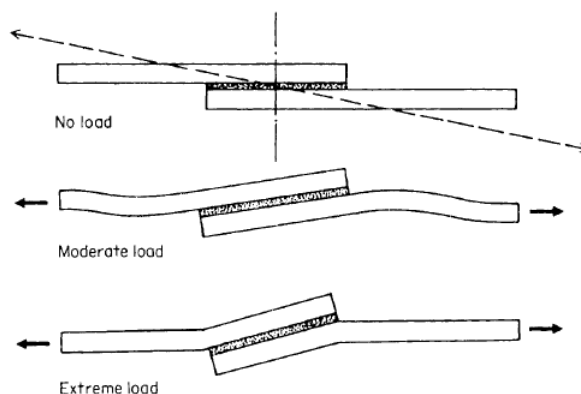


Figura 20 – Modo como uma JSS sobre esforços de flexão devido ao desalinhamento da força de corte, relativamente à carga aplicada [4]

Posto isto, surgiram algumas modificações neste tipo de juntas, originando diferentes configurações (ver Figura 21) [4]:

- Redesenho da junta de forma a alinhar a força aplicada relativamente aos aderentes;
- Alterar os aderentes para outros mais rígidos de forma a que não se deformem tanto devido à excentricidade da carga;
- Tornar as extremidades da área de adesivo mais flexíveis (por exemplo: arredondando as arestas do aderente).

Na Figura 21 estão ilustradas as várias configurações que uma junta de sobreposição pode apresentar. As juntas com ressalto, **d)**, **e)** e **f)**, permitem um alinhamento do esforço de corte, diminuindo ou eliminando a geração de momento fletor. O ressalto pode ser feito a partir da dobragem da chapa (substrato). As tiras utilizadas nas juntas **e)** e **f)** têm como função aumentar a área adesiva, aumentando a resistência da junta [4, 30].

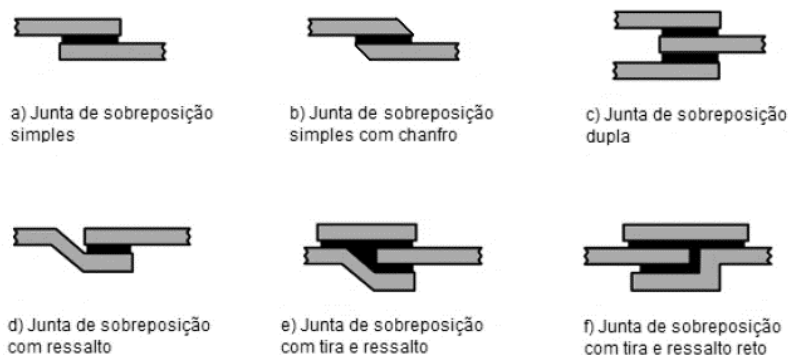


Figura 21 – Configurações possíveis de juntas de sobreposição [30]

A junta de sobreposição dupla, **c)**, apresenta um bom equilíbrio estrutural. A junta de sobreposição com chanfro, **b)**, também apresenta melhor comportamento que a típica

JSS uma vez que a criação do chanfro permite uma distribuição mais uniforme das tensões, reduzindo os esforços de clivagem/arrancamento [4, 30].

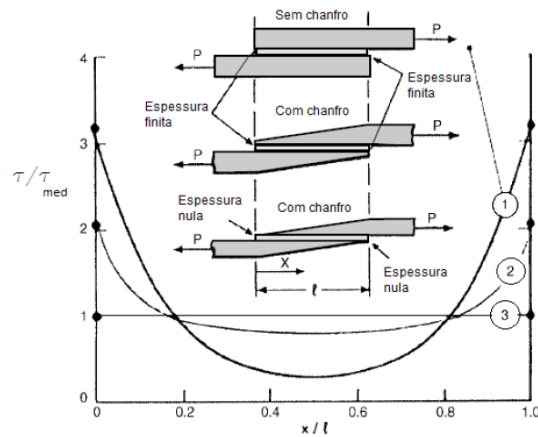


Figura 22 – Variação da distribuição das tensões de corte numa JSS: 1 – Sem chanfro, com uma espessura de adesivo finita; 2 – Com chanfro; 3 – Com chanfro e menor espessura de adesivo [4]

Na Figura 22 é possível observar que a aplicação de chanfros ou aligeiramento dos bordos numa junta de sobreposição simples permite uma distribuição de tensões de forma mais uniforme ao longo do comprimento de sobreposição, L_0 , reduzindo os picos de tensão nas extremidades da área de ligação e, desta forma, aumentando a capacidade de carga da junta (Figura 23). A elaboração de chanfros faz com que haja uma redução de material dos aderentes nessa zona o que, por sua vez, diminui a sua rigidez. Desta forma, há uma redução da rigidez à flexão dos aderentes, o que diminui os picos de tensão gerados nesses locais, nocivos à ligação adesiva [4, 30].

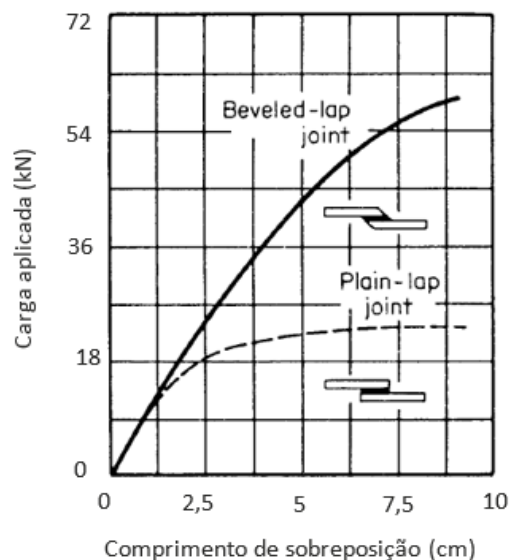


Figura 23 – Efeito da existência de chanfro numa JSS ao longo do comprimento de sobreposição, sob esforço de corte. Alterado de *Handbook of adhesives and Sealants* [4]

2.2.8.2 Juntas com tira

Este tipo de juntas é frequentemente utilizado de forma a manter a cargas de trabalho orientadas, quando a espessura dos aderentes é demasiado elevada. As várias configurações deste tipo de juntas estão representadas na Figura 24. Na sua forma mais simples, este tipo de junta apresenta-se sensível aos esforços de flexão, sofrendo clivagem com facilidade, tal como acontece nas JSS e nas juntas topo a topo simples.

Como alternativa, pode-se utilizar uma junta de tira dupla que, à semelhança das JSD, diminui o efeito de flexão. No entanto, para obter uma maior resistência aos esforços de flexão introduzidos na junta, as mais eficazes são as de tira dupla com duplo rebaixo, ou a junta de tira dupla com chanfro, sendo que estas requerem processos de maquinagem com os seus custos associados. Assim sendo, recorre-se a este tipo de solução apenas quando é mesmo necessário [4, 30].

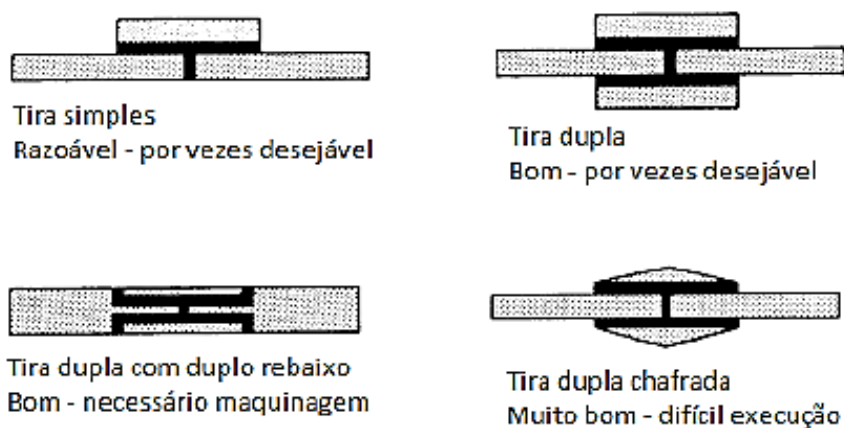


Figura 24 – Configurações possíveis de juntas com tira. Adaptado de *Handbook of adhesives and Sealants* [4]

2.2.8.3 Juntas topo a topo – Butt joint

As juntas topo a topo são de fabrico relativamente simples, contudo, são sensíveis a esforços de flexão, uma vez que este carregamento expõe o adesivo a esforços de clivagem. De forma a minimizar esse efeito, este tipo de junta apresenta várias vertentes, surgindo novas configurações que, além de permitirem uma diminuição da suscetibilidade aos esforços de clivagem devido à aplicação de carregamento lateral, são ideais em situações em que existe impossibilidade de conceber JSS devido à espessura elevada dos aderentes [4, 30].

A partir da Figura 25, pode-se ver que, as juntas **b)** e **c)** permitem um melhor alinhamento de forças relativamente à junta **a)**, uma vez que o chanfro atua no sentido de evitar o desalinhamento de forças no eixo da ligação adesiva. O chanfro pode ser executado com relativa facilidade por maquinagem. As juntas “macho-fêmea”, **d)** e **e)**, permitem um auto centramento dos substratos, para além de permitirem aplicar uma

maior quantidade de adesivo na ligação que, por sua vez aumenta a área adesiva, contribuindo para uma maior resistência da junta [30].

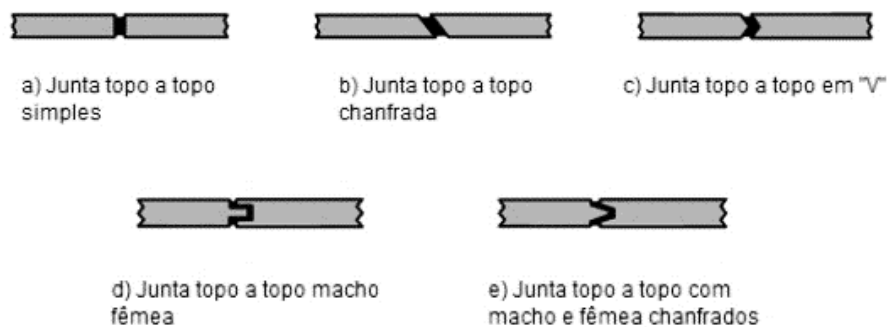


Figura 25 – Configurações possíveis de juntas topo a topo [30]

2.2.8.4 Juntas tubulares

Este tipo de juntas (Figura 26) é o mais adequado a utilizar quando se pretende fazer a ligação de varões ou tubos. As ligações tubulares substituem as ligações topo a topo devido à sua elevada resistência a esforços de flexão que, por sua vez. Além disso, há uma maior área de sobreposição [4].

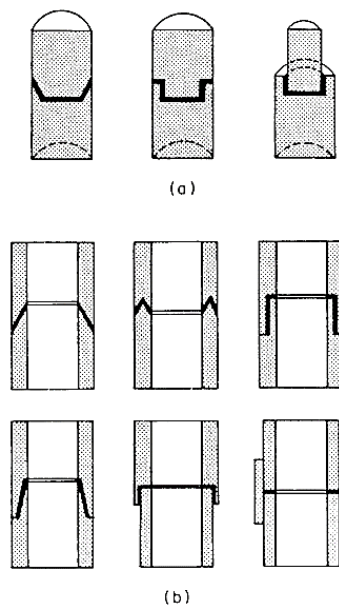


Figura 26 – Configurações possíveis para juntas tubulares: a) Ligações em varões; b) Ligações em tubos. Alterado de *Handbook of adhesives and Sealants* [4]

O tipo de cargas aplicadas neste tipo de ligação pode ser axial ou de torção. No caso de ser axial, existe uma maior concentração de tensões das extremidades da área de sobreposição, tal como acontece nas juntas de sobreposição simples. Se existir torção, dá-se apenas o efeito de deformação diferencial tal como sucede das juntas de

sobreposição simples ao corte. De forma a reduzir a concentração de tensões quando há presença de esforços axiais, utilizam-se chanfros nos tubos (Figura 27). Esta alteração permite obter uma maior área de ligação e, com isso, uma distribuição de tensões mais uniforme, para além de diminuir a suscetibilidade da ligação adesiva sofrer clivagem [12].

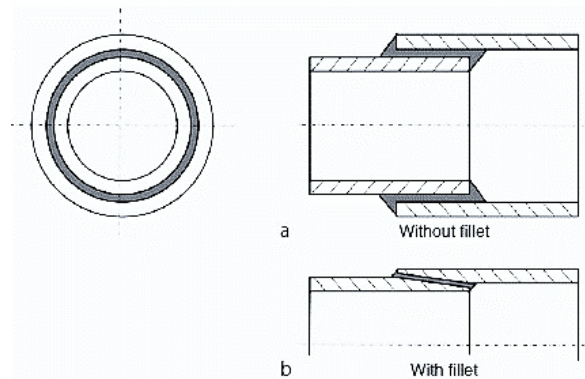


Figura 27 – Junta tubular com as extremidades dos substratos: a) Sem a presença de chanfro nos tubos; b) Com a presença de chanfros nos tubos t [12]

Apesar de a alteração geométrica ser uma boa solução relativamente ao desempenho da junta, existem desvantagens inerentes a esse processo. A necessidade de recorrer a processos de maquinagem encarece o fabrico da junta e a dificuldade em inspecionar o interior das ligações. Um outro inconveniente, reside no facto de que, uma vez que este tipo de ligação é interior, o processo de aplicação do adesivo torna-se mais difícil. Por vezes é necessário criar orifícios para libertar o ar que fica aprisionado de maneira a permitir que o adesivo preencha a cavidade da junta (Figura 28). É aconselhável utilizar espaçadores, como por exemplo fios, de forma a garantir uma espessura de adesivo o mais uniforme possível em torno de toda a área de colagem. No final da montagem da junta deve-se efetuar a rotação entre os substratos cilíndricos de modo a espalhar o adesivo e uniformizá-lo na junta [30].

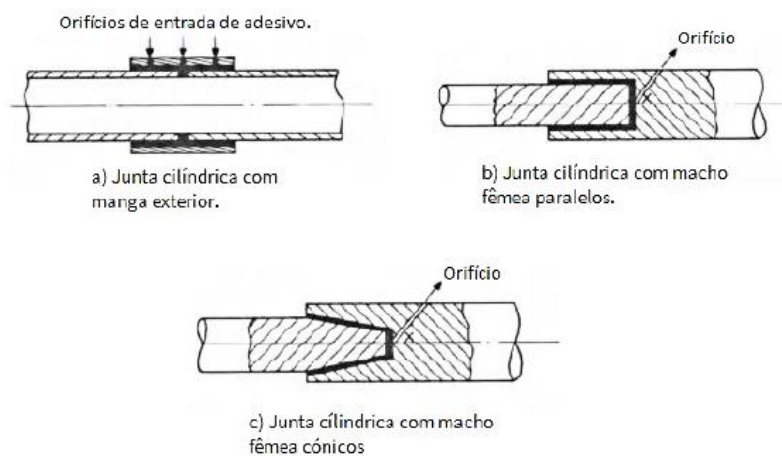
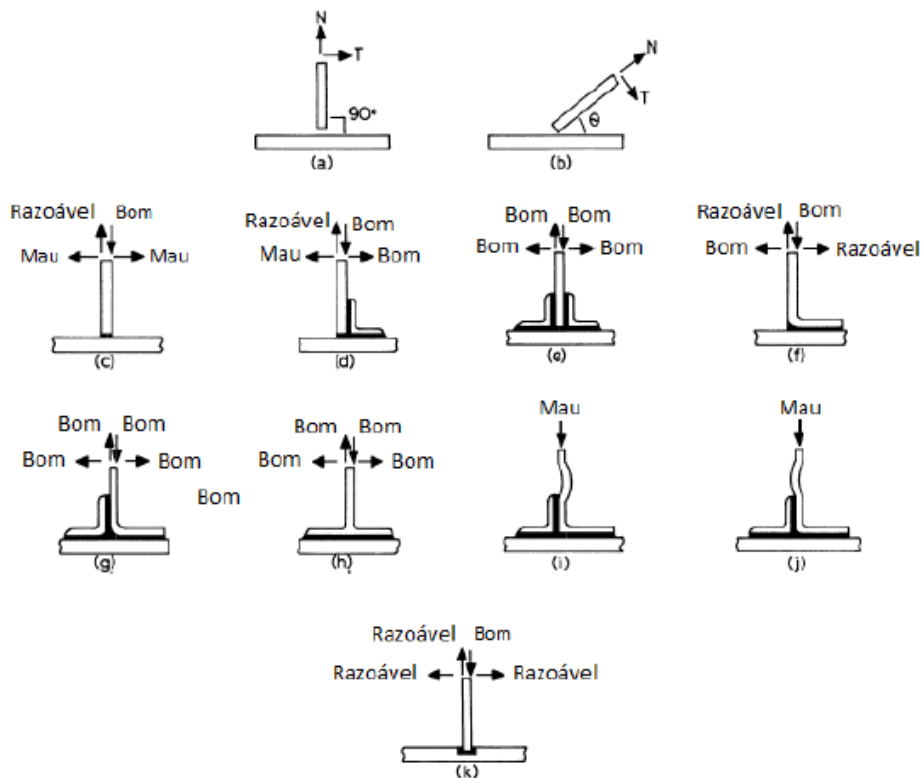


Figura 28 – Juntas tubulares com a existência de orifícios para permitir a libertação de ar [30]

2.2.8.5 Juntas em T

Neste tipo de juntas (Figura 29), geralmente os aderentes estão dispostos com orientação perpendicular ($\theta = 90^\circ$). Contudo é possível que algumas configurações apresentem um ângulo diferente deste. As cargas aplicadas podem ser aplicadas na direção normal (N) ou transversal (T) [12]. As primeiras são mais desfavoráveis à ligação adesiva já que a junta apresenta menos resistência a esforços de tração. Por outro lado, se o esforço for de compressão, dificilmente haverá rotura do adesivo. No entanto, poderá ocorrer encurvadura no substrato se este não apresentar a rigidez adequada. A encurvadura causada pela carga de compressão pode ter efeitos diferentes, por exemplo na Figura 29 **i**), o efeito de encurvadura dá-se pelo lado direito, sendo mais severo para a junta do que se fosse para o lado esquerdo (Figura 29 **j**)) já que favorece o arrancamento. Este problema causado pela encurvadura também pode ocorrer em juntas com a configuração indicada na Figura 29 **k**). Face a este inconveniente, desenvolveram-se juntas em T com as configurações indicadas na Figura 29 **e**), **f**), **g**) e **h**), que apesar de não serem infalíveis e implicarem gastos extra devido a processos de maquinagem necessários, permitem aumentar muito a resistência da junta adesiva [30].



2.2.8.6 Juntas de canto

Tal como nas juntas em T, nas juntas de canto existem carregamentos na direção normal (N) e transversal (T), sendo que a primeira costuma ser a menos desejável neste tipo de ligação, devido aos problemas indicados no capítulo relativo às juntas em T [12]. Na Figura 30 estão presentes várias configurações possíveis para uma junta de canto. A configuração **c)** é considerada geralmente a mais fraca, já que apresenta o pior desempenho em comparação com as restantes. A junta **d)** apresenta-se vulnerável quando é sujeita a um esforço transverso para a esquerda, já que o mesmo cria esforços de flexão e, por isso, arrancamento/clivagem. As restantes juntas (**f)**, **g)**, **h)**, **i)**, **j)** e **k)** são de difícil montagem uma vez que requerem processos de maquinagem, como dobragem, de forma a obter as geometrias indicadas.

Estas juntas de canto podem ser utilizadas em reservatórios cúbicos ou paralelepípedicos sujeitos a pressão interna. Neste caso, a junta **i)** é preferível à junta **h)** uma vez que suporta melhor a pressão interna, apesar de ambas apresentarem pouca resistência a solicitações aplicadas no plano da ligação. Neste caso, a modificação da junta **k)** surge com um reforço na parte exterior do canto formado pelos aderentes [30].

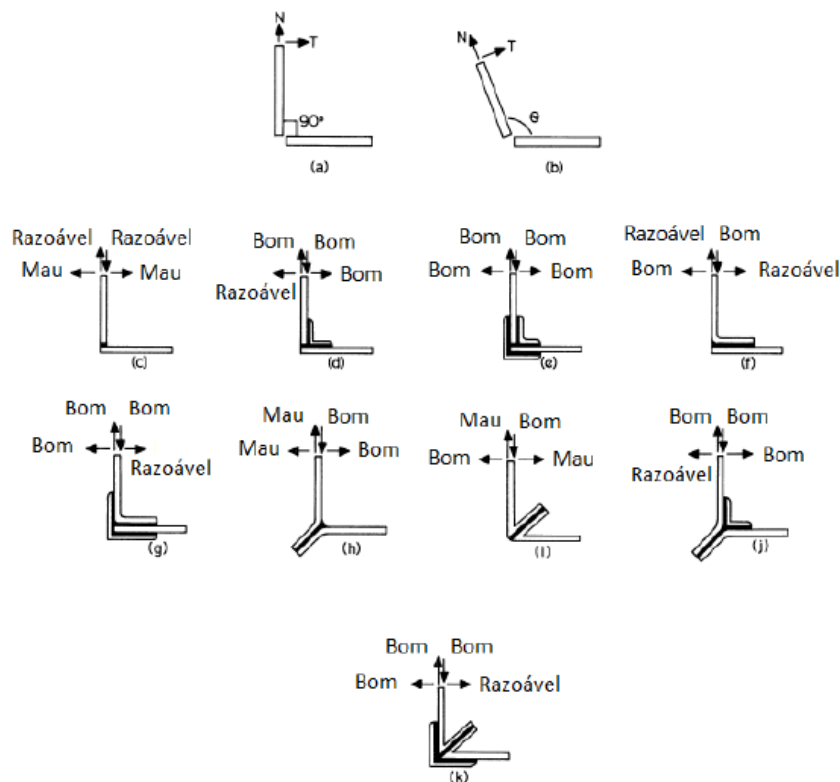


Figura 30 - Tipos de juntas de canto [30]

2.3 Previsão da resistência de juntas adesivas

No passado, a escassez de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados conduziu ao fabrico de juntas adesivas sobredimensionadas, originando estruturas mais pesadas e mais caras. Isto suscitou a necessidade de se obter metodologias de previsão fiáveis, fazendo surgir eventualmente novas possibilidades para o uso eficiente de juntas adesivas. Essencialmente, existem duas alternativas para a análise de juntas adesivas: análises de forma fechada (métodos analíticos) e métodos numéricos (por exemplo, o método de elementos finitos). O estudo de juntas adesivas remonta a 1930 com o modelo analítico de Volkersen que considera os materiais totalmente elásticos e deformações do adesivo apenas em corte. No entanto, a formulação analítica de juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo se deformar plasticamente, se forem usados substratos de compósito, ou se forem considerados substratos de materiais diferentes. O método de elementos finitos é a técnica mais utilizada para análise de juntas adesivas. Adams et al. [38] foram os pioneiros nesta técnica. Desta forma, esta é considerada a forma mais simples para a previsão da resistência das juntas adesivas, sendo designada de abordagem da mecânica contínua e requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado. A rotação da junta, a plastificação dos substratos, do adesivo e a influência do filete de adesivo foram estudados em primeira mão por Harris e Adams [39].

As análises por elementos finitos também podem ser usadas juntamente com os critérios da mecânica da fratura na previsão da resistência da junta adesiva, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como o Método de Fecho da Fenda Virtual (MFVF). Por outro lado, estas técnicas carecem da necessidade de reconstruir a malha durante a propagação do dano, aumentando de forma considerável o esforço computacional. Nas últimas décadas, graças ao desenvolvimento da numeração numérica, surgiu a modelação por dano pela combinação do método de elementos finitos (MEF) com elementos coesivos. Esta técnica reúne a modelação convencional pelo MEF para as regiões onde não é esperado ocorrer dano com a técnica de Modelos de Dano Coesivo (MDC), de forma a simular o crescimento do dano. Recentemente apareceu o Método de Elementos Finitos Estendido (MEFX), que usa funções de forma enriquecidas para representar as descontinuidades nos campos dos deslocamentos [3, 27]. Em resumo, a previsão da resistência das juntas pode ser feita com recurso às seguintes técnicas:

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

2.3.1 Modelos analíticos

O uso de técnicas analíticas envolve sempre a aplicação de pressupostos que simplificam os respetivos modelos para obtenção da solução do problema, no que diz respeito à geometria da junta, condições fronteira e carregamento [27]. Este tipo de abordagem é conhecido como “*closed-form stress analysis*” [26] e baseia-se em conjuntos de equações diferenciais que descrevem o estado de tensão e deformação das mesmas, recorrendo a interpretações e extrapolações de dados experimentais [40]. No caso mais simples, considera-se o adesivo e aderentes com comportamento linear elástico, o que não traduz a realidade. A aplicação destes métodos tem a grande vantagem de permitir uma análise rápida da junta adesiva. Por isso, estes métodos podem ser muito úteis quando se pretende obter um *design* preliminar da junta e obter dados importantes [12]. Para além disso, com a implementação de métodos analíticos é possível aferir um aumento das tensões no adesivo com a diminuição da espessura do mesmo (t_A), mas não é considerada a variação das tensões ao longo da mesma, sendo este um fator importante a considerar especialmente quando a rutura ocorre perto da interface [41]. De entre as várias restrições dos modelos analíticos, a mais relevante incide no facto dos mesmos não levarem em consideração o estado de tensão tridimensional devido ao efeito de Poisson (Figura 31) [41].

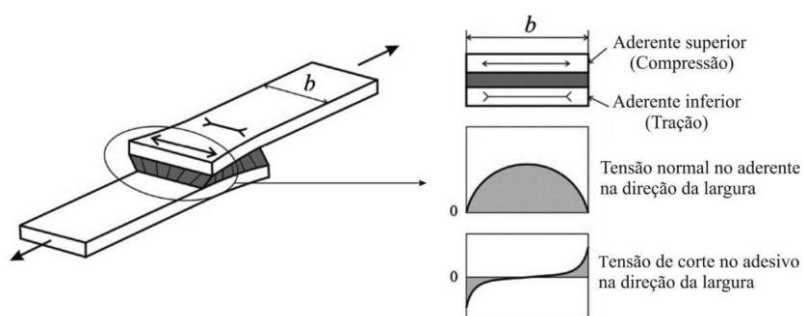


Figura 31 – Efeito de Poisson tridimensional numa JSS [42]

Voltando ao início da análise de estruturas ligadas, os métodos de previsão consistiam em técnicas analíticas, e as formulações de Volkersen [43] e Goland e Reissner [44] foram pioneiras numa série de estudos teóricos que tiveram a vantagem de simplificar os campos de tensão nas estruturas coladas devido ao uso de hipóteses simplificativas em termos de geometria das estruturas, carregamento e condições de fronteira, dando soluções eficientes em forma fechada. Assim, cada estrutura colada pode ser analisada de forma rápida, ainda que com muitos pressupostos incorporados [45]. Com estes modelos, as tensões e deformações podem ser facilmente calculadas, juntamente com a distribuição do momento fletor na estrutura. A resistência foi tipicamente prevista por critérios de tensão ou deformação. Até hoje, estes estudos foram progressivamente substituídos por análises numéricas, embora os estudos teóricos também tenham sido

refinados ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, tais como adesivos não-lineares [46] ou análises geométricas não-lineares [47].

Os trabalhos clássicos dos autores citados anteriormente relativamente aos modelos analíticos de estudo das juntas adesivas, ainda que com várias limitações, serviram de base para formulações posteriores mais complexas e refinadas como as desenvolvidas por Williams (1975) [48], Ojalvo e Eidinof (1978) [49], Bigwood e Crocombe (1989) [50], entre outros. Adams e Mallick (1992) [51] desenvolveram uma análise ainda mais avançada para juntas de sobreposição simples e dupla, que inclui o efeito das tensões térmicas. Na Tabela 5 apresenta-se um resumo das considerações e aspetos levados em conta nos trabalhos de vários autores [52].

Tabela 5 – Resumo das considerações mais significativas nas teorias de diversos autores [41].

Consideração	Goland e Reissner (1944) [44]	Hart-Smith (1973) [53]	Williams (1975) [48]	Ojalvo e Eidinof (1978) [49]	Bigwood e Crocombe (1989) [50]
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	

Consideração	Delale et al. (1981) [54]	Yuceoglu e Updike (1980) [55]	Allman (1977) [56]	Renton e Vinson (1975) [57]	Chen e Cheng (1983) [58]
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 de corte 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 do adesivo				X	X
Junta simétrica	X			X	X

2.3.2 Métodos numéricos

A utilização de modelos analíticos em juntas adesivas permite calcular as tensões e deformações. Aliás, estes modelos foram sofrendo melhorias através do contributo de diversos autores, entre os quais Goland e Reissner [44], Szépe [59], Hart-Smith [53], Pirvics [60], Thamm [61], Allman [56], Ojalvo [49], Chan e Sun [62], Chen e Cheng [58], Wu et al. [63] e Tsai et al. [63].

Todavia, a abordagem analítica torna-se impraticável na resolução de problemas com geometrias ou condições fronteira mais complexas, já que estes modelos utilizam pressupostos e/ou simplificações que contrariam a realidade (por exemplo, considerar os adesivos com comportamento linear elástico) [7].

Na era dos computadores, foram rapidamente implementados códigos de elementos finitos para simular estruturas unidas por adesivos, fornecendo uma visão mais precisa sobre o seu comportamento. De facto, entre outras vantagens, este método permite considerar a plasticidade dos materiais em análise [7].

O método de elementos finitos (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, em 1943 [64]. O avanço na indústria aeroespacial e o desenvolvimento dos computadores permitiram o desenvolvimento destes métodos, tal como a sua informatização (da Silva e Campilho [65]). O MEF começou a ser usado no contexto das juntas adesivas por Wooley e Carver [66] e posteriormente por Adams et al. [39]. Um dos objetivos iniciais para o uso do MEF foi a avaliação da influência do filete de adesivo (Adams [67], Adams e Davies [68], Adams e Harris [39], Adams e Peppiatt [38], Crocombe e Adams [69]). Este assunto foi mais tarde analisado por Dorn e Liu [70] e Tsai et al. [71]. A análise de Harris e Adams [39] 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 [14, 52].

Existe uma grande quantidade de estudos de juntas em materiais compósitos como os de Adams [67], Adams e Davies [68] e Magalhães et al. [14, 72]. Na análise de juntas híbridas, os métodos analíticos tornam-se quase impraticáveis, sendo fulcral a aplicação do MEF para tal. Dos trabalhos publicados relativamente a este tema, destacam-se os de da Silva et al. [65] e Al-Samhan e Darwish [73]. O MEF permite também estudar variações geométricas nas juntas adesivas (da Silva et al. [14]) e possibilita o cálculo de todas as componentes de tensão recorrendo a análises tridimensionais [35].

Na modelação pelo MEF, a escolha do tipo de elemento finito é um passo muito importante e pode ter influência nos resultados finais. Dependendo da aplicação, cada tipo de elemento tem vantagens e inconvenientes. Os elementos sólidos contínuos são adequados para análises lineares e 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. Apesar de haver efeitos tridimensionais como a deformação lateral (Adams e Peppiatt [74]) e efeitos anti clásticos ou de Poisson (Adams e Davies [75], Gonçalves et al. [35]), vários estudos mostraram que análises 2D permitem a obtenção de resultados credíveis (Adams et al.

[40], Adams e Davies [68]). Desta forma, geralmente faz-se uma análise bidimensional às juntas adesivas, assumindo condições de estado plano de deformação.

Os elementos usados na análise de juntas adesivas costumam ser elementos quadriláteros de quatro ou oito nós (com funções de forma lineares ou quadráticas, respetivamente). Geralmente, usa-se primeiramente uma malha grosseira e aumenta-se progressivamente a densidade da malha, isto é, aumenta-se o número de elementos, diminuindo o seu tamanho. Uma redução do tamanho do elemento aumenta os níveis de tensão e deformação até um ponto em que praticamente não há alteração e, quando assim acontece, diz-se que há convergência da malha (da Silva et al. [14]). 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. Por outro lado, 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 já que, através dos mesmos, a equação de movimento de cada grau de liberdade é resolvida individualmente, permitindo 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 número de graus de liberdade é constrangido devido à memória do computador e à necessidade de obter a solução num tempo razoável (He [76]). Estão disponíveis no mercado vários códigos de MEF, tais como o Nastran[®], Solidworks[®] Simulation, Ansys[®], Nisa[®] e Abaqus[®]. 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 dinâmicas e dependência da taxa de deformação. Estão também disponíveis pacotes 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 fiabilidade da análise [52].

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 [65].

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. Geralmente consideram-se os seguintes critérios:

- Tensão ou deformação máxima;
- Tensão ou deformação pontual a uma dada distância da extremidade da zona de ligação;
- Tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite.

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 [65]. Esta abordagem foi rapidamente aplicada para juntas em aplicações estruturais após a disponibilização do MEF e programação de computador [39]. A vantagem desta técnica inclui a análise de estruturas adesivas com ou sem dano inicial, e sob uma carga arbitrária [45].

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. Adams [40] usou 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. Além disso, 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, o que pode 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 [65].

O critério da cedência generalizada foi primeiramente introduzido por Crocombe em 1989 [50], e aplica-se quando uma porção de adesivo ao longo da zona de ligação 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 de adesivo ceda antes da rotura da junta [77].

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 [78] 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. [79] 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 [80, 81]. Zhao et al. [82] 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 [65].

A análise de juntas adesivas através da mecânica dos meios contínuos 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 [52].

2.3.2.2 *Mecânica da fratura*

A técnica da mecânica dos meios contínuos baseia-se na teoria associada à Resistência de Materiais, em que um dos princípios básicos é considerar que o material está isento de defeitos [14]. No entanto, é bastante comum aparecerem defeitos como fendas 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 [65]. 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 [14]. O uso de critérios puramente baseados na Mecânica da Fratura está então dependente da existência de uma fenda ou defeito na zona de ligação. 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, existe uma série de dificuldades associadas a este tipo de abordagem, como o tamanho da fenda inicial a considerar e a sua localização [52].

Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das superfícies é inferior a 180° [83]. Este efeito é extensível para singularidades 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 [35]. 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 [84] e por Rice e Rosengren [85] pode ser utilizada para modelar este tipo de materiais [52].

Os princípios básicos da Mecânica da Fratura devem-se ao trabalho pioneiro de Griffith [86], que durante uma série de ensaios experimentais em fibras de vidro com diferentes diâmetros, constatou que a tensão aumentava à medida que diminuía o diâmetro da fibra ensaiada. Estas observações levaram Griffith à conclusão de que as dimensões superiores das fibras se traduziam numa maior presença de defeitos e que a fratura ocorrerá a partir do mais crítico. Nesse contexto, Griffith estabeleceu que a propagação de um defeito interno ocorrerá quando a energia disponível na extremidade desse defeito (G_t – Taxa de Liberação de Energia), devido à solitação aplicada, igualar a energia necessária à propagação da fenda (G_c – Taxa Crítica de Liberação de Energia), que é uma propriedade do material [14].

Nos últimos tempos, a Mecânica da Fratura tem sido empregue com sucesso em muitos problemas de engenharia. Muitos estudos envolvendo juntas adesivas usam a taxa de liberação de energia e a taxa crítica de liberação de energia [87, 88] em vez de fatores de intensidade de tensão uma vez que estes não são facilmente determináveis quando a fenda surge perto ou numa interface. Este critério só é válido quando a mesma se propaga no interior do adesivo.

Como ilustrado na Figura 32, 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 [14]. 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.

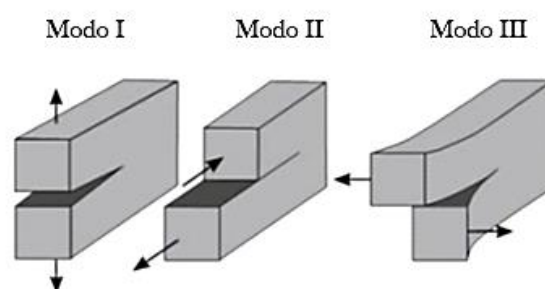


Figura 32 – Modos de propagação de uma fenda [89]

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. [90].

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 ligados com adesivos, de forma a prever a sua resistência com precisão [52].

Baseados na teoria da mecânica da fratura desenvolvida por Griffith [86], Barenblatt [91, 92] e Dugdale [93] foram os pioneiros no desenvolvimento dos MDC, que conceptualmente foram finalizados por Hillerborg et al. [94]. Os MDC combinam critérios baseados na resistência para prever o início do dano e na mecânica da fratura para determinar a propagação do dano. Os MDC descrevem a fratura como um fenómeno progressivo [95], cuja ideia básica consiste em concentrar todo o processo de fratura numa zona coesiva de espessura constante [96].

A zona à frente da ponta da fenda é considerada a zona coesiva, onde ocorre o processo de fratura [97]. 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 [98].

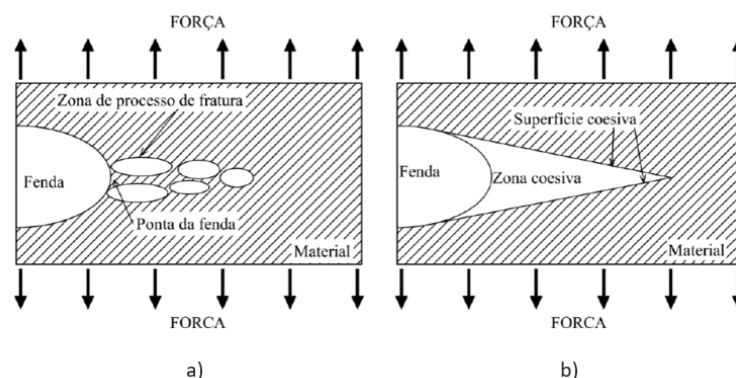


Figura 33 – a) zona de processo de fratura à frente da ponta da fenda; b) zona coesiva equivalente [52]

Considerando a ponta de uma fenda, como a representada na Figura 33, a singularidade de tensão esperada pela mecânica da fratura linear elástica é substituída por uma distribuição mais realista das tensões na zona coesiva. Desta forma, a rutura do material é controlada por grandezas como deslocamentos e tensões, que se enquadram nos conceitos da mecânica dos materiais [98]. A iniciação do dano dá-se quando é atingido o parâmetro de resistência denominado como resistência coesiva e abaixo da mesma, 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, como ilustrado na Figura 34 [52].

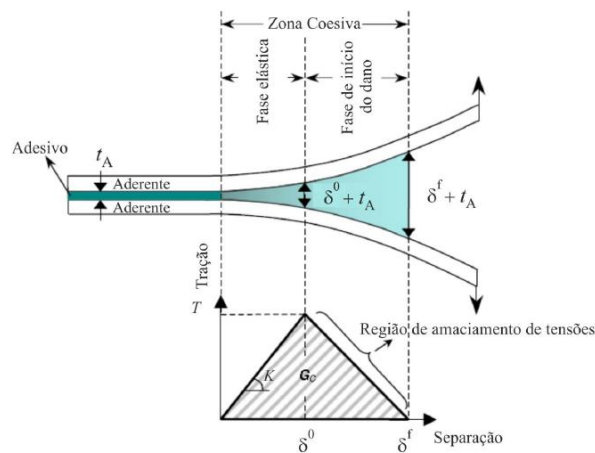


Figura 34 – Representação esquemática da zona do processo de dano numa junta adesiva e a correspondente lei de tração-separação bi-linear [52]

Em função do exposto, é possível perceber que esta técnica não necessita da presença de um defeito inicial. Portanto, os MDC permitem a simulação do início e propagação de uma fenda até à fratura final [96]. 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 [39]. Estes modelos podem ser facilmente incorporados em programas que têm como base o MEF e, desta forma, simular a evolução da força e conseqüentemente o enfraquecimento do material até a fenda estar completa. Portanto, os elementos coesivos não representam nenhum material físico, mas descrevem as forças coesivas que surgem quando os 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 35 [52].

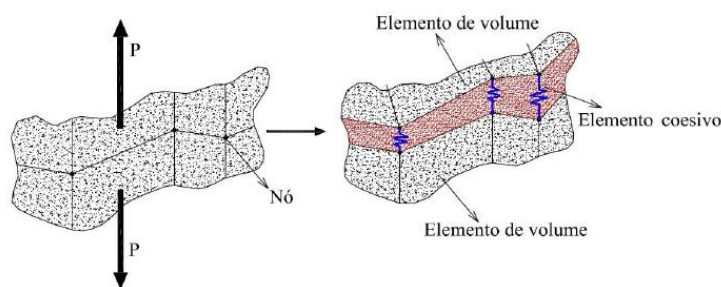


Figura 35 – Aplicação de elementos coesivos em conjunto com elementos de volume (contínuos) [99]

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. Desta forma, 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 [90], 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 36 [52]. 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 a deteção de concentrações de tensões na direção da interface, permitindo apenas obter um comportamento equivalente da camada adesiva [100].

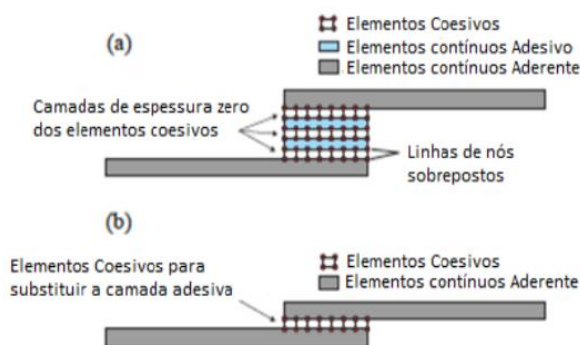


Figura 36 – a) Elementos coesivos para simular caminhos de rotura com espessura nula: aproximação local; b) Modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua [65]

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 [101]. Além disso, os MDC podem ser aplicados sem a presença de uma fenda inicial [102]. Por outro lado, os MDC possibilitam a inclusão de múltiplas possibilidades de rotura, em várias zonas ou interfaces dos materiais [103]. 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 [52].

2.3.2.4 Mecânica do dano

Nas técnicas da mecânica do dano, é estabelecido um parâmetro para modificar a resposta dos materiais através da depreciação da força ou resistência; por exemplo, em ligações adesivas finas [104] ou delaminação de compósitos ou falha na matriz [105], para representar a severidade do dano no material durante o carregamento. Este parâmetro pode ser categorizado em dois grupos: (1) variáveis que preveem a quantidade de dano através da redefinição das propriedades constitutivas do material, mas que não se relacionam diretamente com o mecanismo de rutura, e (2) variáveis ligadas à definição física de um tipo de dano específico, tal como porosidades ou a área relativa de micro cavidade [106]. Através da aplicação destas técnicas o crescimento do

dano é definido em função de uma carga para modelação estática, ou do número de ciclos para análises de fadiga. Muito pouco trabalho foi publicado relativamente a juntas adesivas. Comparativamente a análises de fadiga realizadas por MDC, as técnicas de mecânica do dano não fornecem uma distinção clara entre a iniciação de fadiga e as fases de propagação, contudo é possível obter uma base para uma análise de previsão [104]. A modelação à fadiga por MDC é restrita a trajetos pré-definidos para a fissura e, em aplicações mais específicas, as técnicas de mecânica do dano podem ser adequadas se o dano se encontrar mais disperso ou o caminho da falha não é conhecido [107].

2.3.2.5 *Método de Elementos Finitos Extendido*

O Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX) é uma melhoria recente do MEF que ganha vantagem sobre a modelação por MDC uma vez que não requer que a fratura siga um percurso pré-definido. Aliás, as fendas podem crescer livremente dentro de uma área com material sem a necessidade da malha coincidir com a geometria das descontinuidades, ou de corrigir a malha à volta da fratura [108]. Este método é uma extensão ao MEF, cujas características fundamentais foram apresentadas no final dos anos 1990 por Belytschko e Black [109]. O MEFX baseia-se no conceito de partição de unidade e pode ser implementado nos elementos finitos tradicionais através da introdução de funções de enriquecimento local para deslocamentos nodais perto da fratura, de forma a permitir o seu crescimento e separação entre as faces da mesma [110]. Devido ao crescimento da fenda, esta muda continuamente a sua posição e orientação, dependendo das condições de carga e geometria da estrutura, simultaneamente à criação das funções de enriquecimento necessárias para pontos nodais dos elementos de malha em torno do trajeto da fenda/extremidade.

2.4 Parâmetros que afetam o desempenho das juntas adesivas

As juntas adesivas têm tido uma crescente utilização em diversas indústrias, portanto, surgiu a necessidade de uma análise mais detalhada deste tipo de estruturas. São diversos os fatores que têm influência na resistência de uma junta adesiva (Figura 37) como por exemplo as características mecânicas dos aderentes e dos adesivos, a geometria da junta, o tratamento superficial, as condições ambientais e as solicitações externas. Entre estes, o tratamento superficial é essencial para garantir uma boa colagem [28, 111].

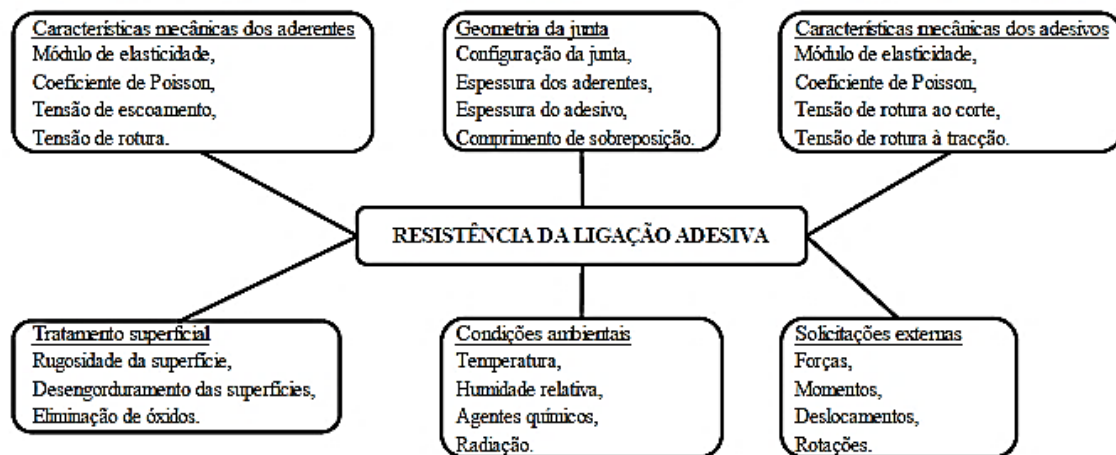


Figura 37 - Principais fatores que afetam a resistência de juntas adesivas [27]

Uma análise bem premeditada por parte do engenheiro, relativamente à ligação adesiva, permitirá a sua conceção tendo em conta as principais considerações de um projeto de junta [7]:

- Minimizar as concentrações de tensões no adesivo;
- Sempre que possível, projetar a junta de modo a que a transferência de carga se processe principalmente por corte;
- As forças de arrancamento e clivagem devem ser minimizadas;
- Distribuir as tensões da forma mais uniforme possível sobre toda a área de ligação;
- A resistência da ligação é diretamente proporcional à largura da ligação. O aumento da largura aumenta sempre a resistência da ligação. Aumentar o comprimento da área de sobreposição nem sempre aumenta a resistência da ligação;
- Geralmente, adesivos rígidos são melhores ao corte, e adesivos flexíveis são melhores ao arrancamento;
- Apesar de, tipicamente, um adesivo com propriedades mecânicas mais elevadas produzir uma junta mais resistente, um adesivo com uma resistência coesiva menor, mas com elevada capacidade de deformação pode levar a uma junta mais resistente em certos casos (em aplicações onde os gradientes de tensões são elevados);
- A rigidez dos aderentes e adesivos influencia a resistência de uma junta. De uma forma geral, quanto mais rígido for o aderente relativamente ao adesivo, mais uniforme é a distribuição dos esforços na junta e maior é a resistência da ligação;
- Quanto maior for o produto entre o módulo de *Young* e a espessura do aderente ($E \times t_s$), menor será a deformação durante o carregamento e portanto, mais resistente é a junta.

2.4.1 Efeitos geométricos em juntas adesivas

A presente literatura assenta no estudo paramétrico de juntas adesivas tubulares, recorrendo a diversas alterações na geometria da ligação e aferir, desta forma, as alterações no comportamento da mesma e como estas influenciam a sua resistência. Para além de t_A e de L_0 , que são dimensões intrinsecamente associadas à execução da junta adesiva, é relevante considerar na geometria da junta as alterações locais da geometria dos substratos e os filetes (*spew fillet*) na extremidade da ligação [27].

2.4.1.1 Comprimento de sobreposição

Nas juntas de sobreposição simples, as extremidades da junta são as zonas que apresentam uma maior concentração de tensões. A tensão média é mais baixa do que a tensão na extremidade da junta e essa distribuição não uniforme das tensões ao longo da camada adesiva faz com que a rotura ocorra normalmente para cargas de valor inferior aos valores que o adesivo consegue suportar.

A resistência da junta aumenta significativamente para valores pequenos da razão entre o comprimento de sobreposição (l) e a espessura do substrato (t), contudo, a partir de determinados valores, o ganho de resistência é muito reduzido e o peso do conjunto aumenta desnecessariamente (Figura 38).

Para os adesivos frágeis e substratos de aço de alta resistência, verifica-se que a partir de um determinado comprimento de sobreposição, o aumento deste não se repercute na resistência da junta, já que a mesma é ditada pelas características do adesivo. No caso de substratos que se deformam plasticamente, a resistência da junta é ditada pelas características do substrato (domínio plástico) e o aumento do comprimento de sobreposição não se repercute na resistência da junta. Como tal, o comprimento de sobreposição, cedência do substrato e tipo de adesivo devem ser tratados em conjunto [112].

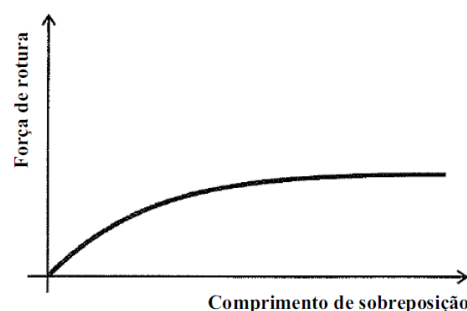


Figura 38 – Resistência de uma junta de sobreposição simples em função do comprimento de sobreposição [14]

Na Figura 39 pode verificar-se a diferença da força de rotura para os adesivos dúcteis e frágeis, em função do comprimento de sobreposição. O valor da força de rotura vai aumentando, sendo inicialmente superior para adesivos frágeis, mas para

comprimentos de sobreposição elevados observa-se que os adesivos dúcteis apresentam uma força de rotura muito superior à dos adesivos frágeis [113].

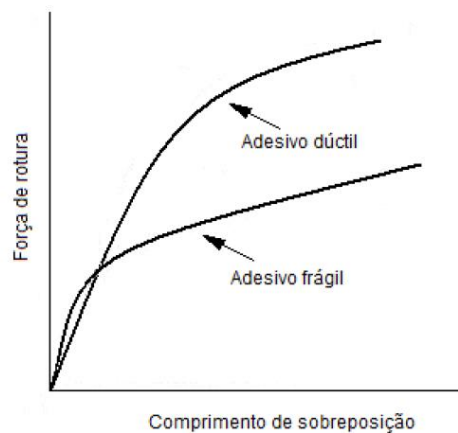


Figura 39 – Efeito da força de rotura em função do comprimento de sobreposição, para adesivos frágeis e dúcteis [4]

Segundo Pereira et al. [114], em estudos realizados com juntas de alumínio, o aumento do comprimento de sobreposição aumentou também a rigidez da junta, reduzindo a deformação plástica e os picos de tensão e aumentando a carga de rotura. Conclui-se que menos flexibilidade resulta numa resistência superior da junta.

2.4.1.2 Espessura dos aderentes

A variação da espessura dos substratos é um aspeto importante a ter em consideração uma vez que a sua má seleção pode diminuir a resistência da junta. Para as juntas de sobreposição simples, devido à sua geometria, verifica-se a ocorrência de um momento fletor quando solicitadas a esforços de corte (Figura 40). O momento fletor depende da espessura do adesivo e dos substratos. Quando a espessura aumenta, o momento fletor também aumenta, o que traduz numa diminuição da resistência da junta para espessuras elevadas. Porém, para os substratos em aço macio é benéfico aumentar a espessura para aumentar a rigidez e tornar o substrato menos suscetível à deformação plástica [112].



Figura 40 – Representação do momento fletor gerado numa JSS aquando sujeita a esforços de corte. Alterado de [4]

Segundo Pereira et al. [114], para juntas adesivas com aderentes de alumínio, concluiu-se que o aumento da espessura do substrato de 1 para 1,5 mm provocou o aumento da resistência ao corte, o que significa que o aumento da rigidez da junta adesiva aumenta a sua resistência (Figura 41).

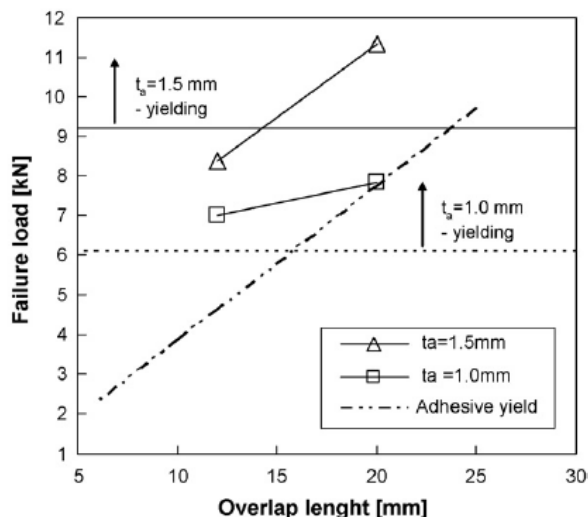


Figura 41 – Efeito da variação da espessura dos substratos na resistência da junta [114]

2.4.1.3 Utilização de filetes de adesivo

Muitas vezes, no estudo de juntas adesivas, assume-se que a extremidade do adesivo é quadrada. No entanto, na prática, as juntas raramente se apresentam com essa geometria. O que acontece é que, devido ao excesso de adesivo depositado na área de colagem, o mesmo é expulso para fora da junta, formando um filete. A formação desse filete é muito importante na medida em que causa uma redistribuição de tensões, aliviando os picos de tensão de corte e de arrancamento, muito perigosos para materiais compósitos. Vários estudos realizados por diversos autores [38, 67, 69-71, 74, 115-117], mostram que a presença de filetes de adesivo permite reduzir os picos de tensão nas extremidades da camada de adesivo e também no substrato, em cerca de 50% ou mais [14].

O facto de existirem filetes nas juntas adesivas traduz-se num ligeiro inconveniente quando se recorre a um estudo a partir de modelos analíticos, já que estes consideram a extremidade do adesivo com uma geometria quadrada (Figura 42). Nestas condições, os modelos analíticos devem ser utilizados com cuidado devido a discrepâncias nos resultados em comparação com casos práticos [14].

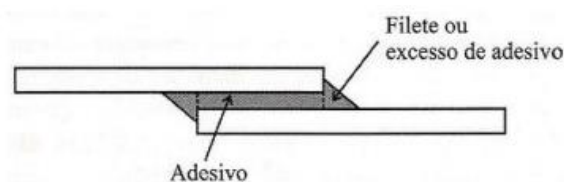


Figura 42 – Junta de sobreposição simples com um filete de adesivo [14]

2.4.1.4 Geometria dos substratos – utilização de chanfros

A geometria dos substratos é um fator importante a considerar quando se pretende reduzir a rigidez na extremidade da sobreposição de forma a aliviar as concentrações de tensões e deformação (Figura 43). A utilização de chanfro interno (*scarf joint*), por exemplo, permite obter este tipo de resultados.

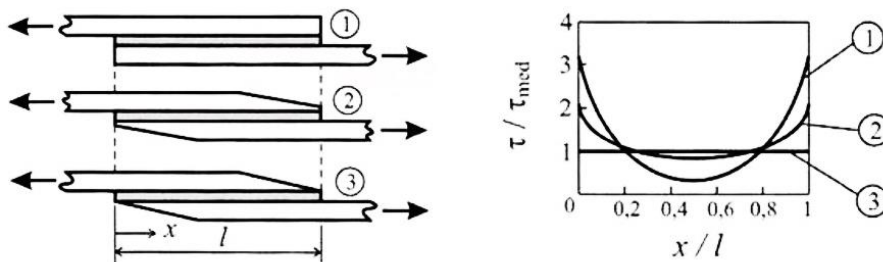


Figura 43 – Distribuição da tensão de corte em JSS com e sem chanfro exterior [118]

A presença de chanfro nos substratos torna a geometria da junta pouco viável quando se pretende realizar o seu estudo por via analítica. No entanto, Cherry e Harrison [119] desenvolveram uma equação simples que permite determinar a forma adequada do substrato, correspondendo a uma distribuição de corte uniforme. Além disso, os autores Adams et al. [120], Groth e Nordlund [118] usaram métodos numéricos de otimização, tendo chegado ao perfil mostrado na Figura 44 [14].

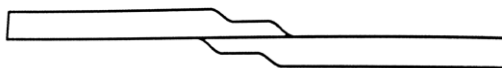


Figura 44 – Perfil ótimo para uma JSS de acordo com Groth e Nordlund [14]

Hart-Smith [53] é uma referência quando o objetivo consiste na diminuição do arrancamento. A sua filosofia consiste em diminuir ao máximo o *peel* de maneira a não ser necessário considerar este fator em termos de cálculo da resistência da junta. Desta forma, de maneira a melhorar a eficiência de uma JSS, Hart-Smith [53] propõe a geometria apresentada na Figura 45.

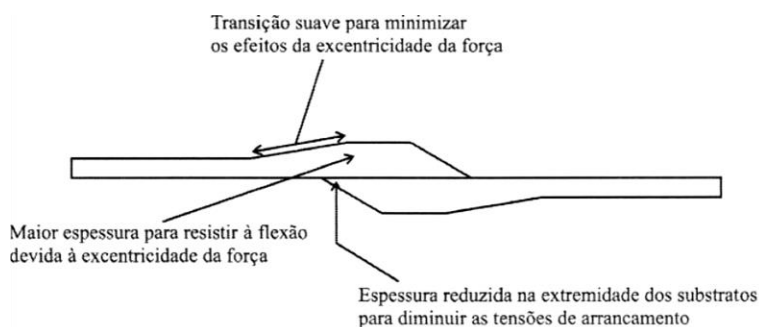


Figura 45 – Sugestões para melhorar a eficiência de uma JSS segundo Hart-Smith [53]

Para resolver o problema da ruptura transversal no compósito em juntas adesivas entre aderentes de material compósito, Adams et al. [67] realizaram um estudo que contribuiu para solucionar esta questão. Foram estudadas várias configurações de juntas de sobreposição dupla onde o substrato interno é um compósito com reforço de fibra de carbono (CFRP) e os substratos exteriores são de aço. Os autores consideraram uma junta com uma geometria de base e modificaram-na de modo a melhorar a resistência, mas mantendo o mesmo comprimento de sobreposição como mostrado na Figura 46. Nas juntas **2** e **3**, os substratos exteriores foram modificados com um chanfro (*tapering*). Na junta **4**, foi incluído um filete no fim da junta onde a ruptura se inicia. Na junta **5**, foram incluídos um chanfro e um filete. Para todas as juntas, as tensões transversais no compósito situam-se numa zona adjacente ao limite dos substratos exteriores. O súbito degrau formado pelo adesivo concentra toda a transferência de carga do CFRP para o aço nesta área. As juntas **2** e **3** praticamente não provocaram melhorias. A inclusão de um filete de adesivo na junta **4** originou um aumento considerável da resistência da junta. O filete permite aliviar a concentração de tensões e a distribuição das tensões transversais no compósito torna-se mais uniforme. Com a junta **5**, as tensões transversais são ainda mais reduzidas. A combinação de uma menor rigidez e de um filete reduz as tensões transversais no compósito cerca de seis vezes relativamente à junta **1** [67].

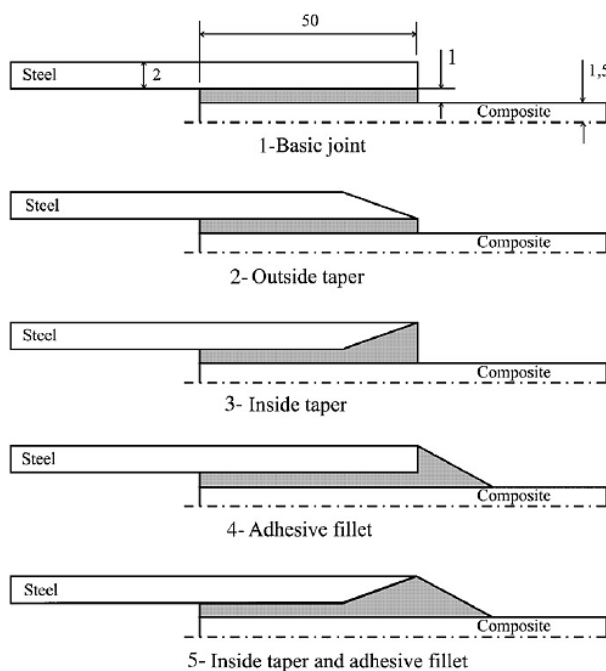


Figura 46 – Juntas adesivas com vários tipos de chanfro: 1) junta adesiva típica; 2) junta adesiva com chanfro exterior; 3) junta adesiva com chanfro interior; 4) junta adesiva com chanfro de adesivo; 5) junta adesiva com chanfro interior no aderente e chanfro de adesivo (dimensões em mm) [67]

2.4.1.5 *Espessura do adesivo*

O adesivo deve possuir uma espessura entre 0,1 e 0,5 mm de forma a garantir um bom desempenho da junta. Na maioria das aplicações de juntas adesivas, os fabricantes recomendam uma espessura de 0,1 a 0,2 mm para a obtenção da resistência máxima [121]. Para valores inferiores a 0,1 mm de espessura, crê-se que existe uma preponderância em ocorrer falhas de colagem com a consequente geração de defeitos. No caso de a espessura aumentar a partir de 0,1 – 0,2 mm, verifica-se experimentalmente que a resistência da junta diminui. Os modelos analíticos de Goland e Reissner [44] e de Volkersen [43], baseados unicamente numa análise elástica, preveem a diminuição das tensões normais e de corte com o aumento da espessura e, consequentemente, um aumento da resistência da junta, o que contradiz a realidade. Crocombe [50], recorrendo ao critério de cedência globalizada, mostrou que em juntas de sobreposição simples a cedência completa do adesivo ocorre prematuramente numa junta mais espessa relativamente a uma de menor espessura. Este autor concluiu então que uma análise não linear do material é fundamental para compreender a influência da espessura do adesivo. Contudo, é sabido que os adesivos frágeis atingem a rutura antes da plastificação completa ocorrer. Recentemente, da Silva et al. [122], recorrendo a uma simulação numérica com elementos finitos incluindo propagação do dano, fez a distinção entre dois tipos de plastificação que podem ocorrer nas JSS com um adesivo dúctil: a localizada na zona de singularidade e que não se reflete na curva força-deslocamento e a globalizada que ocorre numa fase muito posterior do ensaio e que origina a alteração de declive da referida curva. A plastificação localizada surge para valores inferiores de deslocamento aplicados nas juntas de menor espessura, ocorrendo o contrário para a deformação plástica globalizada. Esta última constatação explica a razão da diminuição de resistência das juntas com o aumento da espessura do adesivo. Adams e Peppiatt [38] propuseram três justificações possíveis para explicar a diminuição da resistência com o aumento da espessura do adesivo: concentração de tensões, maior probabilidade da presença de defeitos internos (porosidades, vazios e microfissuras devidas às tensões residuais induzidas pelo processo de cura) e de maiores dimensões, e taxa de deformação. Os autores concluíram que a presença dos defeitos internos é o fator preponderante na explicação do fenómeno. Gleich et al. [121] propõem uma explicação baseada nas tensões interfaciais, demonstrando que as tensões normais e de corte nas interfaces e junto às extremidades da zona de sobreposição aumentam com o aumento da espessura do adesivo, ao contrário do que sucede com as mesmas componentes de tensão no plano médio do adesivo. As juntas com menor espessura de adesivo apresentam uma distribuição mais uniforme para ambas as componentes de tensão, ao passo que as de maior espessura de adesivo evidenciam um aumento pronunciado junto das interfaces. Os autores concluem assim que a maior probabilidade de presença de defeitos internos nas juntas com maior espessura de adesivo não pode

ser considerada como explicação exclusiva para o fenômeno, embora possa contribuir para ele [14].

2.4.2 Outras alterações geométricas

2.4.2.1 Juntas onduladas/dobradas

Recentemente têm sido feitas experiências em juntas de sobreposição simples com geometria ondulada (Figura 47). Para aderentes em compósito de fibra de carbono reforçado com resina de epóxido, têm-se mostrado resultados superiores em resistência comparativamente às JSS convencionais [123].

Este tipo de juntas em laminados de compósito foi concebido com o propósito de eliminar a excentricidade, para que as cargas se mantenham no mesmo plano e, desta forma, reduzir os efeitos negativos causados pelo momento fletor [123].

Estudos experimentais e numéricos em juntas onduladas com laminados de compósito levados a cargo por Ávila et al. [124] mostraram um aumento de carga de 41% quando comparadas a JSS. Também utilizando laminados em compósito de carbono e epóxido, Zeng e Sun [125] demonstram experimentalmente que as juntas onduladas são consideravelmente mais resistentes que as JSS feitas com os mesmos materiais. Neste artigo, os autores replicam as juntas onduladas, mas utilizando diferentes materiais, configurações e adesivos.

Taib et al. [126, 127] conduziram igualmente experiências e análises em EF com o objetivo de averiguar o efeito da configuração de junta, espessura da camada de adesivo, defeitos, humidade, existência de filetes e aderentes em juntas em L, JSS, JSD e juntas onduladas, com aderentes em laminados de compósito (fibra de vidro e resina de viniléster). Concluiu-se que, nas juntas onduladas, as tensões de arrancamento e corte eram as mais reduzidas.

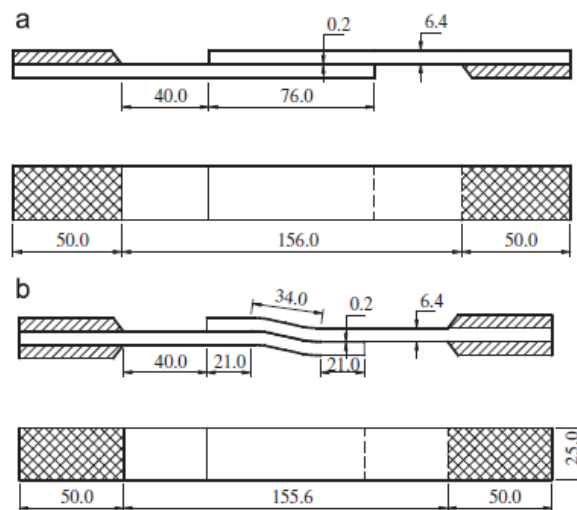


Figura 47 – Geometria de uma junta adesiva: a) Junta de sobreposição simples; b) Junta ondulada [123]

A Figura 47 representa a geometria de duas configurações de juntas adesivas: JSS e junta ondulada estudadas por Kishore et al. [123]. Os resultados finais mostraram um aumento de resistência na junta ondulada, comparativamente à junta de sobreposição simples, na ordem dos 90%, comprovando que a redução da excentricidade tem uma influência significativa na resistência da junta (Figura 48).

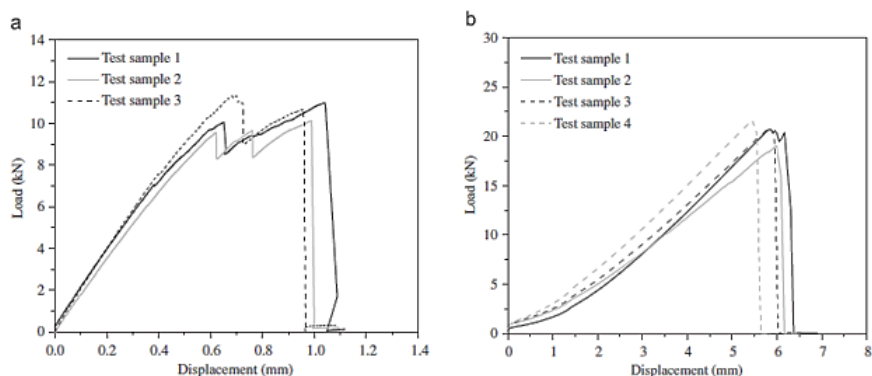


Figura 48 – Curvas de força vs. deslocamento obtidas através dos ensaios. a) Junta de sobreposição simples; b) Junta ondulada [123]

2.4.2.2 Juntas com rasgo transversal

Recorrendo ao método de elementos finitos, Yan et al. [128] realizaram uma investigação considerando efeito do comprimento e largura de uma ranhura (junta com rasgo transversal - Figura 49), e do módulo de elasticidade do adesivo na distribuição de tensões no adesivo e estudaram as tensões nos aderentes de alumínio.

Os resultados mostraram que os picos de tensão no adesivo diminuem acentuadamente com a presença de um rasgo transversal nos aderentes. A magnitude das tensões no adesivo na posição correspondente à ranhura diminui significativamente à medida que

o comprimento da ranhura aumenta. O elevado pico de tensões gerado pelo esforço de tração ocorre perto da extremidade da ranhura no aderente. O aumento do módulo de elasticidade traduz-se num acréscimo dos valores máximos de tensão. Conclui-se que o efeito dos rasgos transversais relativamente ao pico de tensões no adesivo com um módulo de elasticidade baixo é desprezável, mas o oposto sucede quando o mesmo é elevado, já que os picos diminuem drasticamente.

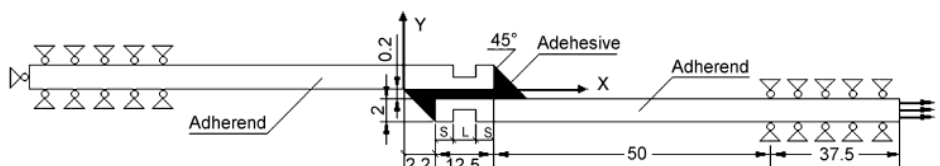


Figura 49 – Modelo de elementos finitos de uma junta com rasgo transversal [128]

2.5 Juntas adesivas tubulares

A ligação de juntas a partir da utilização de adesivos é um dos métodos mais recorrentes nos dias de hoje, apresentando uma aplicação extensa na indústria de tubos. Devido ao elevado rácio resistência/peso e boas propriedades que os tornam muito resistentes à corrosão, tubos feitos a partir de polímeros e compósitos têm-se tornado uma alternativa às tubagens metálicas. Por esta razão, as ligações adesivas tornaram-se na principal forma de união. Como tal, têm sido levadas a cabo várias investigações relativamente ao comportamento de juntas adesivas tubulares [129].

Encontram-se disponíveis na literatura diversos estudos experimentais, analíticos e numéricos relativos a juntas tubulares sujeitas aos mais diversos carregamentos. Adams e Peppiatt [74] foram os primeiros a analisarem juntas adesivas tubulares em 1977, levando a cabo um estudo em juntas elásticas isotrópicas sujeitas a cargas axiais e torsionais, utilizando elementos finitos axissimétricos, quadráticos e isoparamétricos. Os resultados da análise torsional foram validados a partir de uma solução em forma fechada. A partir deste estudo, muitos outros foram realizados dedicados à análise de juntas adesivas tubulares, como por exemplo dos autores Hosseinzadeh et al. [129].

Uma vez que as juntas adesivas tubulares apresentam um peso reduzido, possibilitam a união de materiais dissimilares, não alteram os materiais presentes na ligação (aderentes), conseguem suportar cargas elevadas e gerar uma boa distribuição de tensões, são muito utilizadas em quadros de veículos (aviões, automóveis, autocarros). O peso reduzido deste tipo de juntas provoca uma redução no consumo de combustível e melhora o controlo do veículo [2].

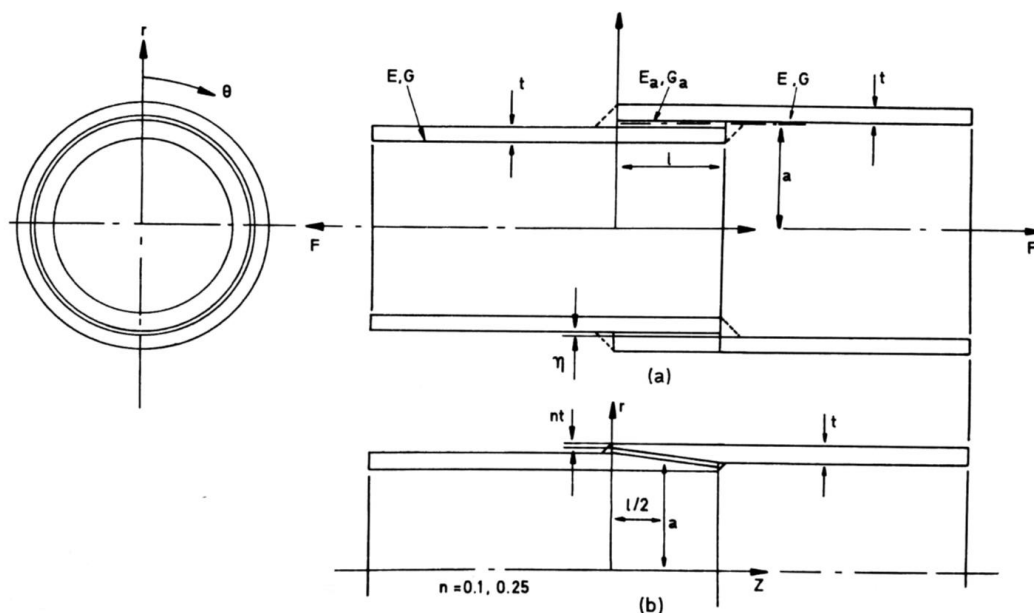


Figura 50 – Geometria da: a) junta tubular; b) junta tubular com chanfro [40]

A aplicação de adesivos providencia um método conveniente e leve para a ligação de estruturas constituídas por tubos de paredes finas. A representação das juntas mais típicas nestas estruturas está representada na Figura 50. No sistema de eixos utilizado, z representa a direção longitudinal, r a direção radial e θ a direção de aro, isto é, em torno do tubo.

A literatura correspondente ao estudo de tensões entre tubos de paredes finas ainda é relativamente escassa, contudo, comparativamente às JSS, no caso de um carregamento axial, as concentrações de tensões surgem a partir dos mesmos três mecanismos: (1) deformação diferencial; (2) flexão introduzida pela não colineariedade da sobreposição dos tubos; (3) efeitos de extremidade (concentração de tensões local). No caso de existir torção, não existem efeitos de flexão. No entanto, a deformação diferencial e os efeitos de extremidade mantêm-se presentes [40].

2.5.1 Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração

Num estudo numérico feito por Labbé e Drouet [2], cujo objetivo consistiu na otimização de juntas adesivas tubulares sujeitas a uma carga axial, observou-se o efeito que os parâmetros geométricos têm na distribuição de tensões na junta. Neste trabalho, tendo em conta que a geometria tubular e a carga axial são axissimétricas, os autores representam a junta tubular a partir de um modelo 2D. Toda a geometria é definida pelos parâmetros geométricos apresentados na Figura 51.

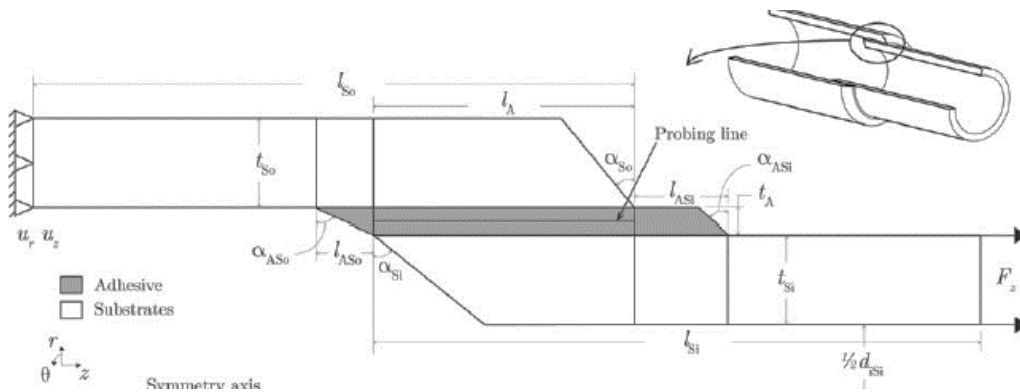


Figura 51 – Modelo axissimétrico 2D de EF da junta adesiva tubular, representando todos os parâmetros geométricos, carga e condições fronteira [2]

O artigo apresentado demonstra como a tensão axial é influenciada pela variação dos diversos parâmetros geométricos. Aplicando uma carga unitária de 1 N, os resultados do estudo paramétrico realizado mostraram que quanto maior é a espessura do substrato t_{S1} e t_{S0} , maior será a tensão normal nas extremidades. A tensão normal é menos sensível à espessura do adesivo na zona central da área de sobreposição do que nas suas extremidades. O ângulo dos chanfros na extremidade dos substratos, α_{S1} e α_{S0} , quando superior aos valores do intervalo de 0° a 45° , geram um aumento de tensões normais na camada de adesivo na extremidade do tubo interior, enquanto a distribuição das mesmas permanece inalterada ao longo da película de adesivo. Contudo, esta influência é pequena quando comparada à de outros parâmetros geométricos, tal como a espessura dos substratos.

Quanto maior é o comprimento do chanfro, l_{AS1} e l_{AS0} , maior é a concentração de tensões. A magnitude das tensões normais também reduz quando o diâmetro do substrato interior aumenta. Para concluir, observou-se que todos os parâmetros geométricos têm uma influência significativa a nível de tensões exceto o ângulo dos substratos na extremidade dos mesmos [2].

Numa pesquisa realizada por Das e Pradhan [130] comparou-se uma análise baseada em modelos de elementos finitos de uma junta tubular de plástico reforçado com fibra de vidro, com dados de literatura obtidos pelos mesmos autores. Foi considerada uma análise tridimensional da junta tubular em questão (Figura 52), mostrando a importância que existe em não negligenciar os efeitos tridimensionais da junta. O esforço de corte ($\tau_{\theta r}$) é extremamente sensível a efeitos tridimensionais quando comparado a outros planos de tensão (τ_{zr} , σ_r), desta forma, a análise 3D em EF serviu para calcular as tensões fora do plano de tensões (σ_r , τ_{zr} , $\tau_{\theta r}$).

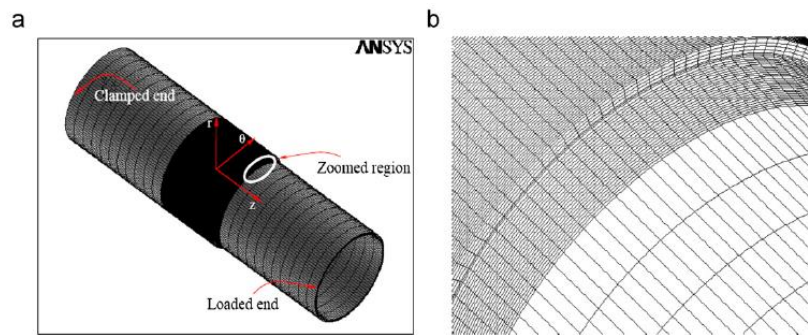


Figura 52 – Malha de elementos finitos da junta adesiva tubular: a) modelo completo; b) zona aproximada da região de sobreposição [130]

A partir deste estudo, Das e Pradhan [130] retiraram as seguintes conclusões:

- As extremidades livres da sobreposição do adesivo-aderente demonstram a existência de um estado de tensão tridimensional quando comparadas com as regiões interiores, podendo ser o resultado da presença de descontinuidades geométricas, da não homogeneidade do material ao longo da espessura da junta ou devido à diferença de rigidez entre os aderentes e o adesivo;
- A magnitude das tensões de arrancamento é significativamente superior em relação à das tensões de corte nas superfícies críticas na região de sobreposição, o que influencia significativamente a rotura induzida por tensões fora de plano;
- A rotura do adesivo inicia-se na extremidade da interface aderente-adesivo;
- O dano propaga-se sobretudo no modo de corte dentro do plano. As contribuições dos modos de abertura e de corte fora de plano são insignificantes;
- Camadas de fibra orientadas angularmente são mais suscetíveis ao crescimento do dano quando sujeitas ao modo de abertura. Por esta razão devem ser evitadas em juntas adesivas tubulares;
- Camadas de fibra de vidro orientadas a 0° e $30^\circ/60^\circ$ são mais suscetíveis a sofrer rutura a partir de tensões de cisalhamento quando sujeitas ao modo de corte, devendo por isso ser evitadas em juntas adesivas tubulares;
- Camadas de fibras orientadas a 90° oferecem melhor resistência tanto ao modo de abertura como ao de corte, e por isso, as mais adequadas a utilizar em juntas adesivas tubulares;
- O aumento do grau de anisotropia do aderente reduz a tendência da propagação do dano.

Num outro estudo realizado por Qiu et al. [131], foi desenvolvida uma formulação teórica de forma a estimar a capacidade de carga axial em juntas compostas por tubos de aço ligados por uma manga de compósito (polímero reforçado com fibra de vidro) (Figura 53), validada posteriormente por resultados experimentais que cobrem várias secções geométricas e comprimentos de sobreposição. Além disso, foi conduzida uma análise tridimensional em elementos finitos de forma a estimar a capacidade da junta

em questão e descrever a distribuição das tensões de corte geradas na camada adesiva, desta forma averiguando a fiabilidade dos resultados teóricos. Posto isto, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- A formulação teórica desenvolvida baseada em aderentes com um comportamento linear elástico demonstra uma previsão satisfatória da capacidade da junta ao arrancamento para os provetes com diferentes secções transversais e comprimentos de sobreposição;
- A modelação em EF produziu resistências mecânicas ligeiramente inferiores à modelação teórica, o que pode ser explicado através da representação mais conservativa da área de colagem utilizada na modelação de EF e a consideração da não-linearidade do material do aderente. A modelação em EF apresentou uma representação precisa do modo de arrancamento quando comparada ao estudo experimental;
- O comprimento efetivo da junta foi o parâmetro que contribuiu mais para o aumento da resistência da mesma. Este comprimento efetivo pode ser obtido através da formulação teórica validada pelos resultados da modelação por EF;
- A capacidade máxima da junta no limite elástico ocorre quando os aderentes possuem a mesma rigidez. Este facto é consistente tanto para juntas de sobreposição simples ou duplas. Para o estado último de tensão, a capacidade máxima da junta surge quando o rácio de rigidez entre os aderentes está próximo de 0,8. Quando a razão de rigidez é igual a 1, a distribuição de tensões de corte é simétrica, caso contrário existirá um deslocamento (δ) do aderente com menor rigidez relativamente ao de maior rigidez.

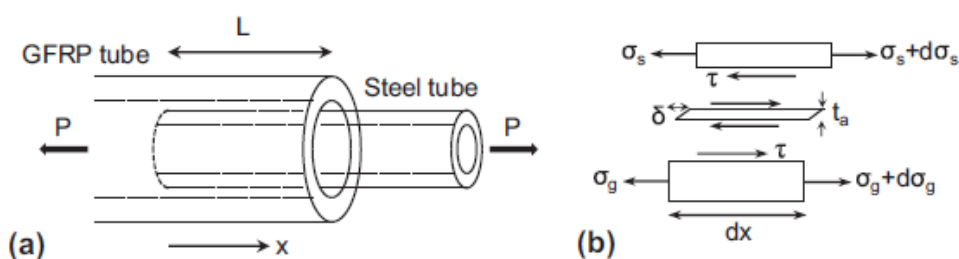


Figura 53 – Uma junta circular com uma manga sob tensão axial: a) geometria global; b) típico elemento diferencial [131]

2.5.2 Juntas tubulares sujeitas a esforços de corte

Na investigação conduzida por Hosseinzadeh et al. [129], na qual se estudou a resposta de juntas adesivas tubulares de aço em resposta a uma carga torsional, analisaram-se diferentes comprimentos de sobreposição. Utilizou-se o modelo de plasticidade de Ramberg-Osgood [132] para caracterizar o comportamento não linear das juntas em

estudo. Os resultados obtidos foram comparados com a solução obtida pela simulação em EF realizada em ABAQUS®.

Foi demonstrado que o modelo de plasticidade de Ramberg-Osgood consegue simular o comportamento das juntas com vários comprimentos com uma precisão muito satisfatória e, com o mesmo, foi possível perceber a forma de como as tensões se distribuem pela junta assim como o modo de rutura. Os resultados mostraram que a resistência da junta está altamente dependente da energia de deformação absorvida pela mesma. De facto, à medida que o comprimento de sobreposição aumenta, maior é a quantidade de energia absorvida pela junta, apesar de esta se encontrar num estado completamente plástico.

A Figura 54 mostra os resultados de um ensaio estático de torção típico para os comprimentos de sobreposição de 30 mm e 40 mm. Para assegurar a consistência dos ensaios, foram testadas duas amostras de cada comprimento. Como ilustrado, a resposta do adesivo à torção é completamente plástica. Mesmo após ampliar a torção vs rotação na fase inicial do ensaio, é possível observar que o comportamento dificilmente é linear. Contudo, de maneira a criar um modelo preciso da resposta em questão, o mesmo deve conseguir suportar um comportamento totalmente plástico (modelo de Ramberg-Osgood, como mencionado antes). Os autores constataram também que o modelo elástico criado numa análise linear feita pelos mesmos num trabalho anterior [133] não conseguiu prever com exatidão a resistência final da junta [129].

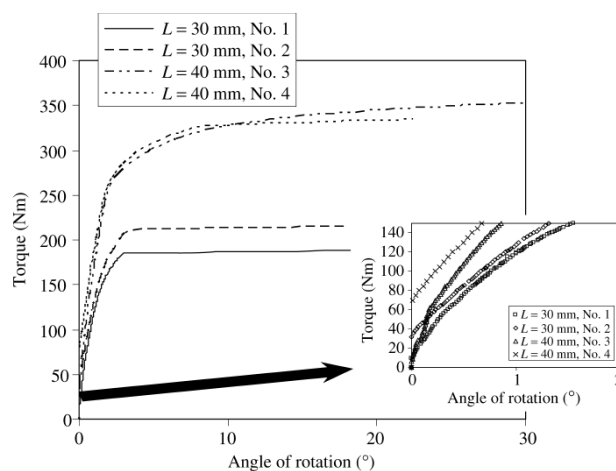


Figura 54 – Comportamento plástico de dois comprimentos de sobreposição diferentes, L , resultante do teste de torção estático, mostrando o número de amostras para cada comprimento [129]

Os resultados da análise de EF, considerando o comportamento linear do adesivo, mostraram que as juntas com o comprimento de sobreposição de 30mm e 40mm experienciaram as mesmas tensões máximas sob a mesma magnitude de torque, isto porque em ambas as amostras o “comprimento efetivo” foi ultrapassado. Contudo, ao

considerar o comportamento não linear do adesivo, o comprimento de 40 mm produzia um aumento de 33% na resistência máxima ao torque comparativamente ao de 30 mm.

A substituição dos parâmetros elásticos para plásticos fez com que, na junta com comprimento de sobreposição de 40 mm, a tensão numa das extremidades se mantivesse relativamente constante, enquanto o nível de tensões no meio cresceu à medida que a torção aumentava, indicando que as regiões nas extremidades se deformaram plasticamente enquanto que a região central da junta permaneceu elástica. A rutura era considerada quando as tensões distribuídas por toda a área de sobreposição se tornam constantes e iguais à tensão de rutura ao corte do adesivo. Isto sucedeu-se nas simulações por EF para valores de torção de aproximadamente 320 N.m (Figura 55), muito próximo dos valores experimentais experimentais (340 N.m) [129].

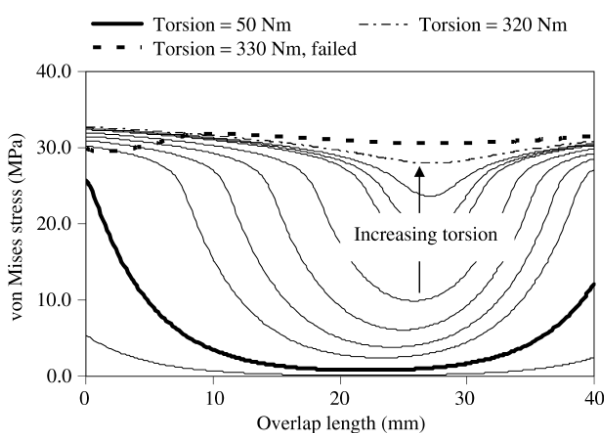


Figura 55 – Distribuição das tensões de von Mises ao longo do comprimento de sobreposição em função da torção aplicada pela análise de EF [129]

Num outro estudo [134], agora totalmente paramétrico e recorrendo ao software ABAQUS, investigou-se o comportamento de juntas tubulares com e sem casquilho (Figura 56), compostas por aderentes em compósito (fibra de vidro e resina de epóxido), considerando o efeito da delaminação. Foi estudada a influência de diversos parâmetros na distribuição de tensões nas juntas adesivas em questão, considerando juntas com ambos os aderentes em compósito e outras entre aderentes de compósito e alumínio. O estudo focou-se sobretudo nas tensões de corte e de arrancamento na camada adesiva após as juntas serem submetidas a um esforço de torção, da qual foram obtidas as seguintes conclusões:

- Todas as componentes de tensão na camada adesiva tenderam a assumir valores superiores nas extremidades do comprimento de sobreposição ou perto delas, mas aproximam-se de zero ao longo do restante comprimento. Refere-se como exceção a tensão de corte τ_{12} que, como esperado, apresentou um valor constante diferente de zero ao longo do adesivo nas zonas afastadas das extremidades;

- Registou-se uma descida no valor da tensão de corte na camada adesiva na região em que a delaminação ocorre através da espessura; apesar disso, as tensões introduzidas no aderente de compósito na vizinhança da localização da delaminação não se alteraram com a presença do respetivo defeito;
- Os valores de tensão de corte e arrancamento tendem a ser máximos quando o comprimento da delaminação aumenta. Além disso, um pico de tensão secundário, tanto de corte como de arrancamento, foi registado exatamente no fim da zona de delaminação;
- Na junta tubular com o casquilho (Figura 56 **b**)), as concentrações de tensões não só se desenvolveram nas extremidades do adesivo, como também nas zonas de descontinuidade entre os aderentes (onde os aderentes se encontram), causando uma descontinuidade considerável no estado de tensão;
- O pico de tensões secundário gerado na junta tubular (Figura 56 **a**)) também se observou na junta tubular com casquilho (Figura 56 **b**));
- Para ambos os modelos em estudo, quando a delaminação através da espessura era movida para uma zona mais profunda, a amplitude do pico secundário diminui significativamente e os valores das tensões máximas nas extremidades aproximam-se daqueles quando a junta está intacta;
- A orientação das fibras não apresentou nenhum efeito importante em termos de tensões de arrancamento na junta com o casquilho. Apesar disso, foram testadas amostras com camadas de fibra orientadas a 45° , registando-se uma maior descida de tensões de corte.

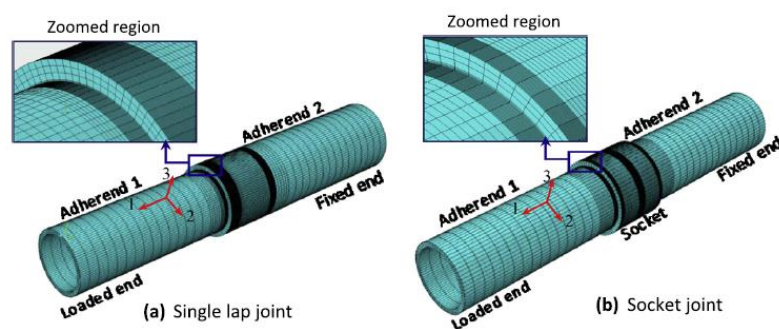


Figura 56 – Modelos de EF utilizados das duas juntas adesivas delaminadas: a) Junta adesiva tubular típica; b) Junta adesiva tubular com casquilho [134]

Num artigo publicado por Xu et al. [135], modelou-se uma junta adesiva tubular sob a forma de um corpo elástico 3D. Desta forma, eliminou-se a hipótese de que as tensões de corte e arrancamento fossem constantes através da espessura da camada de adesivo. Aqui, é analisada teoricamente a distribuição de tensões numa junta adesiva tubular com aderentes em compósito (fibra de vidro e resina de epóxido) sujeita a torção (Figura 57). Foi considerado o método das diferenças finitas de forma a solucionar as equações de equilíbrio obtidas. A solução é posteriormente validada comparando-a com dados

encontrados experimentais obtidos na literatura por parte dos autores [136]. As conclusões retiradas do respetivo estudo resumem-se da seguinte forma:

- Existe uma variação significativa de tensão ao longo da espessura do adesivo. Por este motivo, assumiu-se uma distribuição de tensão uniforme para simplificar o problema;
- As tensões de corte e arrancamento apresentam-se elevadas em compósitos laminados perto das extremidades da junta devido às tensões normais e de corte dentro do plano;
- As tensões normais no plano são significativas apenas na vizinhança das extremidades livres. As tensões de corte dentro do plano são consideráveis ao longo da maior parte do comprimento de sobreposição. As tensões dentro e fora do plano nos aderentes com camadas de fibra dispostas angularmente, conduzem a deslocamentos longitudinais e radiais sob cargas torsionais;
- Um comprimento de sobreposição maior leva a uma redução da tensão de corte longitudinal e de arrancamento, e afeta ligeiramente a tensão de corte circunferencial. O aumento da espessura do adesivo diminui a concentração de tensões, mas aumenta a tensão de corte circunferencial. Em ordem a reduzir a concentração de tensões, aplicou-se uma rigidez inferior num adesivo com uma resistência superior;
- De forma a evitar encurvamento e ressonância, geralmente é adequado utilizar em veios camadas de fibra orientadas a 0° e 90° .

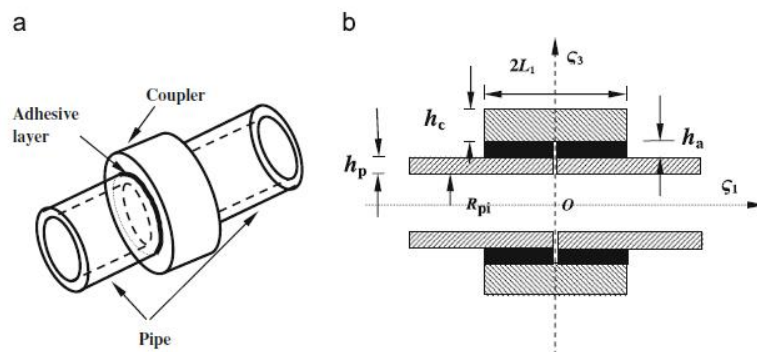


Figura 57 – Esquema da junta tubular em estudo: a) Vista isométrica; b) Vista transversal [135]

2.5.3 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga

O fenómeno de fadiga em estruturas de engenharia consiste na perda da integridade estrutural ao longo do tempo devido à aplicação de esforços variáveis com o tempo. A resposta a este tipo de solicitações é muitas vezes denominada por fadiga estática, contudo o termo “fadiga” é geralmente associado a um carregamento cíclico intermitente. Desta forma, a importância da fadiga em engenharia baseia-se na

frequente ocorrência de rotura sob cargas repetitivas muito inferiores àquelas necessárias para causar rutura quasi-estática.

O fenómeno de fadiga é muito comum para a maioria dos materiais e estima-se que cerca de 80% dos casos de rotura estão relacionados com o mesmo. O custo destas roturas é elevado em termos económicos, mas também quando se trata de vidas humanas. Por este motivo tem-se investido neste tipo de estudos de forma a melhor compreender os mecanismos de fadiga e métodos de previsão dos mesmos [26].

Neste capítulo dá-se ênfase aos fenómenos de fadiga que surgem em juntas adesivas tubulares derivados às diversas solicitações externas a que as mesmas ficam sujeitas e, como tal, são mencionados e descritos alguns trabalhos de forma a fornecer um melhor enquadramento deste tema.

Num estudo experimental conduzido por Knox et al. [137] com o objetivo de investigar o comportamento de uma junta adesiva tubular com 100 mm de diâmetro em tubos de compósito (fibra de vidro e resina de epóxico), foi estudado o comportamento à fadiga para carregamentos axiais e de flexão. Considerou-se a presença de grandes defeitos axissimétricos e, posteriormente, os resultados obtidos foram comparados com dados obtidos através da modelação por modelos finitos, como forma de validação. Do artigo em questão retiraram-se as seguintes conclusões:

- Um carregamento axial à fadiga em juntas tubulares fabricadas por enrolamento filamentar afeta mais a vida útil à fadiga do que um carregamento cíclico devido a pressão interna;
- O envelhecimento do adesivo à temperatura e humidade ambiente pode ser benéfico para a resistência à fadiga a longo prazo;
- Em flexão e tração, temperaturas elevadas (90°C) reduzem a vida útil de fadiga;
- Grandes defeitos axissimétricos podem estar presentes em zonas críticas da ligação adesiva, tais como nas extremidades da mesma e, apesar disso, consegue-se manter a sua integridade por um longo período de tempo.

Reedy et al. [138] investigaram a resistência ao esforço axial e à fadiga em juntas adesivas tubulares de paredes espessas com aderentes em alumínio e compósito (fibra de vidro-E e resina de epóxico). Neste estudo, as amostras (Figura 58) são constituídas pela ligação de um tubo de alumínio com um diâmetro externo de 63 mm, com um de compósito com 6 mm de espessura e 300 mm de comprimento. Os tubos de alumínio com 12,5 mm de espessura foram utilizados sem chanfro, exceto em quatro amostras. Nestas últimas, foi maquinado um chanfro com 1 mm de espessura relativamente à parede exterior do tubo.

Os resultados obtidos através de um estudo por elementos finitos num modelo axissimétrico visaram a comparação posterior com os dados experimentais. Para todas as situações de carga, a rotura na junta inicia-se na extremidade interior da ligação. A rotura surge quando a fenda cresce no adesivo adjacente à interface. Os resultados para

o carregamento à fadiga indicaram que a mesma, de facto, pode degradar severamente o comportamento da junta. Relativamente às juntas com chanfro, o esforço à tração e a resistência à fadiga são substancialmente superiores comparativamente ao caso descrito antes.

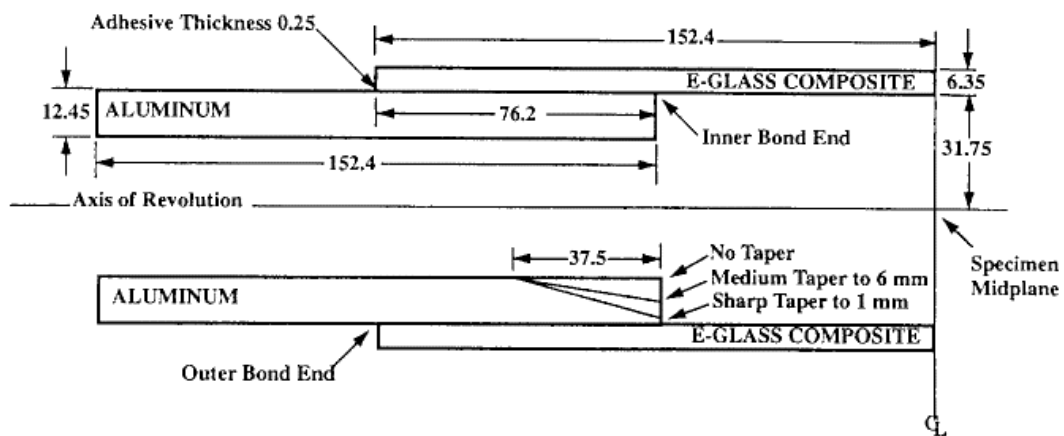


Figura 58 – Dimensões das amostras utilizadas no estudo realizado por Reedy et al. [138]

DESENVOLVIMENTO

3.1 Validação da técnica numérica com dados experimentais

3.2 Estudo numérico

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é exposta em detalhe a descrição dos materiais utilizados nas amostras estudadas. De seguida, procede-se à análise dos ensaios realizados, ao efetuar o estudo dos resultados obtidos a partir das curvas força-deslocamento ($P-\delta$), e resistência das juntas.

3.1 Validação da técnica numérica com dados experimentais

3.1.1 Descrição da geometria e materiais

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais usados no trabalho experimental, mais propriamente os substratos e os adesivos. Seguidamente é realizada uma análise dos resultados dos ensaios e depois efetuada a respetiva comparação com os valores numéricos. Este capítulo tem como finalidade fazer uma avaliação detalhada das propriedades mecânicas de forma a validar a análise por MDC no sentido de os tornar adequados para o posterior estudo paramétrico nas juntas adesivas tubulares.

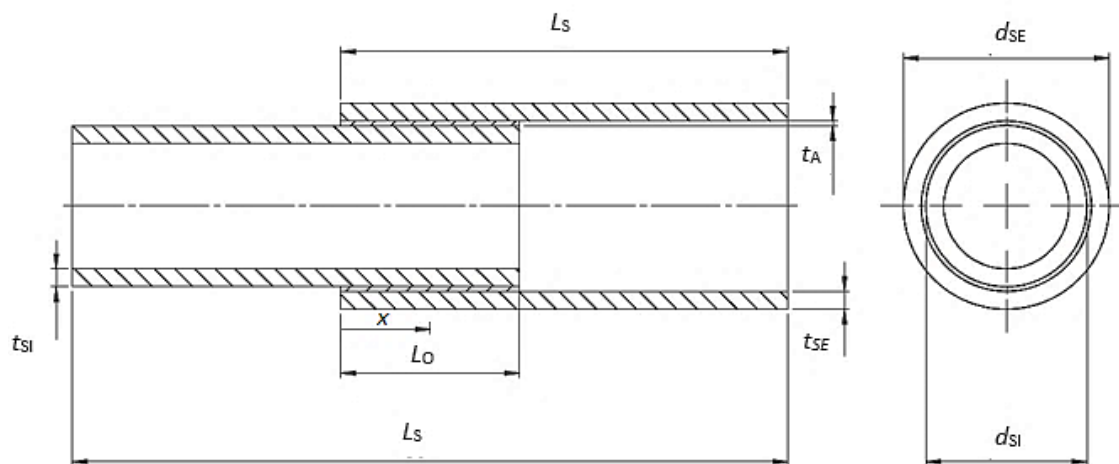


Figura 59 – Configuração da geometria do provete

Na Figura 59 e na Tabela 6 estão representadas respetivamente, a configuração e a designação das cotas utilizadas dos provetes.

Tabela 6 – Designação das cotas dos provetes e respectivos valores (em mm)

Designação	Cota [mm]	
Comprimento de sobreposição, L_O	20	40
Comprimento dos substratos, L_S	50	50
Comprimento total da junta tubular, L_T	80	60
Diâmetro externo do substrato interior, d_{SI}	20,0	20,0
Diâmetro externo do substrato exterior, d_{SE}	22,4	22,4
Espessura do substrato interior, t_{SI}	2	2
Espessura do substrato exterior, t_{SE}	2	2
Espessura do adesivo, t_A	0,2	0,2

Os provetes utilizados possuem uma forma cilíndrica, já que os tubos e alumínio utilizados nas juntas possuem uma secção circular. A espessura do adesivo (t_A) é a mesma para todas as amostras (0,20 mm) tal como a espessura dos substratos interior (t_{SI}) e exterior (t_{SE}) (2 mm). O mesmo sucede relativamente ao diâmetro externo dos tubos: interior (d_{SI}) 20mm e exterior (d_{SE}) 22,40 mm. O comprimento dos substratos (L_S) tem o valor de 50 mm até aos pontos de amarração. Foram concebidas dez amostras para cada um dos três adesivos em estudo, cinco delas com um comprimento de sobreposição (L_O) de 20 mm e as restantes cinco com 40 mm. O valor do comprimento total (L_T) da amostra em estudo depende de L_O .

3.1.1.1 Substratos

Os substratos de todas as juntas adesivas concebidas e estudadas são em alumínio, nomeadamente a liga AW6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só pelas boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [100], onde foram obtidas as seguintes propriedades: resistência à tração de 324,00±0,16 MPa, módulo de *Young* de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência à tração de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura à tração de 21,70±4,24%.

Na Figura 60 é possível observar as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio que foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04

[100]. Está representada também a aproximação numérica usada nos modelos MDC e MEFX [139].

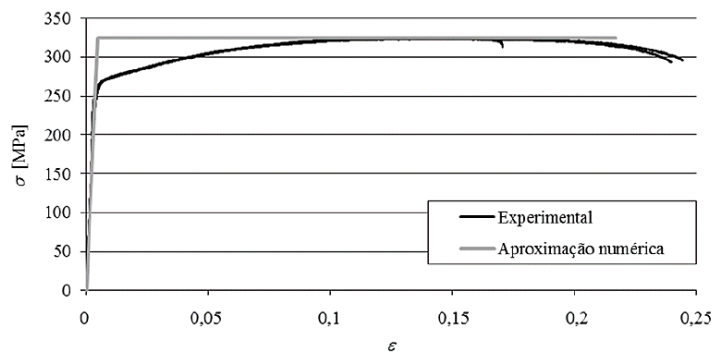


Figura 60 – Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [140]

3.1.1.2 Adesivos

De forma a promover a união entre os substratos, foram selecionados três tipos de adesivos para as juntas adesivas tubulares: Araldite® AV138 (adesivo epóxico frágil), Araldite® 2015 (adesivo epóxico dúctil), e SikaForce® 7752 (adesivo poliuretano estrutural, combina alta ductilidade e resistência moderada).

Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 com o endurecedor HV 998 é um sistema epóxico bi-componente que, quando combinado, apresenta uma excelente resistência química e mecânica. É um adesivo frágil. A combinação dos componentes resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/40 g, respetivamente. A aplicação deste adesivo é feita de forma manual com recurso ao uso de uma espátula [3]. Este adesivo é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [141].

As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 61. Estas curvas foram obtidas experimentalmente. As propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 7.

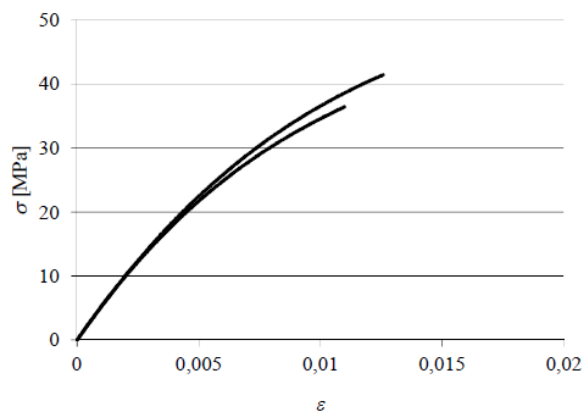


Figura 61 – Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [140]

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [142]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89 ± 0,81
Coefficiente de Poisson, ν^b	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36,49 ± 2,47
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	39,45 ± 3,18
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	1,21 ± 0,10
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	1,56 ± 0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1 ± 0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	30,2 ± 0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	7,8 ± 0,7
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm] ^a	0,20
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm] ^a	0,38

^a valores estimados na referência [142]

^b valor do fabricante

Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural bi-componente, 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 [141].

O Araldite® 2015 é fornecido em cartuchos, possui dois componentes, e a sua cura é efetuada à temperatura ambiente. A sua razão de aplicação é de 50 g/50 g, sendo a mistura realizada por um bico e aplicado por meio de uma pistola de aplicação [3].

As curvas σ - ε de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 62. As propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 8.

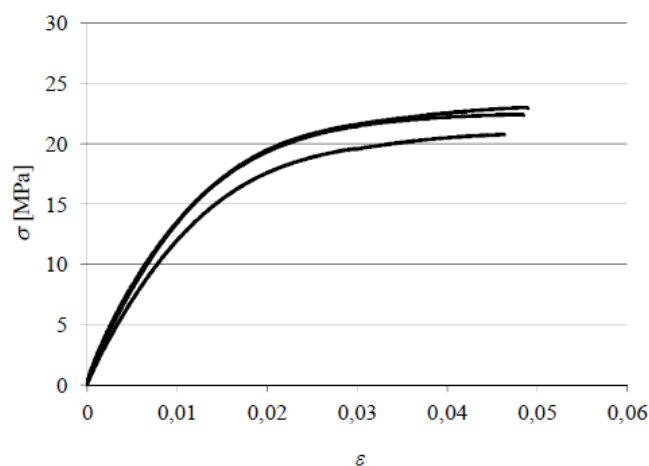


Figura 62 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [141]

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [141]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente de Poisson, ν^a	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$14,60 \pm 1,30$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$17,90 \pm 1,80$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$43,90 \pm 3,40$
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	$4,70 \pm 0,34$

^a valor do fabricante

Comparando os valores da Tabela 7 com os valores da Tabela 8, verifica-se que a deformação de rotura ao corte do adesivo Araldite® 2015 é quase seis vezes superior ao valor apresentado para o adesivo Araldite® AV138. No entanto, a tensão de rotura ao corte do adesivo Araldite® AV138 é praticamente o dobro da registada para o adesivo Araldite® 2015.

Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor (FRW L60). A sua relação de mistura em peso é de 5 para 1. Trata-se de um adesivo dúctil que, comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, é o que apresenta a menor resistência ao corte e à tração.

Na Figura 63 estão representadas as curvas σ - ε do adesivo e na Tabela 9 as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo.

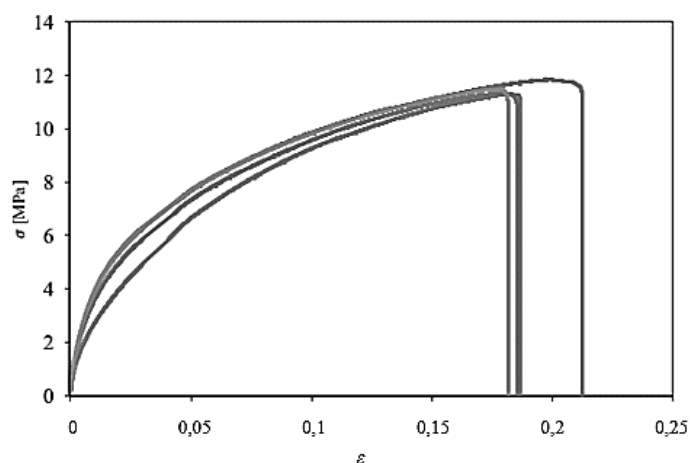


Figura 63 – Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [37]

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas com este adesivo seja elevada, pois o mesmo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são esperadas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [103].

Tabela 9 – Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [37]

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, E [MPa]	493,81 ± 89,6
Coefficiente de Poisson, ν^a	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24 ± 0,5
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	11,49 ± 0,3
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	19,18 ± 1,4
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	187,75 ± 16,4
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16 ± 1,1
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17 ± 0,6
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	54,82 ± 6,4
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	2,36 ± 0,2
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	5,41 ± 0,5

^a valor do fabricante

3.1.2 Resultados experimentais obtidos

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas força-deslocamento (P - δ) para os diferentes adesivos e valores de L_0 . Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ estão apresentados em tabelas, sendo que cada tabela corresponde a um material diferente. Foram realizados cinco ensaios para cada caso e obtiveram-se ruturas coesivas para todas as amostras testadas. Em cada tabela estão apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios para cada valor de L_0 , a força máxima média ($P_{m\acute{a}x}$ Méd), que corresponde à média das forças máximas recolhidas e o desvio padrão, que fornece a dispersão, em termos numéricos e percentuais, dos valores obtidos dos ensaios. A análise destes dados experimentais é de extrema importância pois os mesmos servirão para validar as soluções obtidas pelos estudos numéricos.

3.1.2.1 Araldite® AV138

Na Figura 64 são apresentadas as curvas P - δ . Na Tabela 10 podem-se visualizar os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente, em juntas adesivas tubulares, para o Araldite® AV138 e para os diferentes valores de L_0 , bem como o desvio padrão associado. De referir que alguns provetes foram considerados inválidos e como tal, as respetivas curvas não são apresentadas.

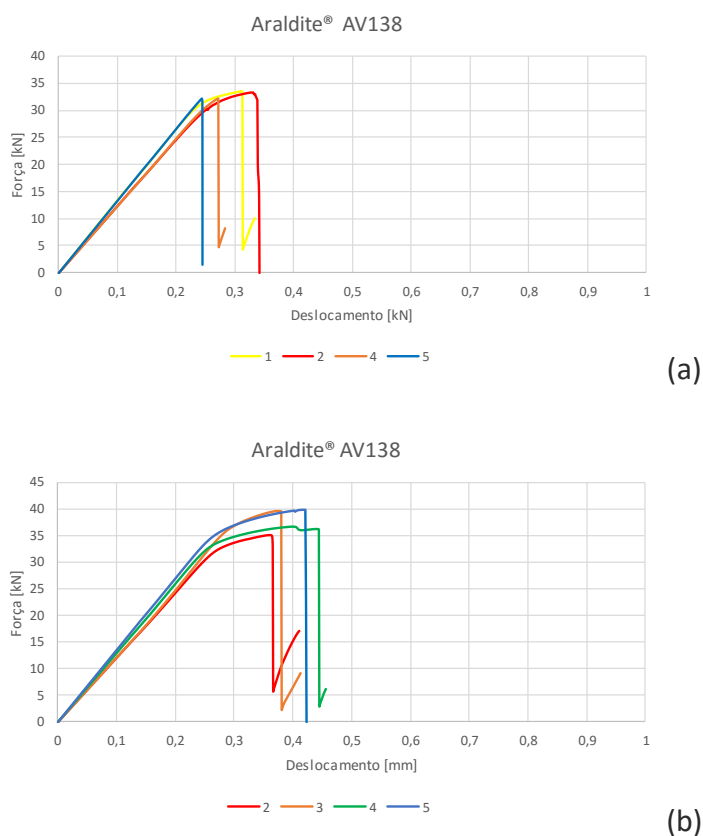


Figura 64 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 64 (a)) verifica-se a ocorrência de plastificação dos substratos nas amostras 1 e 2 (curva vermelha e amarela, respetivamente), muito provavelmente devido a um excesso de adesivo na junta que se infiltrou dentro do tubo interior, gerando uma área de contacto superior à desejada. As restantes amostras apresentam um comportamento linear até à rotura.

Para as juntas adesivas com $L_0=40$ mm (Figura 64 (b)) ocorre a plastificação dos substratos em todas. No geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento para ambos os casos de estudo. Apenas se regista a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina de ensaios e questões de amarração dos provetes. Refira-se

que os provetes cujos valores não são apresentados na Tabela 10 foram considerados inválidos.

Tabela 10 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138

L_0 [mm]						$P_{m\acute{a}x}$ Méd	Desvio Padrão/ %	
	1	2	3	4	5			
20	33468,2	33342,3	-	32162,6	32216,9	32797,5	609,7	1,86
40	-	35209,8	39546,9	36770,2	39902,1	37857,2	1951,1	5,15

Os provetes considerados inválidos foram removidos desta análise uma vez que apresentavam discrepâncias demasiado elevadas entre $P_{m\acute{a}x}$ e $P_{m\acute{a}x}$ Méd. Desta forma, verifica-se uma redução do desvio padrão percentual relativamente ao respetivo valor médio. Com esta ação é possível obter uma boa repetibilidade das curvas $P-\delta$. A dispersão dos valores obtidos é muito reduzida, sendo que o maior desvio padrão percentual registado para o Araldite® AV138 foi nos provetes com $L_0=40$ mm (5,15%). Questões relacionadas com o fabrico dos provetes, constituição dos materiais ou mesmo com a máquina de ensaios, podem ter contribuído para esta diferença.

3.1.2.2 Araldite® 2015

Na Figura 65 são apresentadas as curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Na Tabela 11 é possível observar os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente para o mesmo adesivo, em função de L_0 .

Aqui verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura para $L_0=20$ mm (Figura 65 (a)). Para o caso dos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 65 (b)) já se verifica plastificação dos substratos. No geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento. As pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas observadas para o Araldite® AV138 também são visíveis nestes ensaios, especialmente para $L_0=20$ mm.

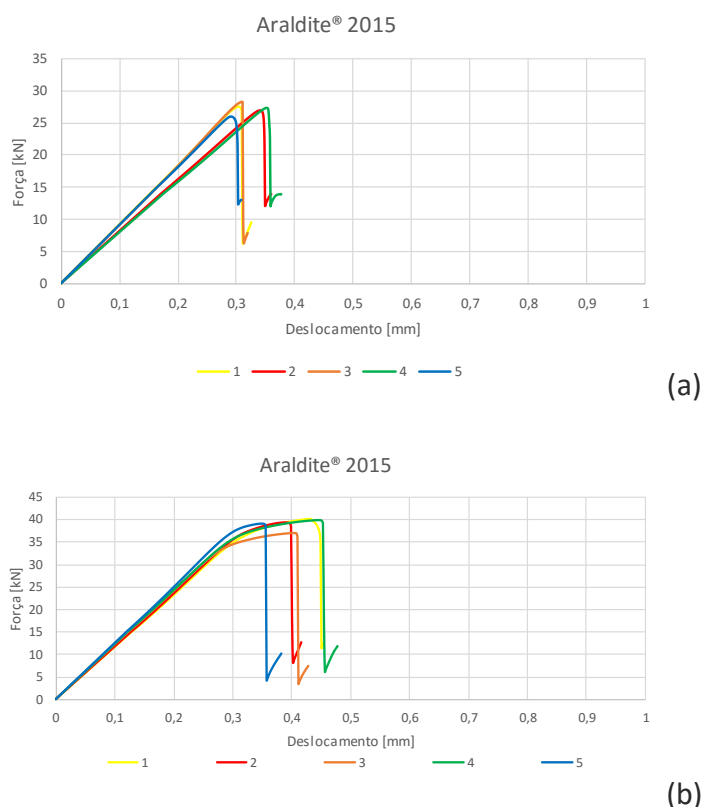


Figura 65 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Tabela 11 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015

L_0 [mm]						$P_{m\acute{a}x}$ Méd	Desvio Padrão/ %	
	1	2	3	4	5			
20	27576,1	26895,8	28306,9	27433,8	25979,6	27238,4	774,1	2,84
40	40062,5	39280,9	36980,6	39958,7	39051,2	39066,8	1112,2	2,84

O adesivo Araldite® 2015 é aquele que apresenta mais coerência em relação à dispersão dos valores obtidos. Tanto para $L_0=20$ mm como para $L_0=40$ mm, o desvio padrão percentual registado foi de 2,84%. Para além de não ser um desvio significativo, foram considerados todos os provetes ensaiados, o que reforça a validade dos dados recolhidos.

3.1.2.3 SikaForce® 7752

Tal como para o adesivo anterior, são apresentadas as curvas $P-\delta$ (Figura 66). Na Tabela 12 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 em função de L_0 .

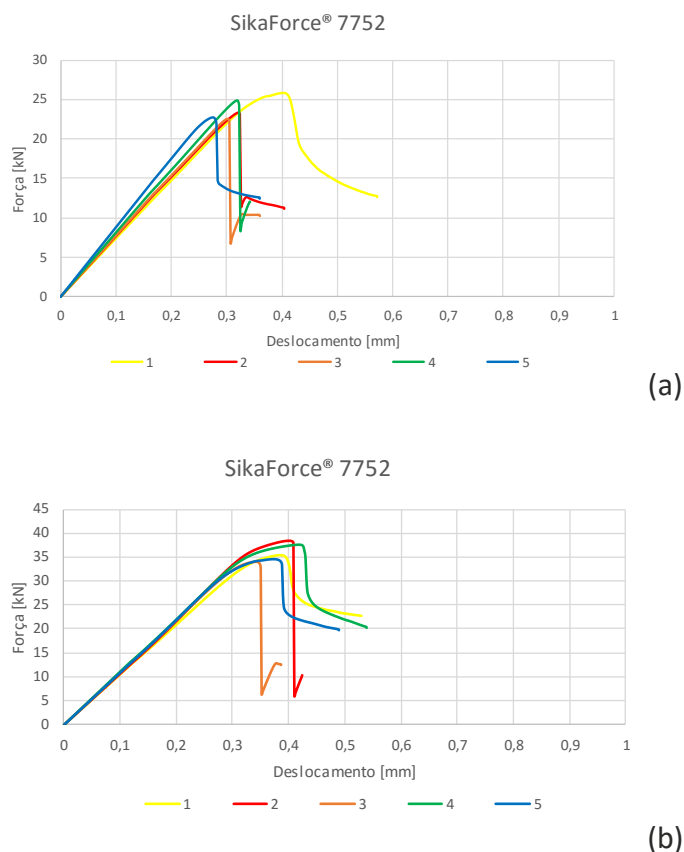


Figura 66 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 66 (a)) verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura, exceto na amostra nº1 (curva amarela). Esta última apresenta plasticidade dos substratos e um deslocamento até à rotura evidentemente superior em comparação com os restantes provetes. Este comportamento pode ter sido o resultado da deposição de uma espessura de adesivo superior à prevista ou por se ter acumulado adesivo em excesso dentro da junta adesiva.

Nos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 66 (b)) observou-se plastificação dos substratos. O provete 3 (curva laranja) apresenta uma deformação até à rotura menor em relação aos outros provetes. Este comportamento poderá ter-se gerado sobretudo devido a uma espessura de adesivo na junta inferior à pretendida.

Apesar das diferenças registadas, em geral assiste-se a uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez. Como foi apontado para os adesivos anteriores, é notória a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas, provocada pela flexibilidade do equipamento de ensaio e problemas da amarração dos provetes.

Tabela 12 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752

L_0 [mm]						$P_{\text{máx}}$	Desvio	
	1	2	3	4	5	Méd	Padrão/ %	
20	25776,6	23329,9	22552,7	24848,6	22774,0	23856,4	1250,6	5,24
40	35247,2	38345,6	33909,8	37634,2	34512,8	35929,9	1749,0	4,87

O adesivo SikaForce® 7752 é, dos três adesivos ensaiados, aquele que apresenta as dispersões mais elevadas: 5,24% para $L_0=20$ mm e 4,87% para $L_0=40$ mm. Contudo, não são desvios significativos em relação aos valores individuais dos ensaios relativamente ao respetivo valor médio. As diferenças registadas entre os valores podem ser justificadas pelos mesmos motivos mencionados no caso do Araldite® AV138.

3.1.3 Comparação de resultados

Na Figura 67 está representada a comparação geral dos valores de $P_{\text{máx}}$ para as juntas com os três adesivos assim como o desvio padrão de cada valor de L_0 , que mostra a dispersão dos valores de $P_{\text{máx}}$ individuais de cada provete relativamente à respetiva média. Na Tabela 13 estão presentes os valores médios da carga máxima em função de L_0 e o aumento percentual dos mesmos, para cada adesivo.

Tabela 13 – $P_{\text{máx}}$ Méd (em N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{\text{máx}}$ [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]
Araldite® AV138	32797,5	37857,2	15,4
Araldite® 2015	27238,4	39066,8	43,4
SikaForce® 7752	23856,4	35929,9	50,6

Relativamente ao Araldite® AV138, para o valor de L_0 de 20 mm, este adesivo apresenta-se como sendo, dos três, o que suporta o maior carregamento (32797,5 N). Para $L_0=40$ mm, $P_{\text{máx}}$ aumenta em cerca de 15,4% até 37857,2 N. Este aumento relativamente reduzido do Araldite® AV138 evidencia a sua fragilidade.

O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{\text{máx}}=27238,4$ N para um $L_0=20$ mm. Contudo, apresenta um aumento percentual muito superior ao Araldite® AV138 devido ao facto de ser um adesivo mais dúctil e, por isso, serão induzidas cargas mais elevadas e,

consequentemente, dá-se a plastificação dos substratos. O aumento percentual é de 43,4% e, por esta razão, para um $L_0=40$ mm, a carga máxima que a junta adesiva suporta é de 39066,8 N, ou seja, apresenta uma resistência superior à do Araldite® AV138.

O adesivo SikaForce® 7752 é aquele que apresenta o maior aumento de resistência percentual (50,6%) entre $L_0=20$ mm e 40 mm. Este acontecimento deve-se ao facto deste adesivo ser o mais dúctil dos três em estudo. Desta forma, para um L_0 de 20 mm, $P_{m\acute{a}x}$ é de 23856,4 N, e para $L_0=40$ mm é de 35929,9 N. Contudo, apesar do grande aumento de resistência na junta adesiva, a carga máxima suportada pelos provetes com o adesivo SikaForce® 7752 manteve-se sempre abaixo dos adesivos anteriormente descritos.

Através da realização dos ensaios experimentais verifica-se que o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 varia consoante o adesivo, o que evidencia um comportamento bastante distinto entre os três adesivos. Deste modo, o adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 são os que oferecem maior resistência para juntas adesivas tubulares para ambos os L_0 , seguidos do Sikaforce® 7752, que apresenta um decréscimo significativo em termos de resistência face aos dois referidos adesivos. Por outro lado, o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752, por se apresentarem como os adesivos mais dúcteis, são os que revelam um maior aumento percentual com o aumento de L_0 .

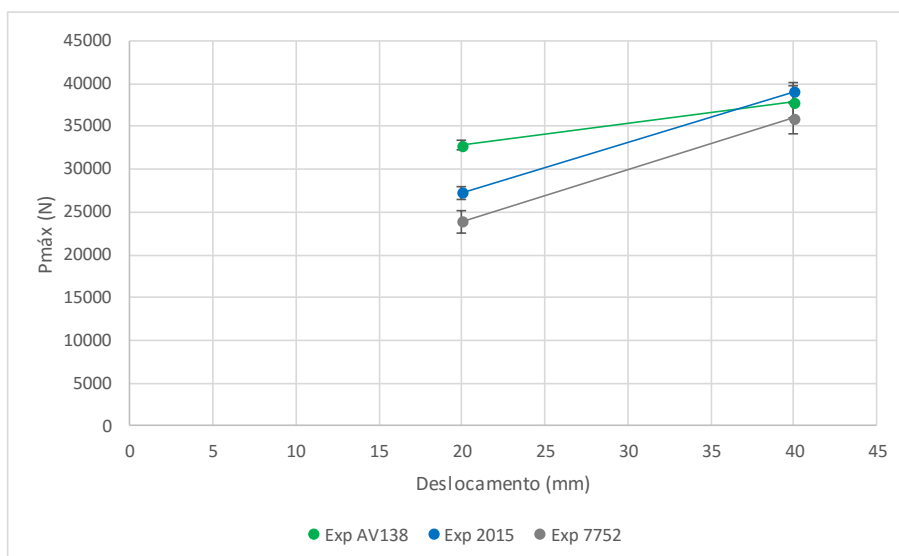


Figura 67 – Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos

3.1.4 Modelo de dano coesivo triangular

O uso de MDC na análise de juntas adesivas requer uma lei constitutiva para descrever o comportamento elasto-plástico da camada de adesivo. Podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de modo a obter resultados mais precisos, em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação [143]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o modelo

triangular [144], o linear-parabólico [145], o exponencial [146], o polinomial [147] e o trapezoidal [148]. Devido a vários fatores, tais como a simplicidade, reduzido número de parâmetros a determinar e resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [149].

A Figura 68 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 δ^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 δ) 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^δ 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 (que corresponde à extremidade da fenda), a separação é igual a δ^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 mesma [150].

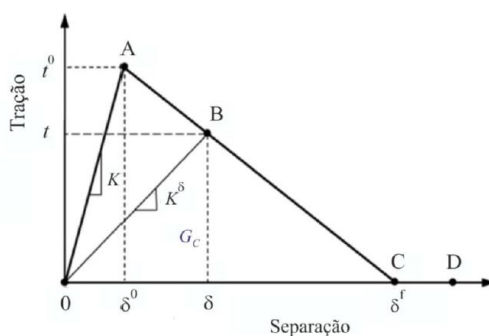


Figura 68 – Lei coesiva triangular [150]

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 δ^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 δ^0 , que corresponde à tração máxima. Estes parâmetros relacionam-se por $\delta^0 = t^0 / K$ [150].

3.1.4.1 Formulação do modelo

O modelo de dano triangular pode ser do tipo 2D ou 3D. No modelo 2D distinguem-se dois modos: o puro e o misto (Figura 69). 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 [95]. 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 [151].

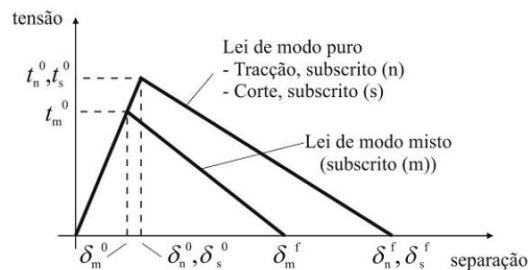


Figura 69 – MDC triangular [142]

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} (1), que relaciona as tensões e deformações em tração e corte nos elementos coesivos. A matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição está dependente da formulação utilizada:

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

No caso de a formulação ser local, os elementos coesivos são usados para simular fraturas de espessura nula. Nestas condições, os parâmetros de K_{COH} possuem valores extremamente elevados, tendo por finalidade não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [152]. Na formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para as ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo a equação (2), onde G é o módulo de elasticidade transversal:

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

Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [151]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério da tensão nominal quadrática, expresso pela expressão (3):

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

“ $\langle \rangle$ ” 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. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 69), a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogos, δ_m^f , é prevista por um critério linear energético, definido pela equação (4), em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} [65]:

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

3.1.4.2 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} . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos em ensaios de adesivo maciço [152, 153]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [154-156]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Araldite® AV138

Na determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso num trabalho anterior [157]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente do procedimento mais indicado. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de adesivo maciço e de corte designados por *Thick Adherend Shear Test* (TAST), respetivamente, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com $L=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e corte (TAST), respetivamente. No referido trabalho [100] foi concluído que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. Na Tabela 14 estão apresentados os parâmetros utilizados na simulação da camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 14 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [100]

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
4890	1560	39,45	30,20	0,20	0,38
MPa				N/mm	

Araldite® 2015

As leis coesivas da camada de adesivo no caso do adesivo Araldite® 2015 foram igualmente determinadas num trabalho anterior [157], por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Esta metodologia consiste basicamente na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respetivamente, 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 respetivo teste de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. Na Tabela 15 estão apresentados os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva de modo misto [158]. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [159] e ensaios TAST, respetivamente.

Tabela 15 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [157],

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
1850	650	21,63	17,90	0,43	4,70
MPa				N/mm	

SikaForce® 7752

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 [160]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de t_s^0 e G_{IIC} obtidos no trabalho de Azevedo [160], 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 [37] 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 [37]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solitação 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) [37], 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 [37]. A Tabela 16 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada do adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 16 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [37]

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

3.1.5 Condições da análise numérica

A análise numérica é baseada no MEF e, para tal, foi escolhido o *software* ABAQUS®, versão 6.13 (*Dassault Systèmes*). É um *software* que, para além de possuir uma extensa biblioteca de elementos e grande aplicação em diversos trabalhos na área da adesão, permite a utilização do módulo integrado de MDC para prever a resistência das juntas adesivas tubulares. Apresentam-se de seguida os procedimentos de pré-processamento da modelação em MEF, fazendo referência aos módulos de *software* em que a informação foi introduzida: *Parts, Property, Assembly, Step, Load* e *Mesh* [27].

A análise de MEF tem por base a utilização de elementos axissimétricos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) de estado plano de deformação para a modelação dos substratos, e elementos coesivos axissimétricos (COHAX4R do ABAQUS®) para a camada do adesivo como aproximação da geometria em análise, que fornece resultados precisos para este tipo de geometrias (Figura 70). O MDC usado é o modelo de dano triangular que existe no ABAQUS® e que se encontra descrito na secção 2.3.2.3. Este modelo caracteriza adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

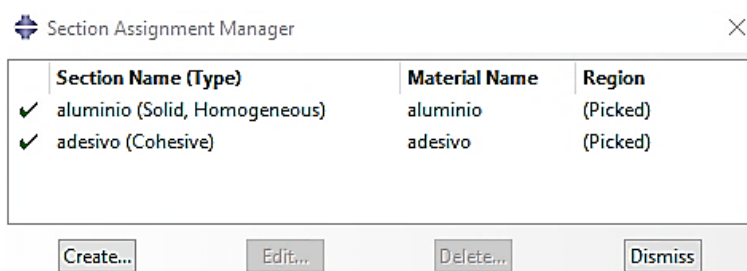


Figura 70 – Atribuição dos respetivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS®

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

1º Passo – Part

Neste passo foi efetuado o desenho da junta adesiva, tal como mostra a Figura 71. Para modelar os substratos e o adesivo desenhou-se apenas um corpo, que foi posteriormente dividido em partições para a atribuição dos respetivos materiais. Na camada do adesivo, modelada por elementos MDC, considerou-se apenas um elemento na direção de t_A . A modelação dos aderentes foi efetuada com elementos axissimétricos deformáveis de estado plano de deformação. Na análise de rotura por MDC considerou-se o comportamento não linear geométrico das juntas.



Figura 71 – Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS®

Na simulação numérica foram construídos modelos com as dimensões de cada configuração de junta testada. A Figura 72 mostra a construção de uma junta com $L_0=20$ mm. Como está em causa a análise de elementos axissimétricos, o eixo de revolução é de extrema importância (assinalado a vermelho na Figura 72), porque além de posicionar o modelo no centro do sistema de eixos, vai ditar o diâmetro da junta adesiva tubular. Desta forma, é possível a obtenção de forças, deslocamentos e tensões na camada de adesivo que se liga os dois tubos de alumínio.

Após o desenho do conjunto substratos-adesivo foi necessário efetuar partições por forma a atribuir diferentes propriedades e diferentes comportamentos às secções (Figura 73).

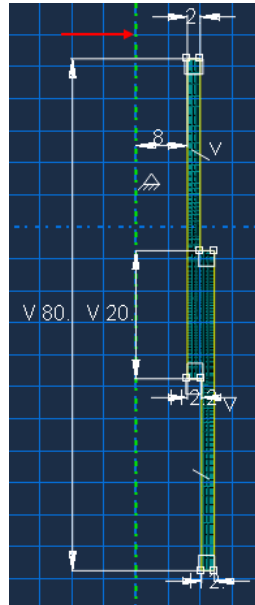


Figura 72 – Desenho 2D de uma junta adesiva tubular com $L_0=20$ mm no ABAQUS®

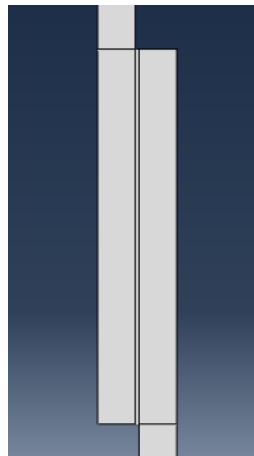


Figura 73 – Diferentes partições existentes no modelo criado no ABAQUS®

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

2º Passo – Property

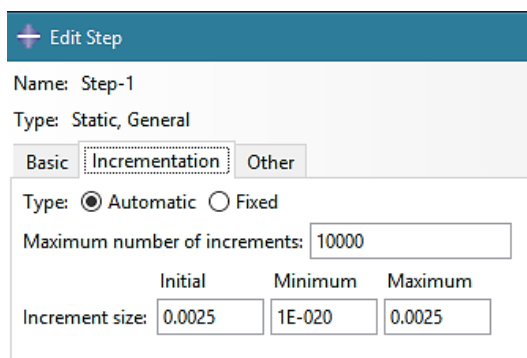
As propriedades mecânicas das partições anteriormente criadas são atribuídas nesta secção (adesivo e substratos). Também neste módulo são criados os materiais e são atribuídas secções às respetivas partições. Na análise por MDC o adesivo é modelado pela aproximação contínua, com uma única linha de elementos coesivos e uma lei de tração-separação triangular, incluindo a rigidez da camada adesiva. O alumínio é modelado considerando a rigidez do material e a sua plasticidade de forma a aferir se os tubos cedem antes ou depois da camada adesiva.

3º Passo – Assembly

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

4º Passo – Step

É nesta secção que os parâmetros de computação da simulação são introduzidos. Na Figura 74 estão descritos os incrementos utilizados e o tamanho dos incrementos. De modo a evitar a paragem da análise por exceder o número de incrementos permitido, foi considerado um valor de 10000 para o número máximo de incrementos a realizar na análise. Considerou-se um tamanho inicial de incremento de 1% do deslocamento aplicado nos modelos. O tamanho máximo do incremento foi também fixo em 1% do deslocamento aplicado. O tamanho mínimo do incremento foi um valor extremamente reduzido para contabilizar a redução de tamanho do incremento que o *software* tem necessidade de aplicar durante a fase da propagação de dano para evitar os problemas de convergência associados.



Increment size:	Initial	Minimum	Maximum
	0.0025	1E-020	0.0025

Figura 74 – Definição de incrementos para análise no ABAQUS®

5º Passo – Interaction

Não é necessário executar nenhuma ação neste módulo uma vez que os modelos são constituídos por uma única peça.

6º Passo – Load

De modo a simular o carregamento de tração é necessário aplicar condições fronteira à junta adesiva. Na Figura 75 é possível visualizar as condições fronteira utilizadas nas simulações realizadas no ABAQUS®. Numa das extremidades do substrato é simulado um encastramento, enquanto na outra extremidade é aplicado um deslocamento vertical (Tabela 17) e uma restrição horizontal à secção.

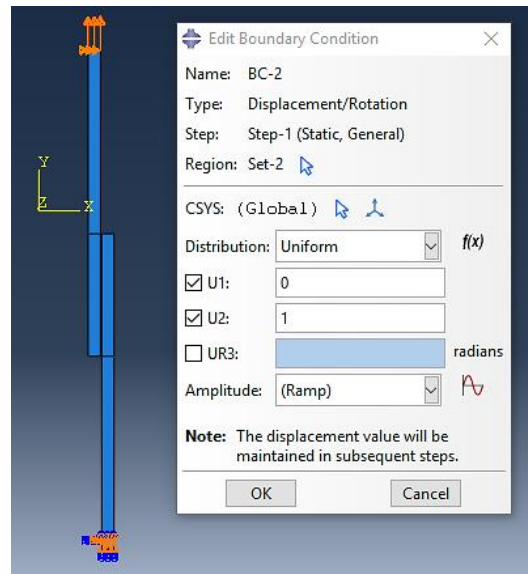


Figura 75 – Representação das condições fronteira na simulação

Tabela 17 – Deslocamentos impostos nos modelos de juntas adesivas tubulares em função do adesivo utilizado e valor de L_0

Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	0,45	0,35
Araldite® 2015	0,4	4
SikaForce® 7752	1,25	1,5

Na Tabela 17 denota-se uma discrepância entre os valores de deslocamento necessários a impor às juntas adesivas tubulares analisadas. Esta discrepância torna-se necessária devido à plastificação que os substratos de alumínio sofreram quando ensaiados com o adesivo Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

7º Passo – Mesh

Neste passo de construção do modelo é efetuada a discretização da geometria em elementos finitos. As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinadas possível. Na junta adesiva existe uma variação das dimensões da malha, mais refinada na zona da camada adesiva e nas suas proximidades, como mostra a Figura 76. Aqui, é possível verificar que as zonas mais próximas das extremidades da sobreposição estão mais refinadas do que o centro da junta.

Devido à necessidade de obter valores com elevada precisão foram atribuídos valores ao número de elementos e ao *bias ratio*, em função de L_0 . O *bias ratio* é definido como o rácio de refinamento crescente ao longo de uma aresta do modelo. Por exemplo, para $L_0=20$ mm existem 61 elementos do meio para extremidade da sobreposição e no caso de $L_0=40$ mm consideraram-se 122 elementos. Os diferentes valores atribuídos têm como finalidade a redução do esforço computacional, garantindo simultaneamente que a precisão dos resultados em zonas com grandes variações de tensões não é comprometida [27]. Seguidamente foi introduzida viscosidade aos elementos coesivos de forma a evitar problemas de convergência, pois torna o processo mais suave. Além disso, foram aplicados os *mesh controls* em função do tipo de elemento.

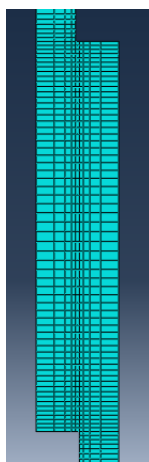


Figura 76 – Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_0=20$ mm

8º Passo – *Job*

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

9º Passo – *Visualization*

Nesta secção visualizam-se os resultados obtidos para a junta adesiva. Na Figura 77 é possível observar uma junta adesiva tubular com $L_0=20$ mm após rotura completa da camada de adesivo. Depois de terminada a simulação, procede-se à análise dos resultados para produzir as curvas $P-\delta$. Através do “output” da criação de dados XY, somam-se todas as reações do encastramento e são retirados os valores do deslocamento para criar as curvas $P-\delta$.

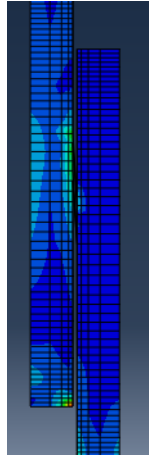


Figura 77 – Aspeto da junta adesiva tubular após a simulação no ABAQUS®

3.1.6 Análise de tensões nas juntas

Neste capítulo é feita a comparação da distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e das tensões de corte (τ_{xy}) a meio da espessura do adesivo para as juntas adesivas tubulares. São considerados os diferentes valores de L_0 de forma a compreender a forma como as mesmas variam em função deste parâmetro. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{avg} , que representa a média de valores de τ_{xy} na ligação adesiva para cada valor de L_0 . As figuras seguintes mostram as distribuições das tensões σ_y e das tensões τ_{xy} em função de x/L_0 ($0 \leq x \leq L_0$), em que x está definido na Figura 59.

3.1.6.1 Tensões de arrancamento

As distribuições das tensões σ_y para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 78.

De uma forma geral verifica-se que as tensões σ_y possuem uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , exceto em zonas localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades devido à geometria das extremidades da junta [127, 161]. Na região interior da camada do adesivo geram-se tensões de compressão e nas suas extremidades tensões de tração devido à curvatura ou deformação transversal da junta, que é governada pela deformação dos substratos e que provoca separação nas extremidades da camada de adesivo e compressão na zona intermédia da mesma. As tensões de arrancamento originam uma diminuição da resistência das juntas adesivas, podendo levar à sua rotura prematura [152, 162]. As tensões σ_y na região central da sobreposição são aproximadamente nulas, com gradientes crescentes ao longo da sobreposição com o aumento de L_0 .

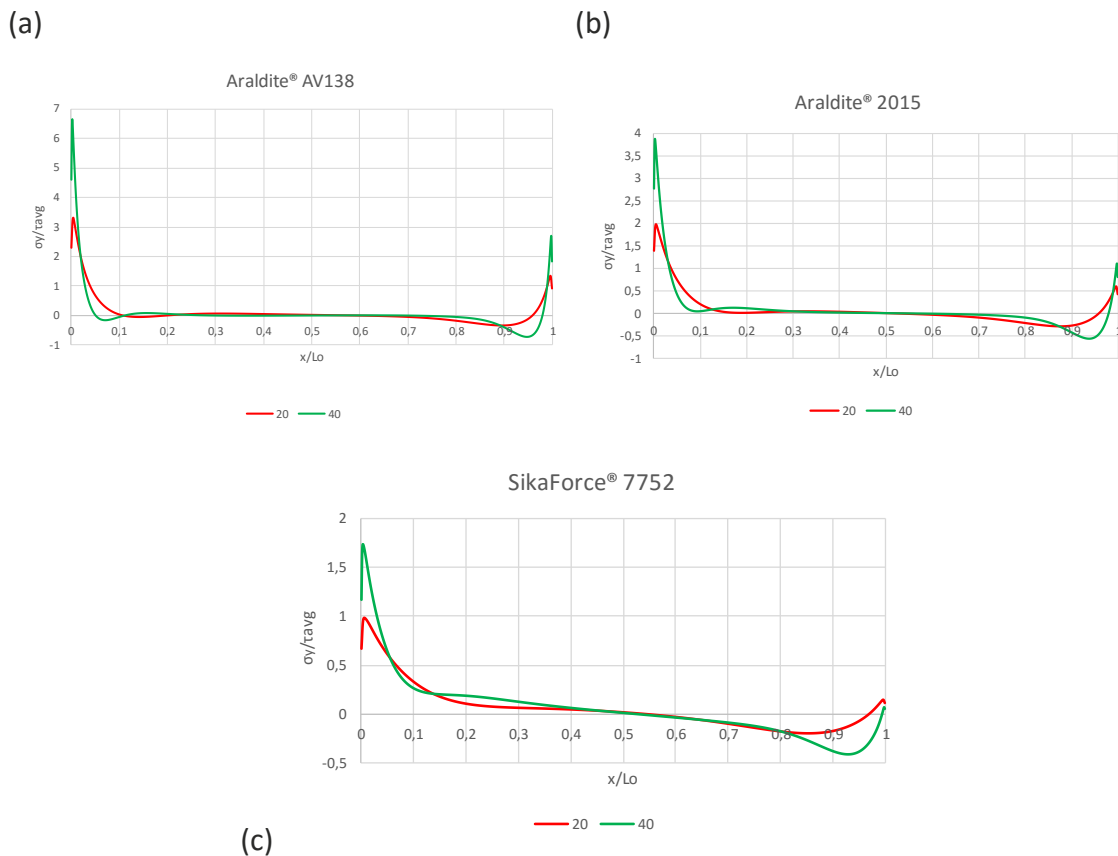


Figura 78 – Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Para valores de L_0 mais elevados, observam-se picos compressivos na proximidade das singularidades, que aumentam de magnitude com L_0 . Ao mesmo tempo, as tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo tornam-se menos significativas. Esta tendência tende a parar a propagação de dano após dano localizado nas zonas de singularidades [163], o que justifica algumas vezes que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é obtido após a iniciação da fenda [164]. O aumento dos picos de tensão com o aumento de L_0 deve reduzir a resistência média da junta na área de ligação, especialmente para juntas com adesivos frágeis [165].

A partir dos gráficos apresentados na Figura 78 é possível verificar que o adesivo Araldite® AV138, comparativamente com os outros dois adesivos, possui gradientes mais elevados na proximidade de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, que correspondem às extremidades de L_0 na junta da camada de adesivo. Este adesivo possui uma rigidez elevada, o que origina estes picos de concentração de tensões mais elevados que podem levar à rotura prematura da junta. Na Tabela 18 estão presentes os valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, em função de L_0 . É possível verificar que tanto para um $L_0=20$ mm como para um $L_0=40$ mm, o adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta picos de

concentração de tensões mais elevados, quando comparado com os outros dois adesivos.

O SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta os menores valores de σ_y/τ_{avg} . Estes resultados mostram-se lógicos e satisfatórios pois este adesivo é o que apresenta menor rigidez. Como é possível observar na Figura 78 (c), formaram-se picos de concentração de tensões nas extremidades da junta adesiva claramente inferiores aos dos outros adesivos (Tabela 18).

Tabela 18 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	3,30	6,65
Araldite® 2015	1,99	3,88
SikaForce® 7752	0,98	1,73

3.1.6.2 Tensões de corte

As distribuições das tensões τ_{xy} para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 79.

Tal como para a distribuição de tensões σ_y , a distribuição de tensões τ_{xy} demonstra valores mais reduzidos na região central de L_0 e atinge o máximo nas extremidades da sobreposição [166, 167]. Isto deve-se à deformação diferencial de cada um dos tubos ao longo da sobreposição, que é nula na sua extremidade livre e aumenta progressivamente até à extremidade oposta [40, 43, 168]. Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Os gradientes de tensão τ_{xy} aumentam com L_0 devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos substratos causado pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas adesivas em que se empreguem adesivos frágeis a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões σ_y e τ_{xy} não permitirem plastificação nas extremidades da sobreposição [168]. Por sua vez, os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição de tensões nessas regiões, ao mesmo tempo que a região interna da sobreposição é gradualmente colocada sob cargas crescentes, o que possibilita um aumento da resistência da junta [152, 169].

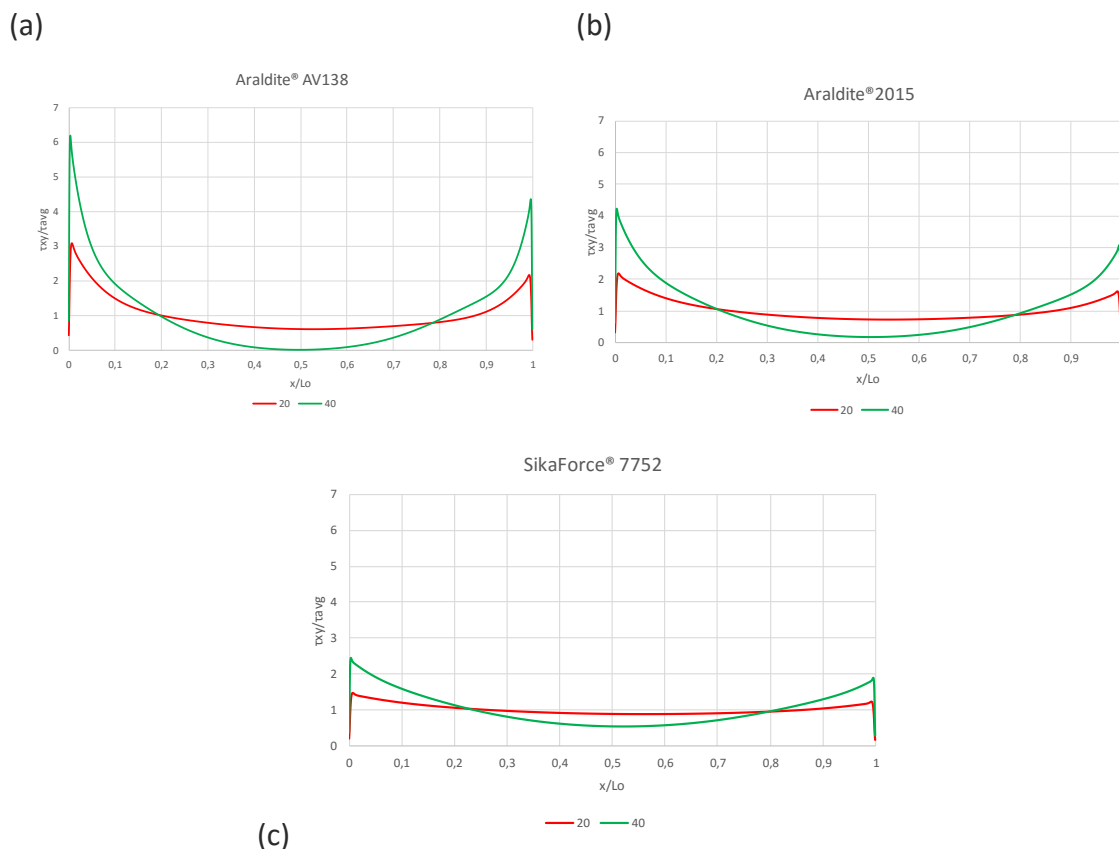


Figura 79 – Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

O valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} observado foi para o Araldite® AV138 (Tabela 19). Este é o adesivo mais frágil dos três e, por esta razão geram-se picos de concentração de tensões τ_{xy} muito elevados nas extremidades das juntas. Como tal, o valor de rigidez que apresenta pode condicionar a resistência da junta e conduzir a uma rotura prematura da mesma. O mesmo se verifica para o caso do Araldite® 2015. Contudo, como este adesivo apresenta uma rigidez inferior quando comparado ao Araldite® AV138, os picos gerados apresentam valores inferiores. Tal como sucedeu durante a análise de tensões ao arrancamento, o adesivo SikaForce® 7752 demonstrou ser o menos resistente uma vez que os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} registados são os mais baixos, devido a um E inferior em relação aos outros adesivos (Tabela 19).

Tabela 19 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	3,08	6,19
Araldite® 2015	2,19	4,24
SikaForce® 7752	1,46	2,43

3.1.7 Previsão da resistência por MDC

Neste capítulo faz-se a comparação dos resultados dos ensaios experimentais com as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ pelos MDC, de forma a efetuar a respetiva validação das propriedades obtidas nas análises numéricas. Com isto, será possível a posterior realização do estudo paramétrico uma vez que os valores das constantes de engenharia utilizadas estarão de acordo com a realidade.

Segue-se a apresentação das curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC (Figura 80, Figura 81 e Figura 82, para o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente).

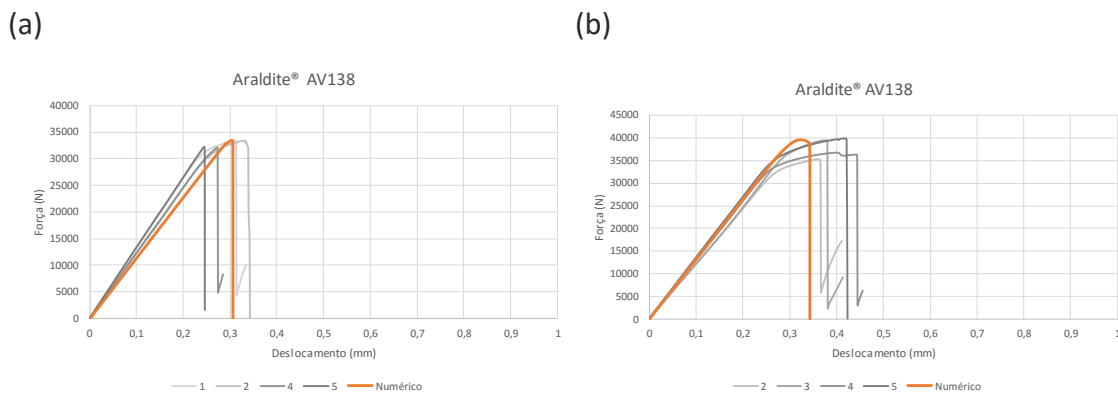


Figura 80 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

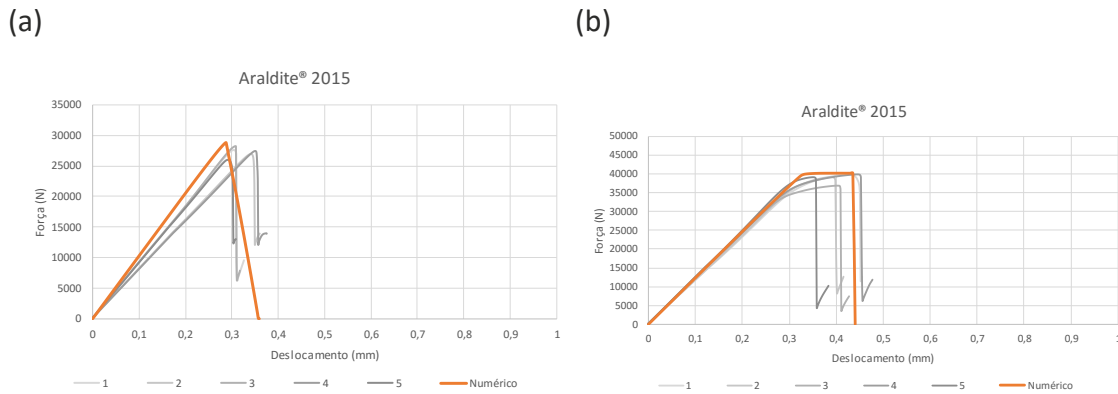


Figura 81 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

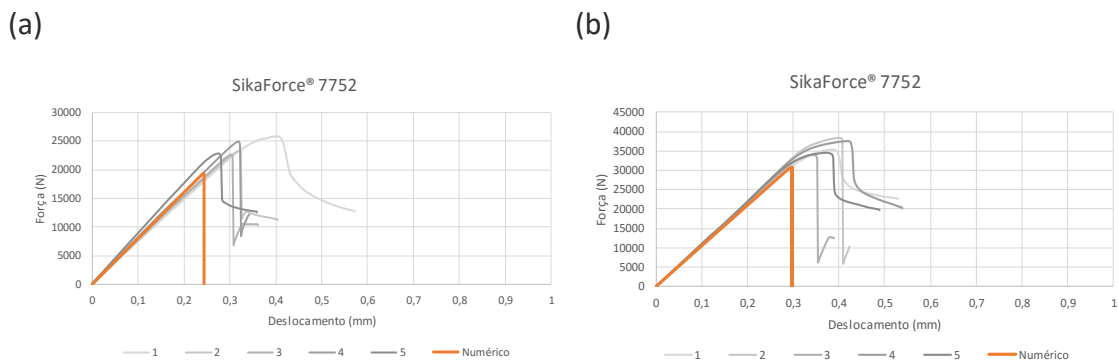


Figura 82 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

A correlação geral para as juntas adesivas tubulares foi bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas em que se empregou os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (Figura 80 e Figura 81, respetivamente), em relação à $P_{m\acute{a}x}$, rigidez e deslocamento de rotura [139]. No caso do SikaForce® 7752 (Figura 82), uma vez que se trata de um adesivo muito dúctil, as leis triangulares do MDC subestimaram os resultados experimentais [3], por esta razão os resultados experimentais ($P_{m\acute{a}x}$ e deslocamento) são um pouco maiores que os numéricos. Contudo, existe uma boa correlação das curvas obtidas experimentalmente para este adesivo.

3.1.8 Discussão dos resultados obtidos

Observou-se que o adesivo Araldite® AV138 consegue uma resistência superior relativamente ao Araldite® 2015 e ao SikaForce® 7752 (Tabela 20). Esta diferença é bem evidente para um $L_0=20$ mm, cujo $P_{m\acute{a}x}\approx 33$ kN. Com o aumento de L_0 (até 40 mm), o Araldite® 2015 passa a apresentar um comportamento superior ao do Araldite® AV138 devido à plastificação que ocorre antes da rotura. Desta forma é possível que um adesivo dúctil apresente uma resistência similar à de um adesivo frágil, devido à capacidade

limitada de plastificação deste último mencionado [30]. Assim, o resistente mas frágil Araldite® AV138 permite um valor mais elevado de $P_{máx}$ do que os restantes adesivos para $L_0=20$ mm, mas a ductilidade característica do Araldite® 2015, como foi mencionado na secção 3.1.3, permitiu um aumento percentual de 43,4% e, como tal, um aumento significativo de $P_{máx}$, superando o $P_{máx}$ do Araldite® AV138. O Sikaforce® 7752 combina uma alta resistência e ductilidade, e a rotura ocorre em condições que se assemelham à plastificação generalizada até grandes valores de L_0 [169]. As juntas com este adesivo apresentaram-se como sendo as menos resistentes, uma vez que tanto para $L_0=20$ mm como para $L_0=40$ mm, $P_{máx}$ foi sempre inferior aos outros adesivos. Por outro lado, uma vez que se trata de um adesivo extremamente dúctil, o elevado aumento percentual (50,6%) permitiu uma grande subida de $P_{máx}$, aproximando-o dos restantes adesivos para $L_0=40$ mm.

Posto isto, verifica-se que o Araldite® 2015 e o SikaForce®, que são os adesivos mais dúcteis, apresentam aumentos percentuais elevados entre $L_0=20$ mm e 40 mm. Este comportamento provoca um aumento de $P_{máx}$, o que origina uma melhoria substancial do seu comportamento mecânico. Pelo facto de o Araldite® AV138 ser um adesivo frágil, a sua capacidade de plastificação é bastante limitada. Por esta razão, o seu aumento percentual foi de apenas 15,4%. Tal facto induziu uma rotura das juntas praticamente no momento em que as tensões nas extremidades atingem o valor limite.

Tabela 20 – Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0

Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	32797	37857
Araldite® 2015	27238	39067
SikaForce® 7752	23856	35930

Os resultados das juntas adesivas tubulares apresentam diferentes tendências, dependendo das características dos adesivos (rigidez, resistência e ductilidade). O módulo de elasticidade (E) dos adesivos está intimamente relacionado com a sua rigidez e influencia a distribuição das tensões e conseqüentemente a resistência: um adesivo com menor valor de E tem uma distribuição de tensões mais uniforme (Figura 79) [26].

No que concerne às tensões σ_y (Figura 78), na extremidade interior da ligação registam-se picos de compressão [170]. Isto deve-se sobretudo ao carregamento simétrico nas

juntas, que evita a deflexão transversal do substrato interior [33, 95]. Com isto ocorre uma redução generalizada das tensões de pico σ_y para todos os valores de L_0 [171]. Na região central os valores das tensões σ_y são aproximadamente nulos, com gradientes crescentes para as extremidades da sobreposição com o incremento de L_0 .

No que respeita ao perfil de tensões τ_{xy} (Figura 79), verificam-se picos de tensões τ_{xy} de maior magnitude na extremidade exterior, ao passo que na extremidade oposta os picos de tensões τ_{xy} são menos preponderantes. Isto é decorrente da solicitação a que o substrato intermédio é sujeito, que se traduz na indução de cargas elevadas na proximidade de $x/L_0=0$ [30].

Dos três adesivos ensaiados, o Araldite® AV138 é aquele que apresenta maior valor de E . Por este motivo é que este adesivo apresenta os maiores picos de concentração de tensões, como se pode observar a partir dos perfis das tensões σ_y e τ_{xy} (Figura 78, Figura 79, Tabela 18 e Tabela 19). Este comportamento é mais evidente para valores de L_0 mais elevados. A Figura 78 e a Figura 79 mostram que os perfis das tensões σ_y e τ_{xy} tornam-se mais constantes com a redução de L_0 , o que torna as sobreposições menores mais dependentes da resistência do adesivo. Por outro lado, um adesivo frágil sofre rotura quando a resistência limite é atingida nas extremidades da zona de ligação, enquanto os adesivos dúcteis permitem uma plastificação nas extremidades de sobreposição, ao mesmo tempo que o interior da zona de ligação aumenta a sua contribuição para a resistência da junta [172].

Com isto, é possível aferir que o adesivo Araldite® AV138 é o que confere à junta adesiva tubular a maior resistência mecânica. Por outro lado, trata-se de um adesivo frágil, ou seja, à semelhança dos gradientes de tensões σ_y , verifica-se que os gradientes de tensão τ_{xy} são extremamente prejudiciais para a resistência das juntas. A fratura ocorre no momento em que é atingida τ_f e também devido à capacidade de plastificação quase nula destes adesivos [168]. O adesivo Araldite® 2015, devido à menor rigidez, apresenta picos de tensões de magnitude inferior ao Araldite® AV138. Para além disto, a ductilidade característica deste adesivo permitiu uma distribuição mais uniforme das tensões por toda a zona de sobreposição. O SikaForce® demonstrou ser o adesivo menos resistente dos três. A partir do perfil de tensões τ_{xy} da Figura 79 (c) é fácil constatar uma boa uniformidade na distribuição de tensões, mais óbvia para valores de L_0 inferiores (20 mm). Os picos de tensão gerados são muito reduzidos quando comparados com os dos outros adesivos, o que é benéfico à ligação adesiva, pois reduz a probabilidade da mesma sofrer uma rutura prematura (desde que a carga aplicada esteja dentro dos limites de resistência do material).

3.1.9 Validação dos resultados obtidos pelo MDC a partir dos resultados experimentais

Neste subcapítulo pretende-se aferir a validade dos resultados numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pela lei coesiva triangular, a partir da sua comparação com resultados

experimentais. A Figura 83 representa os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 e as previsões numéricas, considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

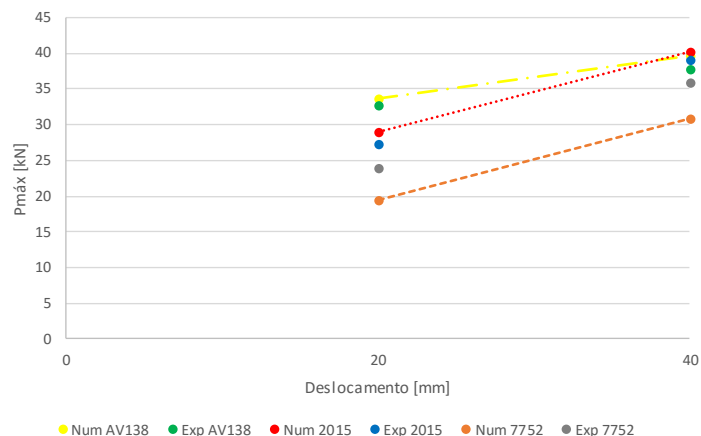


Figura 83 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares

Na Tabela 21 estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para os três adesivos, em função de L_0 . Na mesma estão igualmente presentes as diferenças relativas para cada um, de forma a permitir uma maior facilidade na comparação dos mesmos.

Tabela 21 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respetiva diferença relativa

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752	
L_0 [mm]	20	40	20	40	20	40
Experimental	32797	37857	27238	39067	23856	35930
Numérico	33568	39631	28897	40210	19455	30779
Diferença relativa [%]	2,4	4,7	6,1	2,9	-18,4	-14,3

As previsões da Figura 83 demonstraram, de um modo geral, que os valores obtidos por MDC e experimentais relativamente a $P_{m\acute{a}x}$ são muito próximos para as juntas adesivas tubulares com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Por outro lado, observa-se uma discrepância não desprezável para o adesivo SikaForce® 7752.

O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta as menores diferenças relativas entre os resultados experimentais e numéricos. Para $L_0=20$ mm a diferença relativa foi de 2,4%

e, para $L_0=40$ mm, de 4,7%. Os valores numéricos são ligeiramente superiores aos experimentais, contudo é uma diferença muito reduzida e, como tal, consideram-se estes resultados adequados.

Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, verifica-se uma diferença percentual entre os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos de 6,1% para $L_0=20$ mm (com os valores obtidos pelo MDC superiores aos experimentais). Esta discrepância é aceitável pois é, de facto, muito reduzida, uma vez que $P_{m\acute{a}x}$ experimental ≈ 27 kN e $P_{m\acute{a}x}$ numérico ≈ 29 kN. Esta percentagem torna-se ainda mais reduzida para $L_0=40$ mm (2,9%). Posto isto, tal como sucedeu com o Araldite® AV138, apesar das pequenas diferenças observadas, aceitam-se os valores obtidos pelo MDC e, como tal, consideram-se estes resultados adequados.

No caso das juntas com o adesivo SikaForce® 7752, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo método numérico são bastante inferiores. Isto acontece porque, para juntas adesivas com adesivos dúcteis simulados com leis coesivas triangulares, podem surgir previsões aquém do expectável, dada a depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva [141]. No entanto, alguns trabalhos sobre delaminação em compósitos mostraram que leis coesivas pouco adequadas para modelar um determinado material ainda permitem obter uma aproximação grosseira do seu comportamento, desde que os valores de resistência coesiva (t_n^0 e t_s^0) e de tenacidade à fratura (G_{IC} e G_{Ic}) tenham sido estimados corretamente [173]. Posto isto, a diferença entre os valores experimentais e do MDC para o SikaForce® 7752 é bastante evidente: 18,4% para $L_0=20$ mm e 14,3 para $L_0=40$ mm, com os valores experimentais superiores aos numéricos. Portanto, tendo em conta os fatores envolvidos, aceitam-se os valores obtidos numericamente, apesar da respetiva dispersão de valores.

Após esta análise, consideraram-se os resultados numéricos obtidos válidos e, como tal, adequados para serem utilizados como fonte de comparação para o estudo paramétrico.

3.2 Estudo numérico

Nesta secção da dissertação procede-se ao estudo paramétrico das juntas adesivas tubulares descritas no subcapítulo 3.1.1. Nas seguintes análises por MDC apresentadas são utilizadas as propriedades dos materiais que foram validadas a partir dos ensaios experimentais (ver secção 3.1.9).

Este estudo consiste na alteração dos parâmetros geométricos das juntas adesivas tubulares e verificar, a partir das curvas $P-\delta$ e dos gradientes de tensões σ_y e τ_{xy} , as alterações na resistência das mesmas. Os estudos numéricos desta secção foram efetuados a partir das seguintes alterações geométricas: variação do comprimento de

sobreposição, variação da espessura dos aderentes, aplicação de filete de adesivo e aplicação de chanfro externo e interno nos aderentes.

3.2.1 Estudo dos parâmetros geométricos principais

Nesta secção da dissertação é realizada a análise da resistência das juntas e do seu comportamento em função das tensões instaladas para os principais parâmetros geométricos. Como parâmetros geométricos, consideraram-se L_0 e a espessura dos substratos. Inicialmente é realizado o estudo numérico considerando a variação de L_0 , num intervalo de 10 mm a 50 mm. A partir do momento em que se procede à análise das juntas adesivas tubulares variando a espessura dos tubos de alumínio, foi necessário dividir este ponto em três distintos: 1º considerando apenas a alteração de t_{SI} ; 2º considerando apenas a variação de t_{SE} ; 3º considerando a variação da espessura de ambos os substratos. A espessura dos tubos varia entre 1 mm e 5 mm. Para os modelos que sofrem alteração na espessura de apenas um tubo, considerou-se uma espessura constante de 2 mm para o outro tubo da junta adesiva tubular. Para estes casos descritos admitiu-se um L_0 constante de 40 mm.

3.2.1.1 Comprimento de sobreposição

A primeira alteração geométrica estudada a partir dos MDC no ABAQUS® foi a variação de L_0 . Este parâmetro geométrico é que vai mais de encontro ao estudo experimental efetuado nas juntas adesivas tubulares, uma vez que foram ensaiadas amostras com $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm. Como tal, procedeu-se à variação de L_0 de 10 mm a 50 mm para os três adesivos, de forma a dar continuidade ao estudo, aferir a evolução da distribuição das tensões σ_y e τ_{xy} e como as mesmas influenciam o comportamento das juntas adesivas tubulares.

3.2.1.1.1 Distribuições de tensões

3.2.1.1.1.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 84 estão presentes as distribuições σ_y para os três adesivos, em função da variação de L_0 , e na Tabela 22 estão os valores máximos de σ_y/τ_{avg} para cada um destes casos. Estes dados apresentados são fulcrais para entender a evolução do comportamento das juntas adesivas tubulares em termos de resistência mecânica.

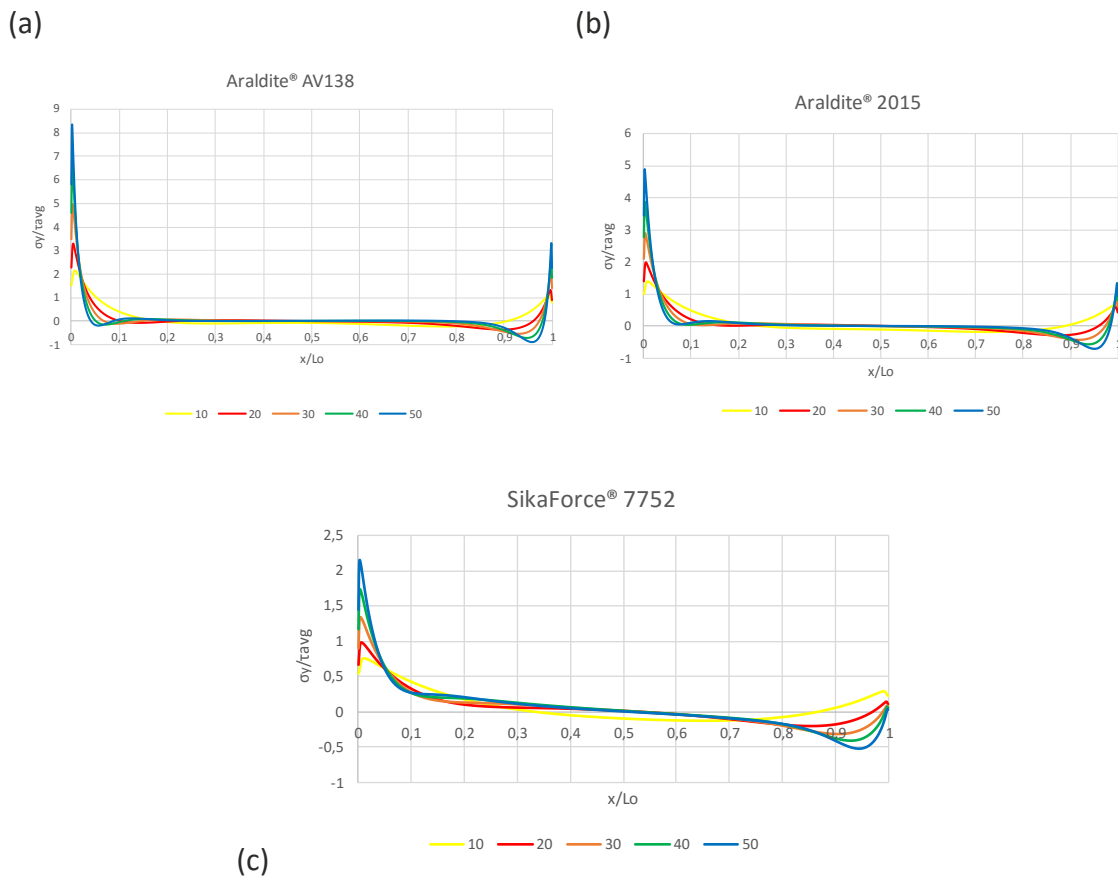


Figura 84 – Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação de L_0 : (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

A partir das distribuições de tensões σ_y apresentadas, denota-se uma tendência crescente das tensões de pico, com o aumento de L_0 . O aumento de L_0 resulta num aumento da rigidez da junta adesiva e, como tal, passa a existir uma maior capacidade de absorção da energia imposta pelo carregamento e, conseqüentemente, um aumento de tensões instaladas. O adesivo Araldite® AV138 apresenta um valor elevado de E . Como tal, os valores mais elevados de σ_y/τ_{avg} registados são os do adesivo Araldite® AV138 (Figura 84 e Tabela 22). Os picos de concentração de tensões σ_y encontram-se nas extremidades da junta adesiva, para $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$. Isto acontece porque nas suas extremidades são geradas tensões de tração devido à curvatura ou deformação transversal da junta [152, 162]. Próximo dos picos de tensão de arrancamento observam-se ligeiros picos de tensões compressivas. Por outro lado, as tensões σ_y são praticamente nulas na zona central da junta adesiva.

Tabela 22 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, em função de L_0

Adesivo	L_0 [mm]				
	10	20	30	40	50
Araldite® AV138	2,16	3,30	4,98	6,65	8,37
Araldite® 2015	1,40	1,99	2,90	3,88	4,88
SikaForce® 7752	0,76	0,98	1,34	1,73	2,16

A partir da Tabela 22 observa-se que o valor máximo é de $\sigma_y/\tau_{avg} \approx 8,37$, para o Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm. O segundo mais elevado é o do Araldite® 2015, com $\sigma_y/\tau_{avg} \approx 4,88$, também para $L_0=50$ mm. Tal como esperado, as juntas com o SikaForce® 7752 são as que apresentam picos concentração de tensões mais reduzidos, uma vez que se trata de um adesivo extremamente dúctil. No geral, verifica-se uma boa coerência no que toca à evolução das tensões σ_y/τ_{avg} em função de L_0 para os três adesivos, uma vez que se regista um aumento das mesmas devido à crescente rigidez global das juntas, causadas pelo aumento de L_0 .

3.2.1.1.1.2 Tensões de corte

No que toca às tensões τ_{xy} , é possível observar as respetivas distribuições a partir da Figura 85 para os três adesivos, em função da variação de L_0 . Na Tabela 23 estão os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para cada caso analisado.

A partir da análise das distribuições das tensões τ_{xy} , é possível observar que existe alguma simetria nas curvas relativamente aos valores das tensões de pico. Neste caso de estudo, está presente uma tendência crescente das tensões de pico com o aumento de L_0 . Para valores de L_0 inferiores, a distribuição de tensões é mais uniforme, uma vez que existe uma taxa de deformação diferencial inferior entre os tubos interior e exterior na zona de ligação. Aliado a este facto, a diminuição de L_0 provoca uma diminuição da rigidez global da junta que, por sua vez, contribui para uma distribuição mais uniforme das tensões τ_{xy} . Os valores mais elevados de τ_{xy}/τ_{avg} em função de L_0 registados são os do Araldite® AV138, uma vez que se trata de um adesivo rígido (Tabela 23).

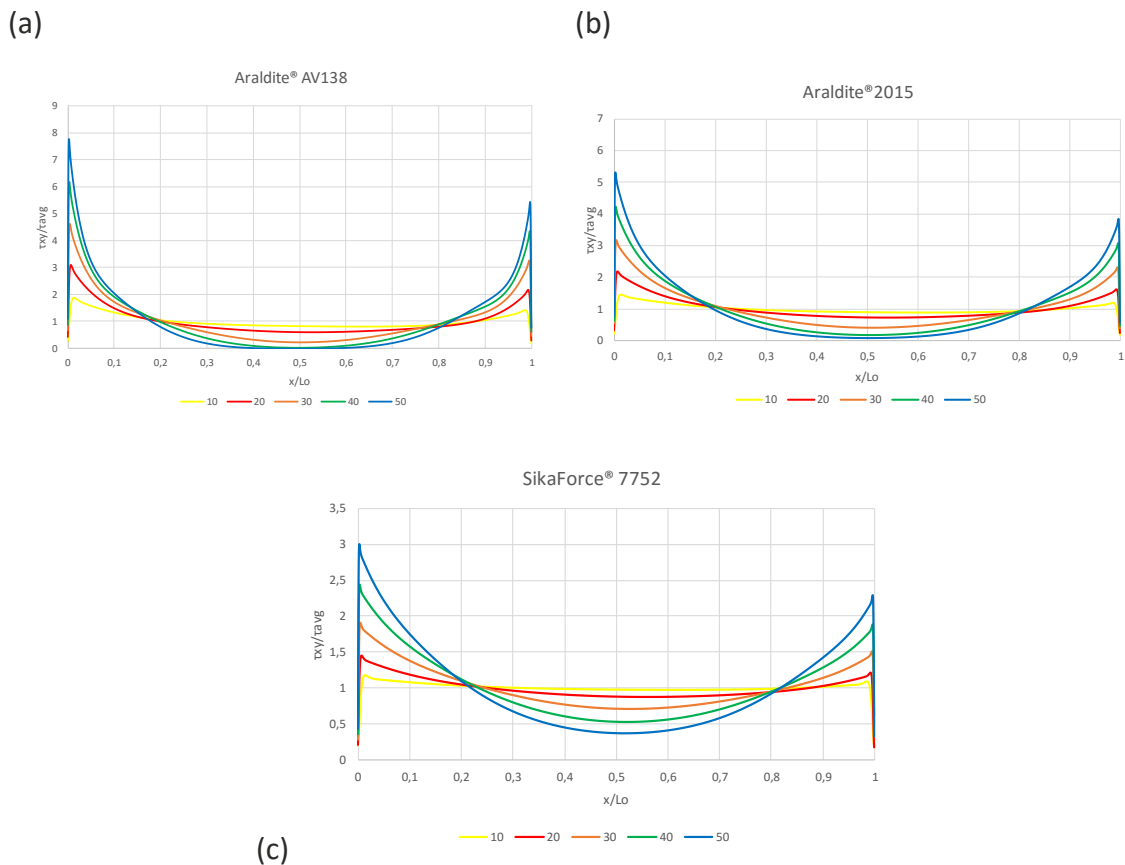


Figura 85 – Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação de L_0 : (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Tabela 23 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, em função de L_0

Adesivo	L_0 [mm]				
	10	20	30	40	50
Araldite® AV138	1,87	3,09	4,63	6,19	7,75
Araldite® 2015	1,46	2,19	3,19	4,24	5,31
SikaForce® 7752	0,76	0,98	1,34	1,73	2,16

A partir da avaliação dos valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} , verifica-se que o Araldite® 2015 é o que apresenta os picos de tensões mais elevados depois dos do Araldite® AV138, à

semelhança do que aconteceu na distribuição das tensões σ_y . O SikaForce® 7752, mais uma vez, é o adesivo que permite uma distribuição mais uniforme das tensões τ_{xy} e, conseqüentemente, uma redução dos picos de tensão nas extremidades das juntas. Este comportamento observado nos três adesivos deve-se, mais uma vez, aos seus respectivos valores de E .

3.2.1.1.2 Resistência das juntas

Na Figura 86 são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas através da análise numérica por MDC no ABAQUS® em função de L_0 para os três adesivos. A partir da avaliação destas é possível aferir a resistência mecânica das juntas adesivas tubulares deste caso de estudo e verificar a evolução do seu comportamento com a variação gradual de L_0 .

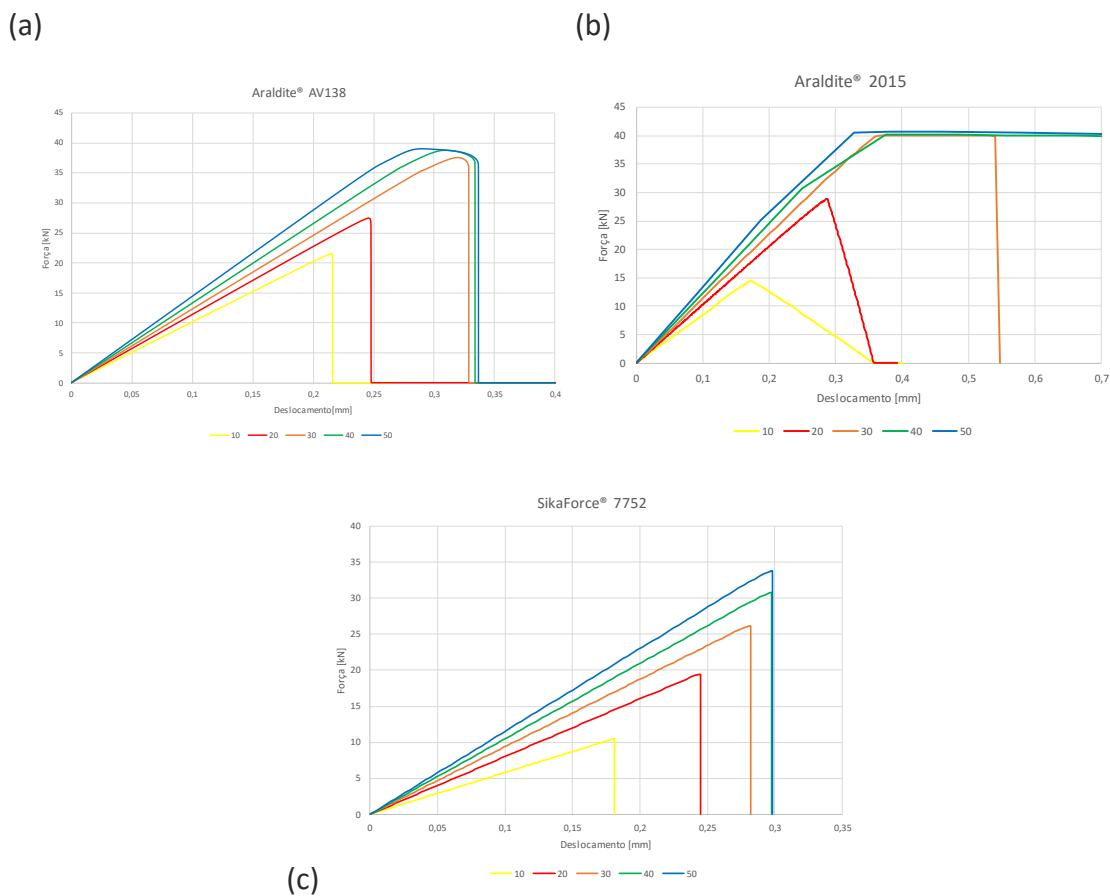


Figura 86 – Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função de L_0 , para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Após a análise das curvas $P-\delta$ deste caso de estudo, verifica-se que as curvas do adesivo Araldite® AV138 apresentam um comportamento linear até $L_0=20$ mm (Figura 86 (a)). A partir de $L_0=30$ mm, começa a dar-se a plastificação dos substratos, ainda que reduzida, devido à rigidez elevada deste adesivo. O adesivo Araldite® 2015 apresentou um comportamento linear até $L_0=20$ mm (Figura 86 (b)). A partir de $L_0=30$ mm os tubos de

alumínio começam a deformar-se plasticamente, devido à ductilidade característica deste adesivo. Para além disso, como se trata de um adesivo com alguma ductilidade, este apresenta valores de $P_{m\acute{a}x}$ próximos do adesivo Araldite® AV138, embora tenha uma resistência inferior. De notar que não é possível aferir o valor de $\delta_{m\acute{a}x}$ para $L_0=40$ mm e $L_0=50$ mm a partir da leitura dos gráficos uma vez que estes modelos sofrem estricção (Figura 87). Como tal, truncou-se o gráfico pois, se não se efetuasse esta ação, não seria possível visualizar a forma de como se comportam as juntas até à sua rutura. No entanto, para $L_0=40$ mm e para $L_0=50$ mm, registou-se $\delta_{m\acute{a}x}\approx 50$ mm.



Figura 87 – Estricção gerada no tubo interior para o adesivo Araldite® 2015, com $L_0=40$ mm

A estricção ocorre no tubo interior porque, apesar de ambos possuírem a mesma espessura, este possui um diâmetro menor para que seja possível inseri-lo dentro do tubo exterior. Como tal, uma secção transversal mais reduzida resulta numa maior concentração de cargas.

Finalmente, no que toca ao adesivo SikaForce® 7752, tal como se verificou experimentalmente, este demonstrou ser o adesivo com menor resistência mecânica, uma vez que apresenta os valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais reduzidos entre os três adesivos. As suas curvas $P-\delta$ apresentam-se como sendo lineares até à sua rutura (Figura 86 (c)).

3.2.1.1.3 Comparação de resultados

Na Tabela 24 estão apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos, e o aumento percentual relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=10$ mm. A partir da mesma é possível verificar que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ observados são superiores para as juntas adesivas com o Araldite® AV138 até $L_0=20$ mm. Os aumentos percentuais para este adesivo aumentam bastante até $L_0=30$ mm, mas a partir deste ponto tendem a estabilizar. Este comportamento é a consequência da fragilidade elevada do Araldite® AV138, que limita bastante a sua deformação plástica.

O adesivo Araldite® 2015 é o que apresenta valores de resistência mais elevados a partir de $L_0=20$ mm. A ductilidade que o mesmo possui permite a indução de cargas mais elevadas, o que resulta numa plastificação elevada. De facto, este adesivo é o que regista um crescimento $\Delta P_{\text{máx}}$ mais elevado, que eventualmente tende a atenuar-se para valores de L_0 mais elevados.

Apesar de apresentar um $\Delta P_{\text{máx}}$ ao longo da variação de L_0 , o SikaForce® 7752 demonstra ser o adesivo menos resistente, uma vez que as juntas em que está incluído atingem a rutura de uma forma mais prematura relativamente aos outros adesivos.

Tabela 24 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] para os três adesivos em função de L_0 , e respetivo aumento percentual

L_0 [mm]	Araldite® AV138	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	Araldite® 2015	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	SikaForce® 7752	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]
10	21546,61		14539,30		10496,25	
20	27465,82	27,5	28891,84	98,7	19455,48	85,4
30	37577,95	74,4	40036,13	175,4	26153,55	149,2
40	38761,30	79,9	40203,68	176,5	30778,64	193,2
50	38972,83	80,9	40647,09	179,6	33786,9	221,9

De forma a conseguir ter uma perspetiva visual mais assertiva relativamente à resistência das juntas adesivas tubulares em função de L_0 para os três adesivos, é apresentada na Figura 88 a evolução de $P_{\text{máx}}$ relativamente à evolução deste parâmetro.

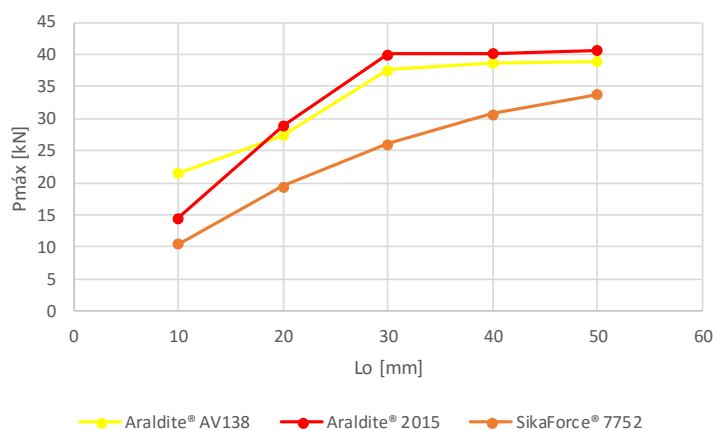


Figura 88 – Evolução de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 , para os três adesivos

Como foi explicado, verifica-se um crescimento acentuado de $P_{\text{máx}}$ para o Araldite® 2015, superando a resistência do Araldite® AV138. A curva do SikaForce® 7752

apresenta-se distanciada das dos adesivos mencionados anteriormente, o que traduz a resistência inferior das juntas com este adesivo.

3.2.1.2 *Espessura dos aderentes*

Neste subcapítulo procede-se à análise das tensões σ_y e τ_{xy} a partir da variação da espessura dos aderentes. Como existem dois tubos envolvidos na junta adesiva tubular, optou-se por realizar este estudo considerando inicialmente a variação da espessura do tubo interior (t_{SI}). De seguida, efetuaram-se os mesmos passos, mas desta vez considerando apenas a variação da espessura do tubo exterior (t_{SE}). Para a última análise de tensões efetuada neste subcapítulo, efetuou-se a variação da espessura de ambos os tubos (t_{SI} - t_{SE}).

De forma a utilizar uma nomenclatura mais simples, utilizaram-se as designações “x-x”. O primeiro termo da designação refere-se ao tubo interior e o segundo termo ao tubo exterior. Por exemplo, a designação “1-2” indica que a espessura do tubo interior é de 1 mm e a espessura do tubo exterior de 2 mm.

Posto isto, de seguida são apresentados todos os gráficos e respetivas análises relativamente à evolução do comportamento das tensões nas juntas adesivas tubulares e da sua resistência, considerando as respetivas alterações na espessura dos tubos, para os três adesivos.

3.2.1.2.1 *Distribuições de tensões*

Nesta secção são apresentados os gráficos com as distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} para os três casos que englobam a variação da espessura dos tubos: t_{SI} variável, t_{SE} variável e variação de t_{SI} e t_{SE} simultaneamente. O estudo dos respetivos resultados obtidos permite aferir a forma de como as tensões instaladas na junta podem influenciar o seu comportamento e resistência.

3.2.1.2.1.1 *Espessura do tubo interior variável*

3.2.1.2.1.1.1 *Tensões de arrancamento*

Na Figura 89 estão apresentadas as curvas das distribuições das tensões σ_y em função da variação de t_{SI} , para os três adesivos. De seguida, na Tabela 25, estão registados os valores máximos de σ_y/τ_{avg} obtidos das respetivas curvas.

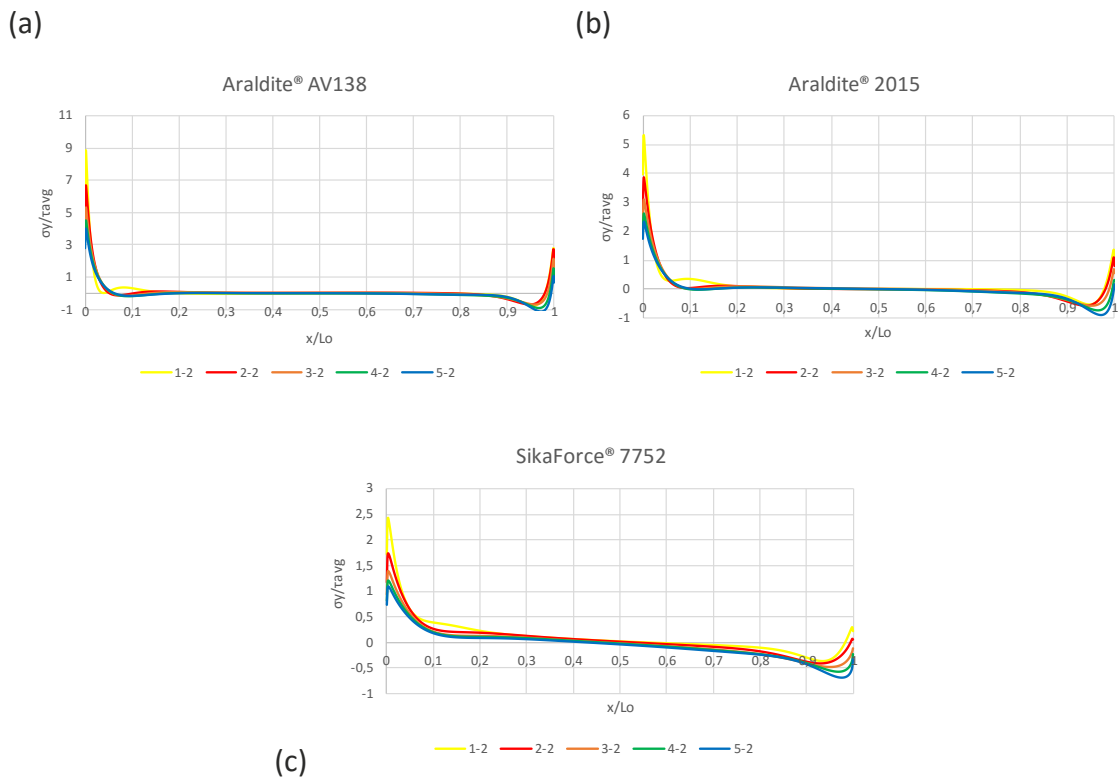


Figura 89 – Distribuição de tensões σ_y/τ_{avg} considerando a variação de t_{S1} para: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

As distribuições das tensões σ_y permitem observar que, para espessuras inferiores, geram-se maiores picos de concentração de tensões. Para espessuras mais elevadas, as extremidades de L_0 apresentam uma menor deformação transversal, o que resulta na diminuição dos picos de tensão. Ao diminuir a espessura do aderente, a secção transversal do material diminui e, como tal, há maior deformação localizada e, conseqüentemente, maiores picos de tensões σ_y . Na Tabela 25 estão presentes os valores máximos de σ_y/τ_{avg} registados após esta análise numérica.

A partir destes dados, é possível aferir a coerência que existe relativamente à forma de como σ_y/τ_{avg} diminui com o aumento de t_{S1} . Além disso, também é notória a influência da rigidez do adesivo na distribuição das tensões σ_y . Com isto, é visível que o Araldite® AV138 é o que apresenta maiores tensões de pico, seguido do Araldite® 2015 e depois o SikaForce® 7752, cujos respetivos valores de E demonstram ser gradualmente mais baixos para estes dois últimos adesivos mencionados, o que justifica o comportamento observado.

Tabela 25 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, considerando a variação de t_{SI}

Adesivo	t_{SI} [mm]				
	1-2	2-2	3-2	4-2	5-2
Araldite® AV138	8,88	6,65	5,33	4,54	4,02
Araldite® 2015	5,33	3,88	3,09	2,63	2,34
SikaForce® 7752	2,44	1,73	1,40	1,21	1,09

3.2.1.2.1.2 Tensões de corte

Na Figura 90 estão apresentadas as curvas das distribuições das tensões τ_{xy} para os três adesivos, em função da variação de t_{SI} . Além disso, na Tabela 26, estão registados os respetivos valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} .

À semelhança do que sucedeu nas distribuições de tensões σ_y , também nesta situação se verificam picos de tensões mais elevados para valores de t_{SI} mais reduzidos. Como foi explicado, a diminuição da secção do aderente vai causar um aumento de concentração de tensões nas zonas próximas de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$. Quando se dá a deformação diferencial dos tubos na zona da ligação, para espessuras mais elevadas as extremidades de L_0 apresentam um grau de deformação mais reduzido, o que resulta na diminuição dos picos de tensão. Ao diminuir a espessura do aderente, a secção transversal do material diminui e, como tal, as deformações longitudinais são superiores, o que provoca um aumento dos picos de tensão. Para além disto, denota-se que os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} são superiores quando está envolvido um adesivo mais rígido na ligação (ver Tabela 26), o que confere uma boa coerência na evolução dos respetivos valores entre os três adesivos.

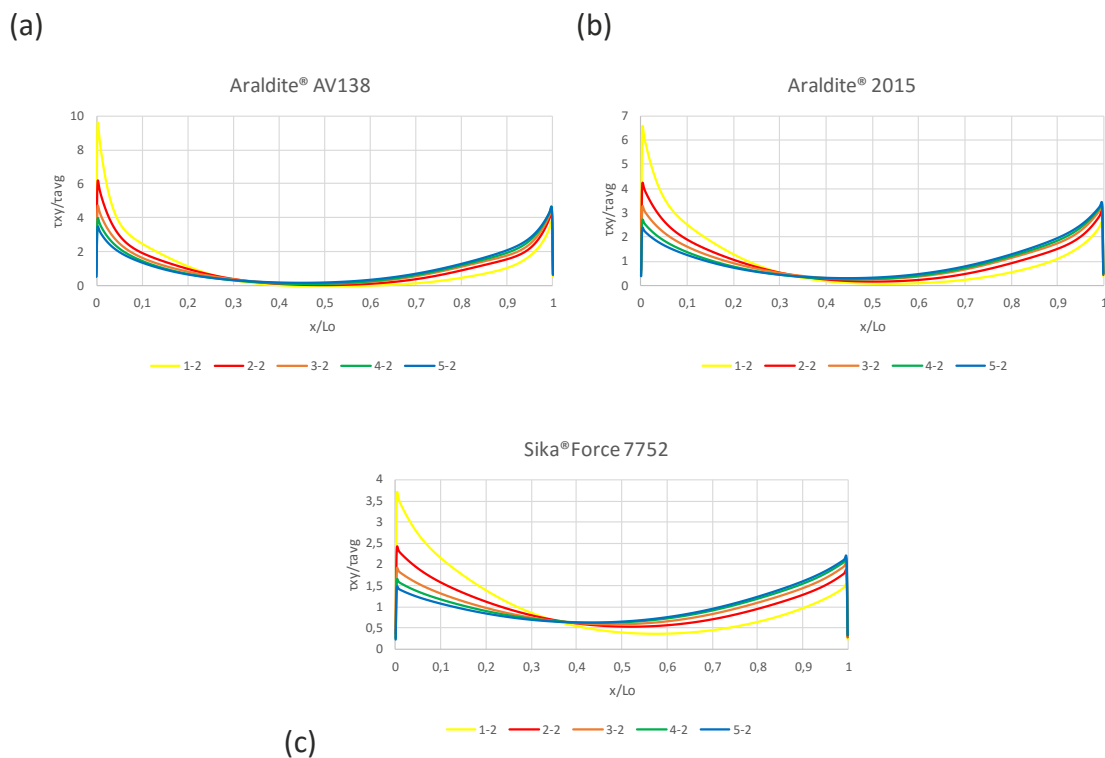


Figura 90 – Distribuição de tensões τ_{xy}/τ_{avg} considerando a variação de t_{S1} para: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Tabela 26 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, considerando a variação de t_{S1}

Adesivo	t_{S1} [mm]				
	1-2	2-2	3-2	4-2	5-2
Araldite® AV138	9,63	6,19	4,75	4,63	4,65
Araldite® 2015	6,59	4,24	3,28	3,40	3,47
SikaForce® 7752	3,72	2,43	2,05	2,15	2,21

A partir dos valores registados na Tabela 26 é possível verificar que há uma redução dos picos de concentração de tensões τ_{xy} com a diminuição de t_{S1} . Contudo, a partir de $t_{S1}=4$ mm, observa-se uma estabilização dos valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} .

3.2.1.2.1.2 Espessura do tubo exterior variável

3.2.1.2.1.2.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 91 estão apresentadas as curvas das distribuições das tensões σ_y em função da variação de t_{SE} , para os três adesivos. De seguida, na Tabela 27, estão registados os valores máximos de σ_y/τ_{avg} obtidos das respetivas curvas.

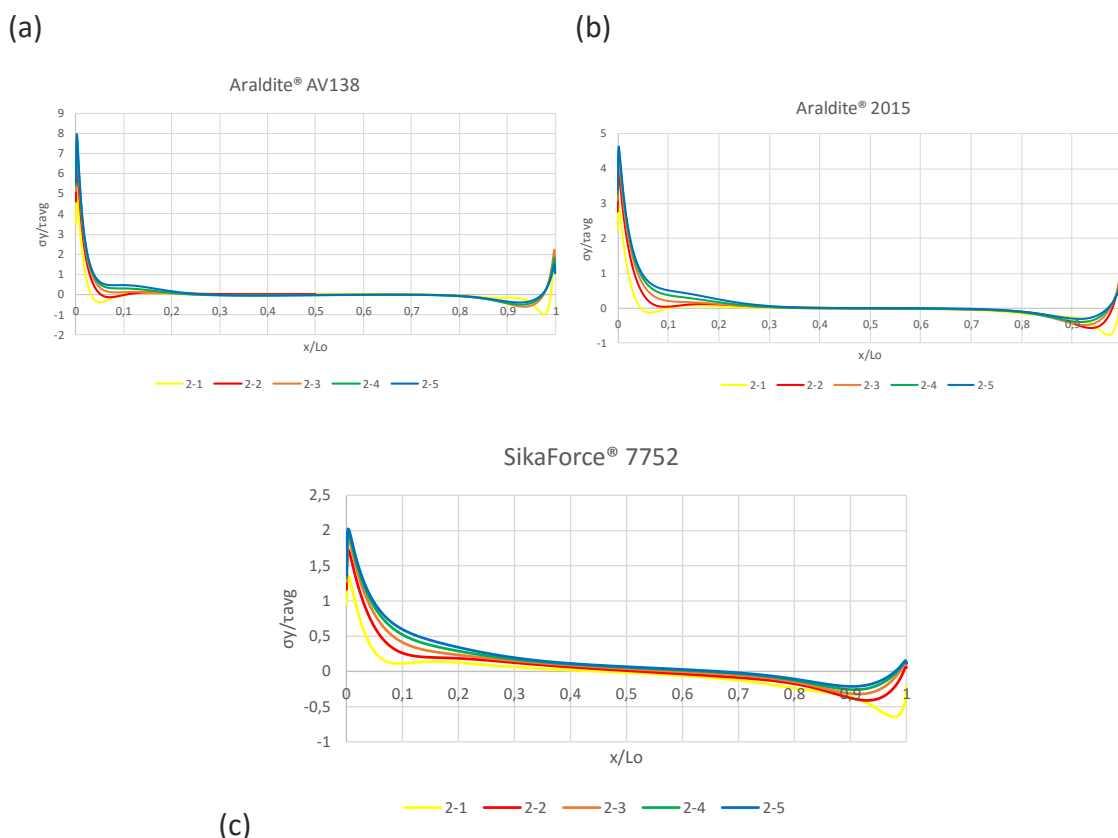


Figura 91 – Distribuição de tensões σ_y/τ_{avg} considerando a variação de t_{SE} para: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Ao contrário do que aconteceu no estudo relativo à variação de t_{SI} , nesta situação verifica-se o oposto, ou seja, para espessuras de t_{SE} mais elevadas observa-se picos de concentração de tensões σ_y mais elevadas (em $x/L_0=0$). Isto ocorre devido ao diferencial de rigidez entre os dois tubos nesta extremidade da ligação, o que resulta em maiores tensões geradas na camada de adesivo. De facto, quanto maior for a diferença de espessura entre tubos, maior é a deformação que o adesivo tem de suportar devido ao facto de um tubo ser muito rígido e o outro apresentar uma deformação transversal elevada. Para além destas diferenças, verifica-se que os adesivos mais rígidos são aqueles que apresentam um valor máximo de σ_y/τ_{avg} mais elevado (Tabela 27).

Tabela 27 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, considerando a variação de t_{SE}

Adesivo	t_{SE} [mm]				
	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Araldite® AV138	5,10	6,65	7,74	7,76	7,99
Araldite® 2015	2,99	3,88	4,29	4,51	4,64
SikaForce® 7752	1,37	1,73	1,89	1,97	2,03

A partir da Tabela 27 comprova-se quantitativamente o que foi dito no parágrafo anterior, ou seja, quanto maior o valor de E dos adesivos, maior será o valor de σ_y/τ_{avg} . Além disso, com o aumento de t_{SE} também se verifica o aumento gradual das tensões de pico.

3.2.1.2.1.2 Tensões de corte

Na Figura 92 estão apresentadas as curvas das distribuições das tensões τ_{xy} em função da variação de t_{SE} , para os três adesivos. De seguida, na Tabela 28, estão registados os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} obtidos das respetivas curvas.

No geral, a distribuição das tensões τ_{xy} apresenta picos crescentes de tensão em $x/L_0=1$ com a diminuição de t_{SE} . Este comportamento ocorre devido ao aumento do efeito de deformação diferencial do tubo exterior. Para $x/L_0=0$, observa-se um aumento dos picos de tensões τ_{xy} com o aumento de t_{SE} . Como se observou no estudo relativo à variação de t_{SI} , também neste as distribuições de tensões τ_{xy} se mostram assimétricas. Os picos registados em ambas as extremidades vão ser influenciados por aderentes distintos, com espessuras diferentes e, como tal, as tensões distribuem-se de forma diferente. A Tabela 28 mostra os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para cada configuração de junta testada.

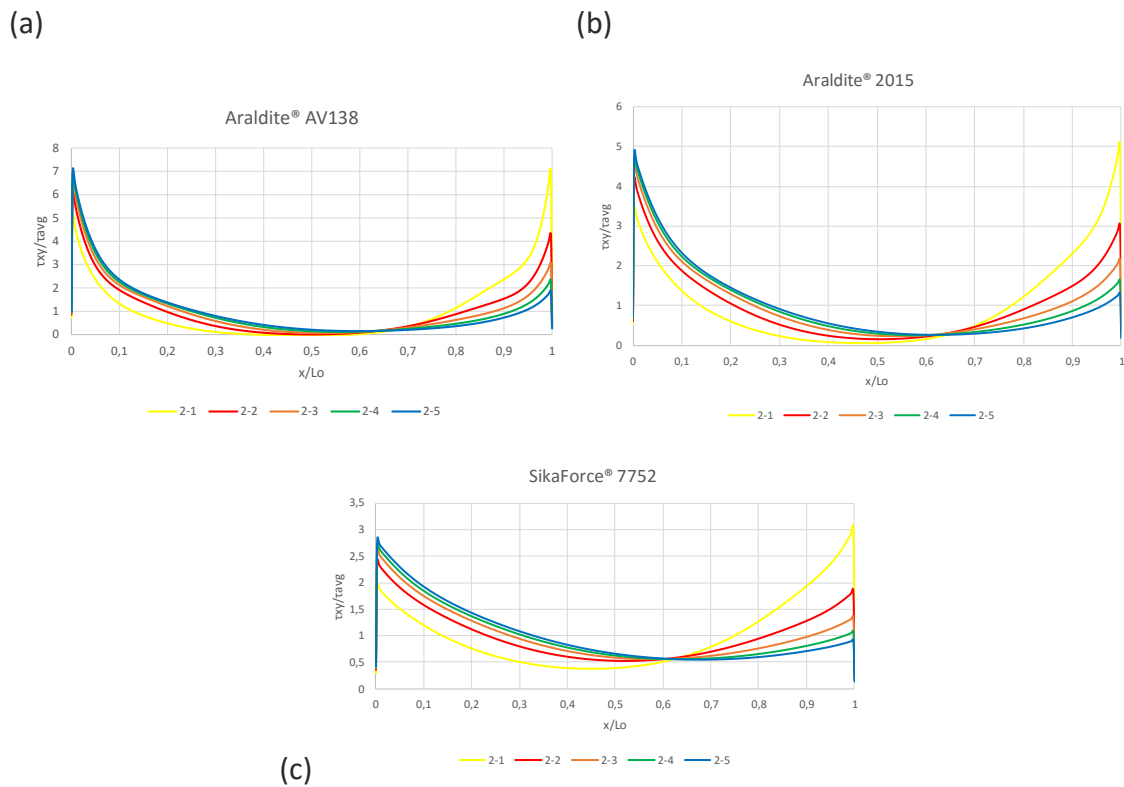


Figura 92 – Distribuição de tensões τ_{xy}/τ_{avg} considerando a variação de t_{SE} para: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Tabela 28 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, considerando a variação de t_{SE}

Adesivo	t_{SE} [mm]				
	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Araldite® AV138	7,12	6,19	6,68	6,96	7,13
Araldite® 2015	5,13	4,23	4,59	4,79	4,92
SikaForce® 7752	3,09	2,43	2,65	2,77	2,85

Apesar das diferenças descritas, é possível observar a partir dos dados obtidos na Tabela 28 que os valores mais elevados de τ_{xy}/τ_{avg} pertencem ao Araldite® AV138. À medida que o adesivo em questão apresenta menos rigidez, menor são os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} que apresenta.

3.2.1.2.1.3 Espessura de ambos os tubos variável

3.2.1.2.1.3.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 93 estão apresentadas as curvas das distribuições das tensões σ_y em função da variação de t_{SI} e t_{SE} simultaneamente, para os três adesivos. De seguida, na Tabela 27, estão registados os valores máximos de σ_y/τ_{avg} obtidos das respetivas curvas.

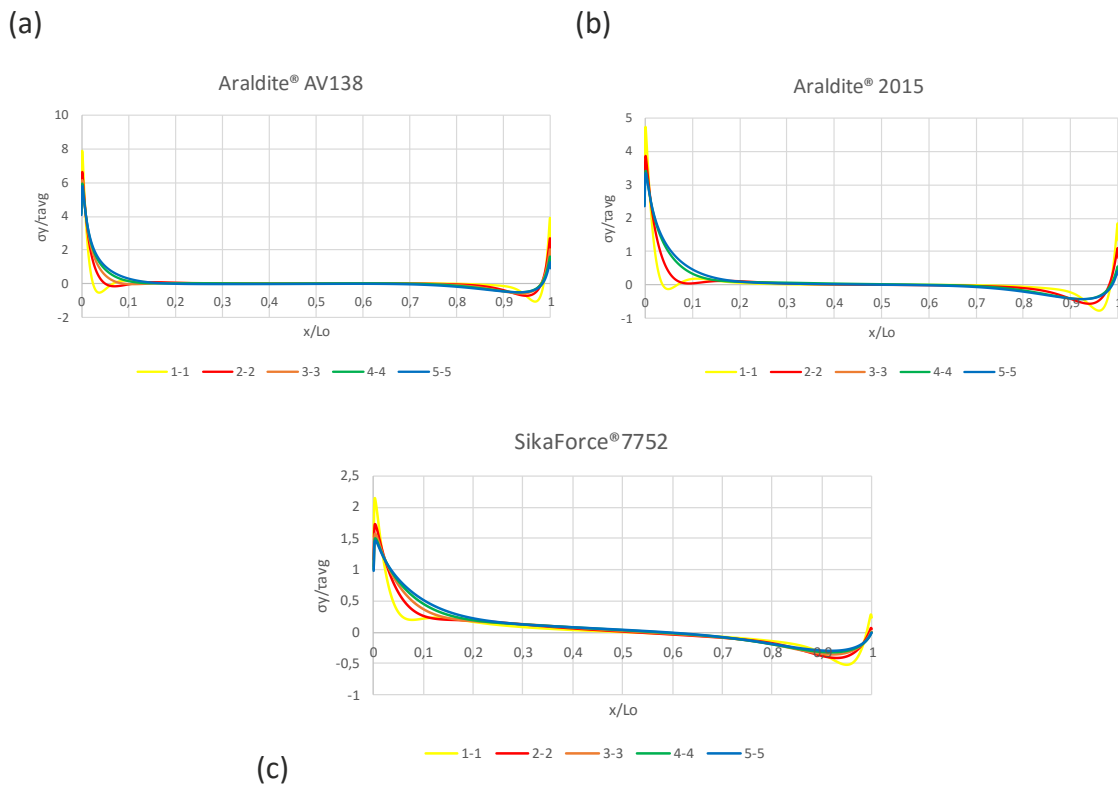


Figura 93 – Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares em função da variação das espessuras t_{SI} e t_{SE} : (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

As análises numéricas realizadas para os três adesivos deste caso de estudo demonstram um crescimento do valor máximo de σ_y/τ_{avg} à medida que t_{SI} e t_{SE} diminui. A redução da espessura dos substratos resulta numa diminuição da secção, o que torna a junta mais sensível a tensões σ_y . Para além da espessura dos tubos da junta adesiva, também a rigidez dos adesivos entra em jogo no que toca à forma de como as tensões σ_y evoluem ao longo de L_0 . Posto isto, denota-se que o Araldite® AV138 apresenta os picos mais elevados relativamente aos outros dois adesivos (Tabela 29). Seguidamente está o Araldite® 2015 e finalmente o SikaForce® 7752, uma vez que este último é o que apresenta menor valor de E .

Tabela 29 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, considerando a variação de t_{SI} e t_{SE}

Adesivo	$t_{SI}-t_{SE}$ [mm]				
	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5
Araldite® AV138	7,88	6,65	6,17	5,92	5,80
Araldite® 2015	4,72	3,88	3,57	3,42	3,36
SikaForce® 7752	2,15	1,73	1,58	1,50	1,46

Após a visualização dos dados apresentados na Tabela 29 é fácil aferir a coerência exibida pelos mesmos. Como tal, verificam-se um acréscimo de σ_y/τ_{avg} para $t_{SI}-t_{SE}$ mais reduzidos. O mesmo sucede para valores de E dos adesivos mais elevados.

3.2.1.2.1.3.2 Tensões de corte

Na Figura 94 estão apresentadas as curvas das distribuições das tensões σ_y em função da variação de t_{SI} e t_{SE} simultaneamente, para os três adesivos. De seguida, na Tabela 27, estão registados os valores máximos de σ_y/τ_{avg} obtidos das respetivas curvas.

Os gráficos das distribuições das tensões τ_{xy} apresentam picos mais elevados para os adesivos mais rígidos. Para além disso, registam-se valores de tensões de pico próximos para ambas as extremidades das juntas adesivas. Outra tendência presente nestas curvas é a de que os picos das tensões τ_{xy} reduzem com o aumento de $t_{SI}-t_{SE}$ (Tabela 30) devido à ocorrência de uma deformação diferencial mais reduzida. Desta forma verifica-se uma distribuição mais uniforme para valores de $t_{SI}-t_{SE}$ mais elevados, uma vez que, para valores mais reduzidos, a secção dos aderentes passa a ser inferior e, como tal, passa a existir uma maior acumulação de deformações nessa zona (proximidades de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$).

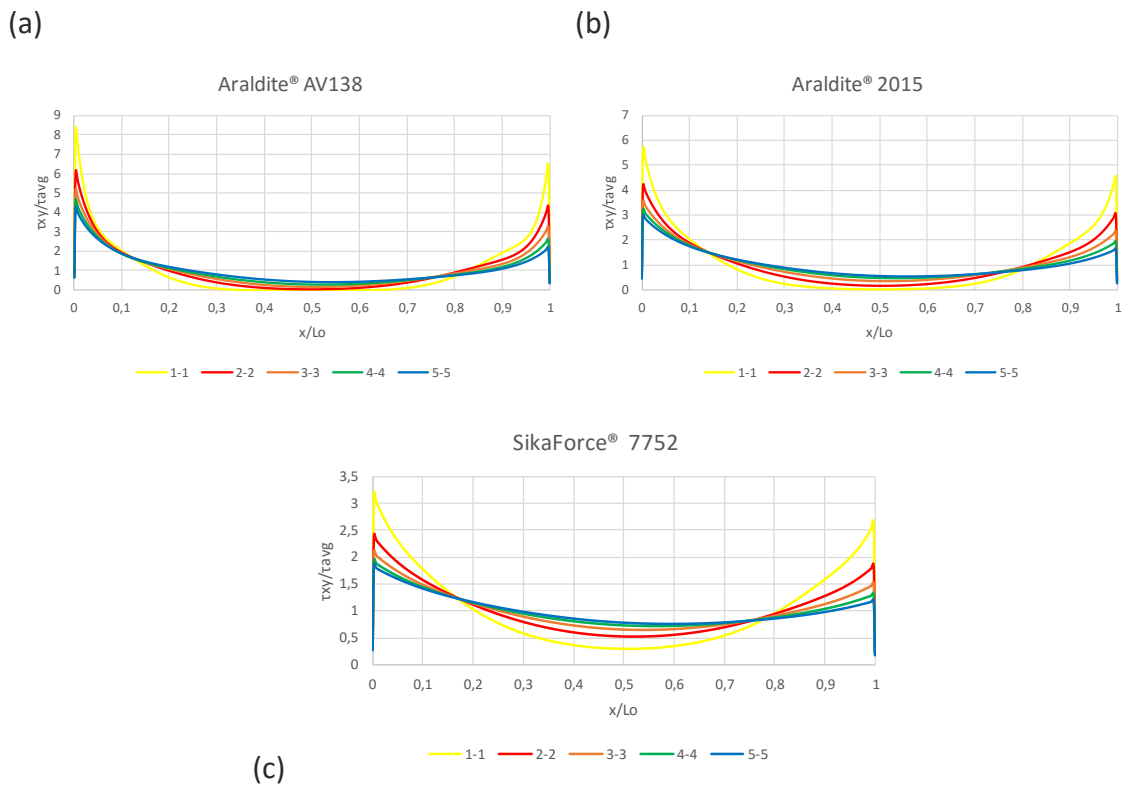


Figura 94 – Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares em função da variação das espessuras t_{SI} e t_{SE} : (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Tabela 30 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, considerando a variação de t_{SI} e t_{SE}

Adesivo	$t_{SI}-t_{SE}$ [mm]				
	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5
Araldite® AV138	7,88	6,65	6,17	5,92	5,80
Araldite® 2015	4,72	3,88	3,57	3,42	3,36
SikaForce® 7752	2,15	1,73	1,58	1,50	1,46

À semelhança do que aconteceu com as tensões σ_y , também nas tensões τ_{xy} existe uma boa coerência exibida pelos valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} . Como tal, verificam-se valores mais elevados τ_{xy}/τ_{avg} para valores de $t_{SI}-t_{SE}$ mais reduzidos. O mesmo acontece quando o adesivo envolvido na junta apresenta um valor de E mais elevado.

3.2.1.2.2 Resistência das juntas

Na Figura 95, Figura 96 e Figura 97 são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas através da análise numérica por MDC no ABAQUS® em função da variação das espessuras indicadas nas legendas, para os três adesivos. A partir da avaliação destas é possível aferir a resistência mecânica das juntas adesivas tubulares e observar a evolução do seu comportamento com a variação gradual desta alteração geométrica.

3.2.1.2.1.4 Espessura do tubo interior variável

A partir da Figura 95 é possível observar o tipo de comportamento que as juntas adesivas tubulares apresentam em função da variação de t_{SI} , para os três adesivos.

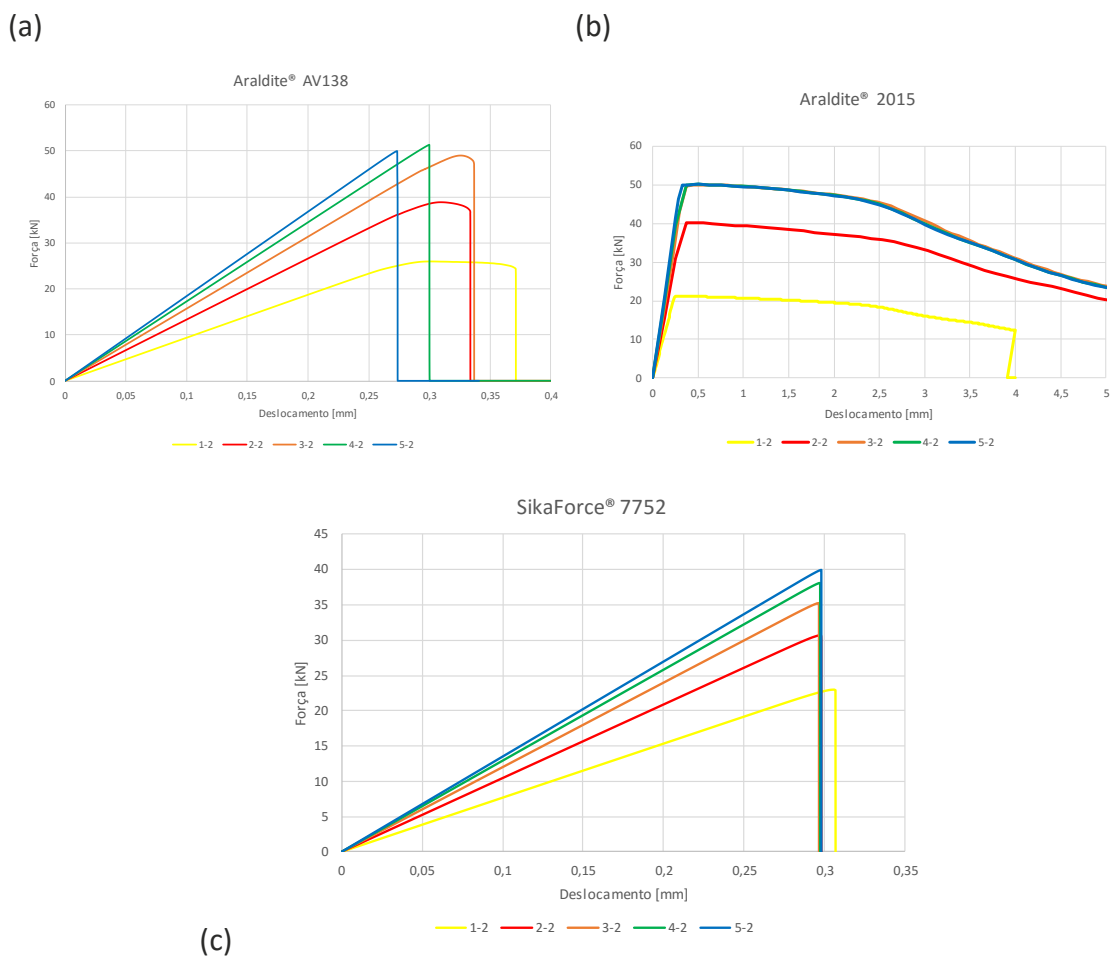


Figura 95 – Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação de t_{SI} , para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

É notório o acréscimo de $P_{m\acute{a}x}$ à medida que t_{SI} aumenta devido ao aumento da secção transversal do tubo interior. Relativamente ao Araldite® AV138, verifica-se alguma linearidade até à rotura nas amostras analisadas e valores de $P_{m\acute{a}x}$ bastante elevados, à semelhança dos obtidos para o Araldite® 2015. Para as amostras com $t_{SI}=1$ mm, $t_{SI}=2$

mm e $t_{SI}=3$ mm ocorre plastificação do aderente mais fino, uma vez que o mesmo atinge facilmente a zona plástica. Este comportamento resulta em deslocamentos mais elevados, ao contrário do que acontece para os modelos com $t_{SI}=4$ mm, $t_{SI}=5$ mm, cujo valor de $\delta_{m\acute{a}x}$ se apresenta mais baixo devido à maior rigidez total da junta.

O adesivo Araldite® 2015 apresenta um aumento gradual de $P_{m\acute{a}x}$ à medida que t_{SE} aumenta. As suas curvas P - δ mostram a ocorrência de deformação plástica nos tubos de alumínio devido à ductilidade deste adesivo. Desta forma, após uma breve leitura das curvas P - δ , é possível presenciar uma proximidade dos seus valores de $P_{m\acute{a}x}$ relativamente aos do Araldite® AV138 para $t_{SE}=3$ mm, $t_{SE}=4$ mm e $t_{SE}=5$ mm. Verifica-se um $\delta_{m\acute{a}x}\approx 50$ mm para os modelos numéricos com $t_{SE}=2$ mm a $t_{SE}=5$ mm. Como já foi dito antes, de forma a que a escala do gráfico permita uma visualização clara do comportamento das juntas adesivas tubulares até à sua rutura, truncaram-se as curvas P - δ .

SikaForce® 7752 é o adesivo cujas juntas apresentam os valores mais reduzidos de $P_{m\acute{a}x}$. As curvas P - δ para estes modelos apresentam uma boa linearidade até à sua rutura.

3.2.1.2.1.5 Espessura do tubo exterior variável

Na Figura 96 estão presentes as curvas P - δ que as juntas adesivas tubulares apresentam em função da variação de t_{SE} , para os três adesivos.

As curvas P - δ que dizem respeito às juntas adesivas com o Araldite® AV138 apresentam valores de $P_{m\acute{a}x}$ bastante próximos uns dos outros. Ocorre uma ligeira plastificação em todos os modelos axissimétricos exceto para o que apresenta $t_{SE}=1$ mm. Para este caso dá-se a rutura da junta sem que haja deformação plástica nos tubos de alumínio. Contudo, verifica-se coerência em termos de rigidez global, no sentido de que esta aumenta com o acréscimo de t_{SE} . Para além disso, também se observa uma evolução lógica de $\delta_{m\acute{a}x}$. Este último parâmetro apresenta valores mais reduzidos para as juntas com t_{SE} mais elevadas.

O Araldite® 2015 apresenta plastificação do aderente em todas as curvas apresentadas no gráfico (Figura 96 (b)). A resistência intermédia deste adesivo associada à sua ductilidade permitiu atingir valores de $P_{m\acute{a}x}$ próximos dos do Araldite® AV138, para os valores de $t_{SI}=3$ mm a $t_{SI}=5$ mm. Os valores de t_{SI} inferiores a esses indicados apresentam uma subida gradual de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de t_{SI} . De notar que não é possível observar o deslocamento completo das curvas deste gráfico. Nestes casos truncou-se o deslocamento de forma a que seja perceptível o comportamento destas juntas adesivas até à sua rutura. Apesar disso, verifica-se um $\delta_{m\acute{a}x}\approx 30$ mm para todas as curvas correspondentes às juntas adesivas com o Araldite® 2015.

O adesivo SikaForce® 7752 é, dos três, o que apresenta claramente valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais reduzidos. As curvas P - δ indicadas na Figura 96 (c) apresentam linearidade até a rutura

da junta adesiva e um aumento gradual do deslocamento derivado à diminuição da rigidez da mesma, governada pela diminuição de t_{SE} .

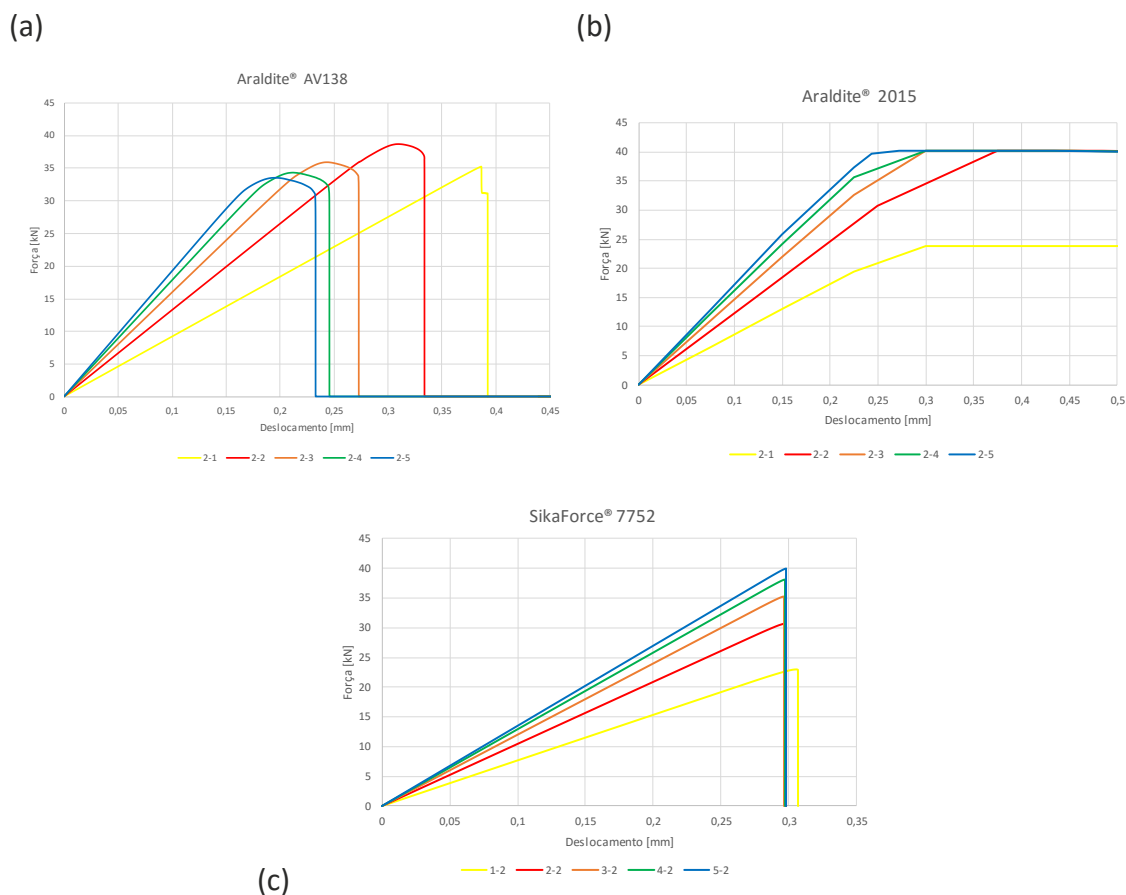


Figura 96 – Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação de t_{SE} , para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

3.2.1.2.1.6 Espessura de ambos os tubos variável

Na Figura 97 estão apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS®, em função da variação do valor da espessura de ambos os tubos ($t_{SI}-t_{SE}$), envolvendo a utilização dos três adesivos mencionados nesta dissertação.

A partir das curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® AV138, é possível aferir que estas apresentam um comportamento coerente na medida em que demonstram valores de $P_{máx}$ mais elevados para valores de $t_{SI}-t_{SE}$ superiores. Desta forma, ao aumentar a espessura de ambos os tubos dá-se um aumento da resistência total da junta. Observou-se plastificação do tubo interior da junta adesiva, mas a uma taxa reduzida graças à rigidez elevada do Araldite® AV138.

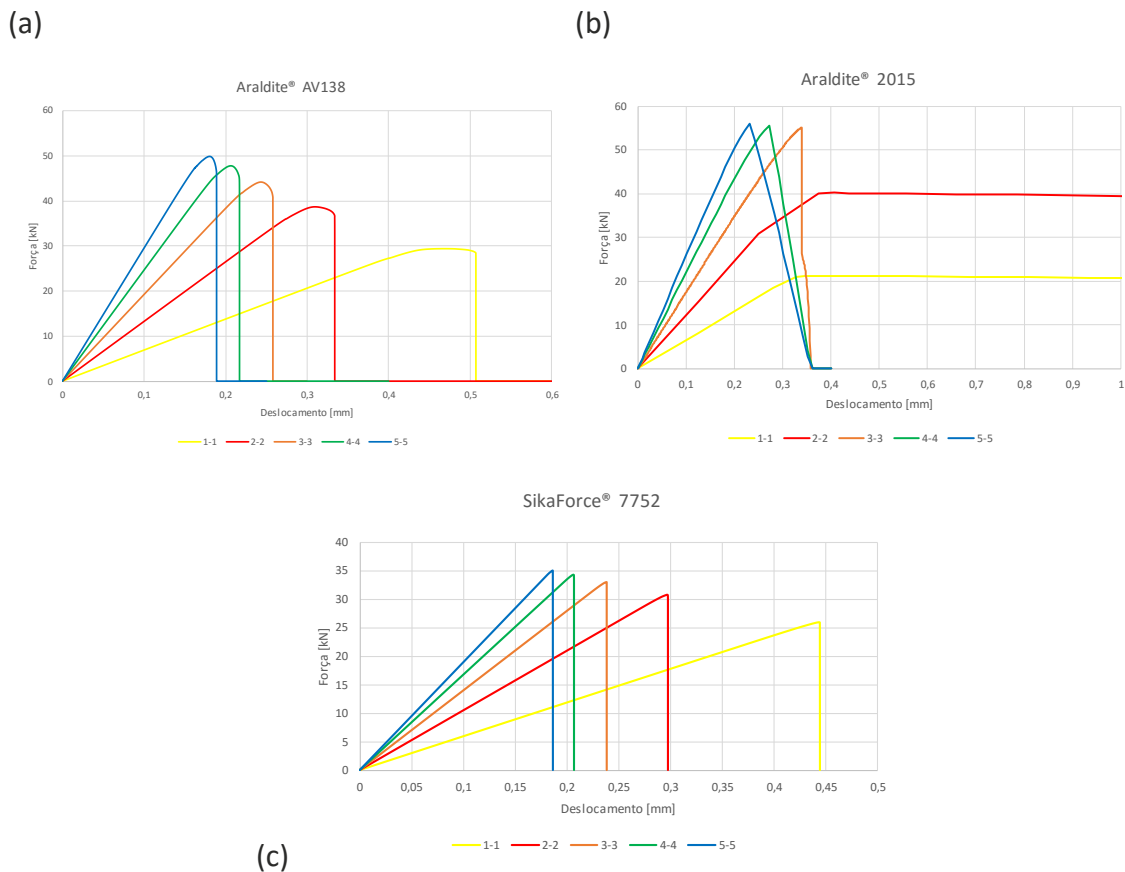


Figura 97 – Curvas P - δ obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação de t_{S1} e t_{SE} , para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Para o Araldite® 2015 verifica-se linearidade nas curvas correspondentes a $t_{S1}-t_{SE}=3$ mm, $t_{S1}-t_{SE}=4$ mm e $t_{S1}-t_{SE}=5$ mm. Para valores inferiores de $t_{S1}-t_{SE}$ ocorre deformação plástica dos tubos, o que resulta em $\delta_{m\acute{a}x} \approx 50$ mm. Apesar destas diferenças observadas, existe um seguimento lógico no que toca ao aumento gradual de $P_{m\acute{a}x}$ e da rigidez das juntas adesivas tubulares, à medida que os valores de $t_{S1}-t_{SE}$ aumentam.

As juntas com o adesivo SikaForce® 7752 exibem-se como sendo as menos resistentes. Apesar disso, demonstram um comportamento linear até à sua rutura, e coerência em termos de evolução de rigidez, $P_{m\acute{a}x}$ e respetivo deslocamento, conforme o acréscimo dos valores de $t_{S1}-t_{SE}$.

3.2.1.2.3 Comparação de resultados

Nesta secção pretende-se efetuar a comparação das resistências obtidas para a variação das espessuras dos tubos que constituem as juntas adesivas. Esta avaliação permite perceber a forma de como é que $P_{m\acute{a}x}$ evolui relativamente a esse parâmetro, para os três adesivos.

3.2.1.2.1.7 Espessura do tubo interior variável

Na Figura 98 estão presentes os valores de $P_{\text{máx}}$ para todos os valores de t_{SI} considerados e o aumento percentual de cada um relativamente a $t_{\text{SI}}=1$ mm. Na Tabela 31 é possível verificar as curvas de evolução de $P_{\text{máx}}$ para os três adesivos, com a variação de t_{SI} .

Tabela 31 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] para os três adesivos em função de t_{SI} , e respetivo aumento percentual

$t_{\text{SI}}-t_{\text{SE}}$ [mm]	Araldite® AV138	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	Araldite® 2015	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	SikaForce® 7752	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]
1-2	25961,72		21173,94		22986,35	
2-2	38761,30	49,3	40203,68	89,9	30778,64	33,9
3-2	48900,0	88,4	50091,65	110,2	35231,77	53,2
4-2	51352,61	97,8	50104,69	110,3	38065,68	65,6
5-2	49882,48	92,1	50119,40	110,3	39972,17	73,9

A partir da tabela, verifica-se que as juntas com o Araldite® AV138 são as que apresentam maior resistência para valores de $t_{\text{SI}}=1$ mm. Dá-se um acréscimo de $P_{\text{máx}}$ à medida que t_{SI} aumenta até 4 mm. Para $t_{\text{SI}}=5$ mm verifica-se um decréscimo de $P_{\text{máx}}$ uma vez que o adesivo é demasiado rígido para permitir a deformação plástica do tubo de menor secção e, como tal, beneficiar a resistência mecânica da junta adesiva.

O Araldite® 2015 é o adesivo sofre um $\Delta P_{\text{máx}}$ elevado até $t_{\text{SI}}=3$ mm. A partir deste valor de espessura dá-se uma estabilização da resistência da junta, aproximando-se do valor de $P_{\text{máx}}$ registado pelo Araldite® AV138. Este acréscimo da resistência das juntas com este adesivo deve-se à indução de cargas elevadas resultantes da ductilidade característica do mesmo.

O adesivo SikaForce® 7752 apresenta um aumento percentual gradual à medida que t_{SI} aumenta, uma vez que a sua ductilidade elevada permite uma grande deformação plástica dos aderentes. Contudo, como é o adesivo que apresenta a menor tensão de rutura, as juntas que lhe concernem apresentam os valores de $P_{\text{máx}}$ mais baixos para todos os valores de espessura analisados.

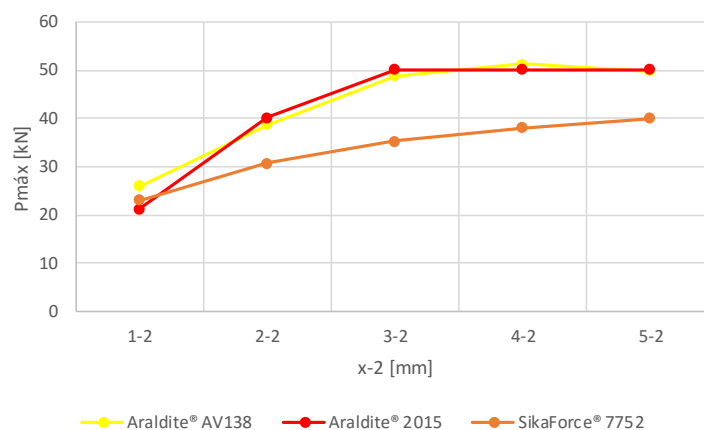


Figura 98 – Evolução de $P_{máx}$ em função de t_{SI} , para os três adesivos

A partir da Figura 98 é possível visualizar a evolução gráfica de $P_{máx}$ para os três adesivos. Verifica-se que o acréscimo da resistência das juntas com o Araldite® AV138 e do adesivo Araldite® 2015 causado pelo aumento de t_{SI} fez com que as respectivas curvas de evolução de $P_{máx}$ se encontrem bastante próximas uma da outra. Por outro lado, a curva do SikaForce® 7752 é a que se mostra mais afastada relativamente às dos outros adesivos, o que reflete a sua resistência inferior.

3.2.1.2.1.8 Espessura do tubo exterior variável

Na Figura 99 estão presentes os valores de $P_{máx}$ para todos os valores de t_{SE} considerados e o aumento percentual de cada um relativamente a $t_{SE}=1$ mm. Na Tabela 31 é possível verificar as curvas de evolução de $P_{máx}$ para os três adesivos, com a variação de t_{SE} .

Tabela 32 – Valores de $P_{máx}$ [N] para os três adesivos em função de t_{SE} , e respetivo aumento percentual

$t_{SI}-t_{SE}$ [mm]	Araldite® AV138	$\Delta P_{máx}$ [%]	Araldite® 2015	$\Delta P_{máx}$ [%]	SikaForce® 7752	$\Delta P_{máx}$ [%]
2-1	35234,68		23829,17		35139,16	
2-2	38761,30	10,0	40203,68	68,7	30778,64	-12,41
2-3	35872,45	1,8	40199,59	68,7	29016,46	-17,42
2-4	34361,73	-2,5	40181,93	68,6	28164,33	-19,85
2-5	33553,46	-4,8	40194,25	68,7	27660,85	-21,28

A partir da tabela, verifica-se que as juntas com o Araldite® AV138 são as que apresentam maior resistência para $t_{SE}=1$ mm. Dá-se um $\Delta P_{máx}$ reduzido que estabiliza muito rapidamente. Como este adesivo é bastante rígido não existe um desenvolvimento significativo da resistência com a variação de t_{SE} .

O Araldite® 2015 é o adesivo que possui valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevados entre $t_{SE}=2$ mm e $t_{SE}=5$ mm. Existe um $\Delta P_{m\acute{a}x} \approx 68,7\%$ para $t_{SE}=2$ mm que acaba por se manter constante até $t_{SE}=5$ mm. Este acréscimo da resistência das juntas com este adesivo é o resultado da plastificação do tubo mais fino, derivada da ductilidade do Araldite® 2015.

O adesivo SikaForce® 7752 apresenta um comportamento inverso ao dos restantes adesivos. Neste verifica-se uma redução da resistência da junta adesiva tubular com aumento de t_{SE} . Para $t_{SE}=1$ mm, este adesivo é o que se segue ao Araldite® AV138 no que toca a resistência mecânica. Entre $t_{SE}=2$ mm e $t_{SE}=5$ mm, o adesivo não consegue transmitir os esforços ao tubo mais fino de forma a que este se deforme plasticamente e que gere um aumento de $P_{m\acute{a}x}$.

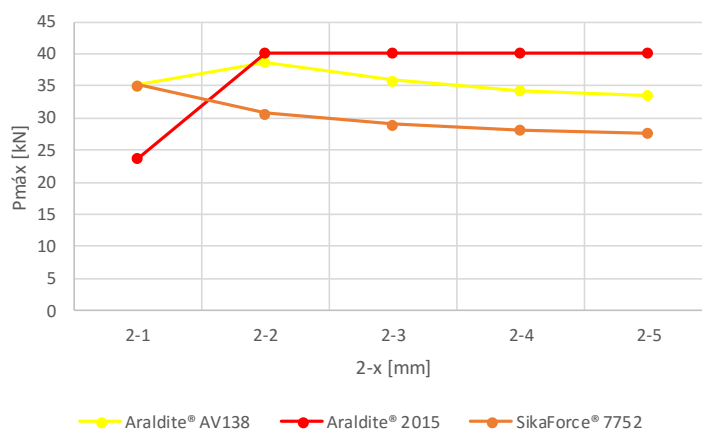


Figura 99 – Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de t_{SE} , para os três adesivos

A partir da Figura 99 é possível visualizar a evolução gráfica de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos. Verifica-se que o acréscimo da resistência das juntas com o Araldite® AV138 e do adesivo Araldite® 2015 causado pelo aumento de t_{SI} fez com que as respetivas curvas de evolução de $P_{m\acute{a}x}$ se encontrem bastante próximas uma da outra. Por outro lado, a curva do SikaForce® 7752 apresenta uma tendência decrescente e, como tal, mais afastada relativamente às dos outros adesivos, refletindo a sua resistência inferior.

3.2.1.2.1.9 Espessura de ambos os tubos variável

Na Tabela 35 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ considerando a variação de $t_{SI}-t_{SE}$. Estão também apresentados os valores de aumento percentual de cada um relativamente a $t_{SI}-t_{SE}=1-1$ mm. Na Figura 100 é possível verificar as curvas de evolução de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos, com a variação de $t_{SI}-t_{SE}$.

A partir da tabela, verifica-se que as juntas com o Araldite® AV138 são as que apresentam maior resistência para $t_{SI}=t_{SE}=1$ mm. À medida que as espessuras dos tubos vão aumentando, dá-se igualmente um acréscimo gradual de $P_{m\acute{a}x}$. Esta subida dá-se de forma suave devido à rigidez do Araldite® AV138 que permite uma plastificação limitada.

Para os valores de $t_{SI}=t_{SE}=2$ mm a $t_{SI}=t_{SE}=5$ mm verifica-se que as juntas com este adesivo são as segundas mais resistentes dos três adesivos considerados.

Tabela 33 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] para os três adesivos em função de t_{SE} , e respetivo aumento percentual

$t_{SI}-t_{SE}$ [mm]	Araldite® AV138	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	Araldite® 2015	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	SikaForce® 7752	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]
1-1	29344,94		21171,12		26041,66	
2-2	38761,30	32,1	40203,68	89,9	30778,64	18,2
3-3	44235,01	50,8	55065,69	160,1	32986,27	43,5
4-4	47821,69	63,0	55713,67	163,2	34249,25	49,0
5-5	49905,15	70,1	55947,24	164,3	35032,82	52,4

O Araldite® 2015 é o adesivo que possui valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevados entre $t_{SI}=t_{SE}=2$ mm a $t_{SI}=t_{SE}=5$ mm. Existe um aumento de $\approx 89,9\%$ para $t_{SI}=t_{SE}=2$ mm que estabiliza a partir do momento em que $t_{SI}=t_{SE}=3$ mm. Este acréscimo da resistência das juntas com este adesivo é o resultado das cargas absorvidas pelo adesivo, derivado à sua ductilidade. De facto, o Araldite® 2015 é o adesivo que apresenta maior resistência para mm=2 mm a $t_{SI}=t_{SE}=5$ mm.

O adesivo SikaForce® 7752 apresenta inicialmente o segundo maior valor de $P_{m\acute{a}x}$. Para estes valores de espessura, a ductilidade elevada deste adesivo permite uma absorção de cargas na junta que a torna mais resistente devido à deformação plástica causada no tubo interior. Contudo, para valores de $t_{SI}-t_{SE}$ superiores a 1 mm, a resistência global das juntas com este adesivo não sofreu acréscimos significativos uma vez que deixa de haver evolução. Como tal, este é o adesivo que apresenta a menor resistência mecânica dos três estudados.

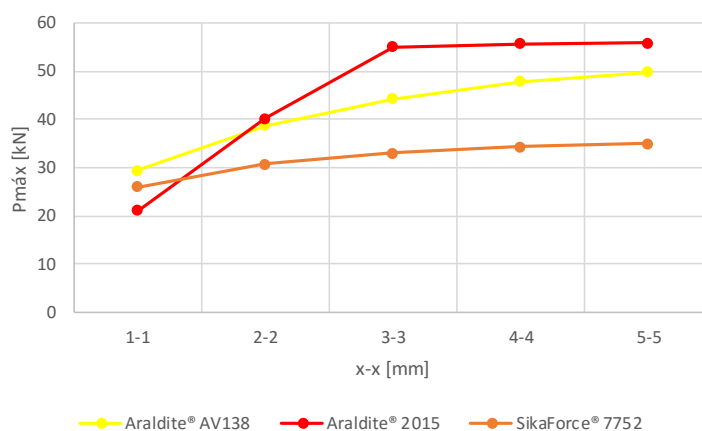


Figura 100 – Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $t_{SI}-t_{SE}$, para os três adesivos

A partir da Figura 100 é possível visualizar a evolução gráfica de $P_{\text{máx}}$ para os três adesivos. Verifica-se uma boa uniformidade das curvas para cada adesivo relativamente ao que foi explicado. Desta forma, é possível observar um aumento acentuado da resistência das juntas com o Araldite® 2015 e um aumento mais reduzido, mas gradual, que corresponde ao do Araldite® AV138. Para o adesivo SikaForce® 7752, o aumento de resistência é o menos evidente, uma vez que a partir de $t_{\text{SI}}=t_{\text{SE}}=3$ mm se verifica estabilização de $P_{\text{máx}}$.

3.2.2 Estudo de alterações geométricas

Neste subcapítulo procede-se à alteração geométrica das juntas adesivas tubulares. Estas modificações consistem na criação ou acréscimo de filetes no adesivo ou de chanfro nas extremidades dos tubos de alumínio. É considerado, para todas as análises, $L_0=40$ mm, $t_{\text{SI}}=t_{\text{SE}}=2$ mm e uma variação do ângulo de chanfro ou filete. Convém mencionar que o ângulo de 90° indicado corresponde à amostra cujas extremidades não apresentam chanfro ou filete, ou seja, corresponde ao modelo com a geometria base descrita na secção 3.1.1.

Inicialmente é feita uma análise considerando um chanfro exterior dos aderentes. De seguida, é realizado um outro estudo, mas tendo em conta a existência de um chanfro interno dos aderentes. De notar que, para este caso, esta alteração geométrica implica um ligeiro acréscimo da espessura de adesivo nas extremidades de L_0 . Finalmente é realizada uma análise numérica visando o acréscimo de um filete de adesivo em cada extremidade da junta adesiva. Esta alteração implica um ligeiro aumento de L_0 e, com isso, passam a existir valores para $x/L_0 < 0$ e $x/L_0 > 1$.

3.2.2.1 Chanfro exterior dos aderentes

Esta alteração geométrica consiste na aplicação de um chanfro externo dos aderentes de forma a tentar corrigir o efeito negativo das singularidades devido à geometria das extremidades da junta adesiva tubular. Com isto, pretende-se aferir se esta análise numérica prevê alguma melhoria no comportamento das juntas a partir da distribuição das tensões σ_y e τ_{xy} , considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

Como se efetua uma alteração na geometria, existe a necessidade de proceder a um tratamento diferente na malha dessa região (Figura 101). Para o chanfro externo, consideraram-se elementos sólidos axissimétricos (CAX4R do ABAQUS®) e aplicados os *mesh controls* em função dos mesmos. Foram atribuídos valores de *bias ratio* na linha de partição que faz fronteira com o topo do tubo (linha vermelha da Figura 101). Como tal esta zona ficou com 4 elementos enquanto a fronteira que o chanfro faz com a película de adesivo (linha amarela da Figura 101) ficou com 10 elementos. Nesta última

pretende-se obter uma precisão mais elevada na transmissão dos esforços, portanto é necessário este refinamento da malha.

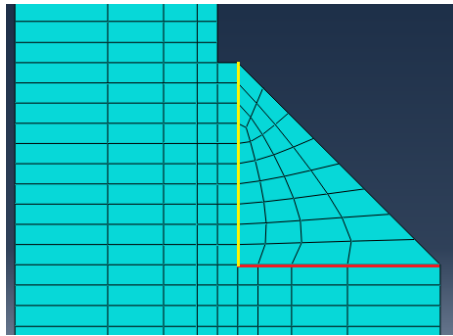


Figura 101 – Detalhe da malha usada no chanfro exterior do aderente

3.2.2.1.1 Distribuições de tensões

3.2.2.1.1.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 102 estão representadas as diferentes distribuições das tensões σ_y para os adesivos em estudo nesta dissertação, considerando variação do ângulo do chanfro exterior dos aderentes. Na Tabela 34 estão presentes os valores máximos de σ_y/τ_{avg} para o presente caso de forma a facilitar a comparação de todos os casos e aferir qualquer alteração no comportamento da junta que possa ocorrer.

A Figura 102 mostra a existência de picos de tensões são mais elevados nas extremidades das juntas, sobretudo para o Araldite® AV138, que se trata do adesivo mais rígido. Verifica-se um acréscimo das tensões σ_y à medida que o ângulo do chanfro aumenta. A existência de um ângulo de chanfro mais elevado vai causar um aumento da área transversal da junta nas suas extremidades. Uma vez que essas zonas são mais sensíveis no que toca ao desenvolvimento de picos de tensões, o aumento da secção permitirá uma melhor distribuição das tensões de compressão geradas pela deformação longitudinal e, como tal, absorver tensões σ_y mais elevadas.

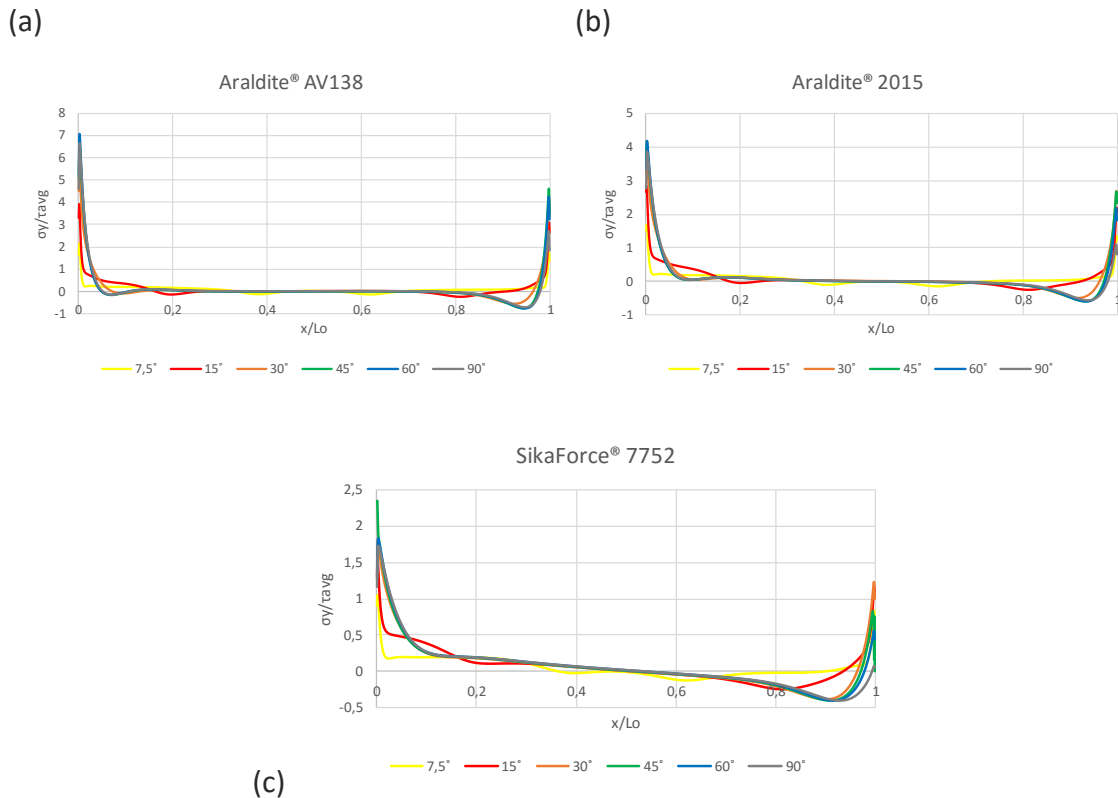


Figura 102 – Distribuição de tensões σ_y/τ_{avg} em função do ângulo do chanfro exterior dos aderentes, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Tabela 34 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do chanfro exterior dos aderentes

Adesivo	Ângulo do chanfro exterior do aderente					
	7,5°	15°	30°	45°	60°	90°
Araldite® AV138	2,15	3,93	5,72	6,81	7,08	6,65
Araldite® 2015	1,70	2,82	3,69	4,18	4,16	3,88
SikaForce® 7752	1,06	1,50	1,82	2,35	1,83	1,73

3.2.2.1.1.2 Tensões de corte

Na Figura 103 estão representadas as diferentes distribuições das tensões τ_{xy} para os três adesivos, considerando a existência de chanfro exterior dos aderentes. Na Tabela 35 estão presentes os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os provetes com chanfro exterior dos aderentes e também para os mesmos sem o chanfro.

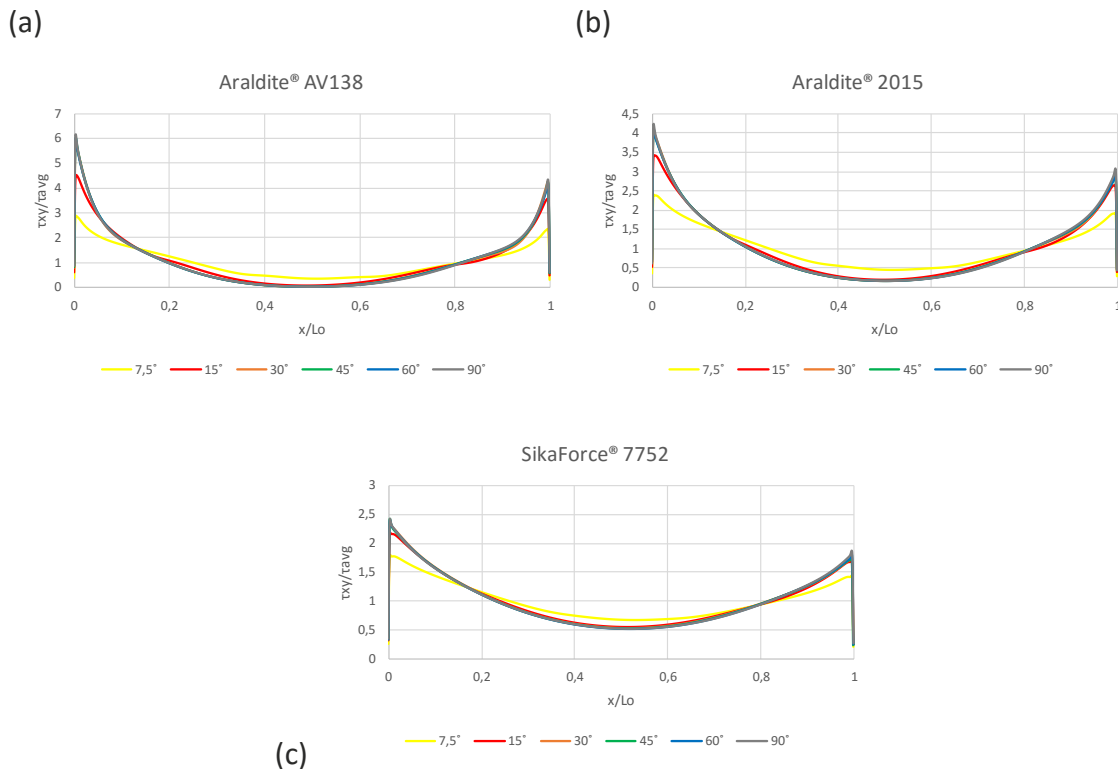


Figura 103 – Distribuição de tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função do ângulo do chanfro exterior dos aderentes, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

À semelhança do que ocorreu com as tensões σ_y , também na distribuição das tensões τ_{xy} se verifica a existência de picos de tensões nas extremidades da junta adesiva. O adesivo mais rígido é o que apresenta maiores valores de τ_{xy}/τ_{avg} . O adesivo mais dúctil demonstra uma distribuição mais uniforme das tensões geradas e, como tal, apresenta menores valores de τ_{xy}/τ_{avg} (ver Tabela 35). Verifica-se igualmente um aumento das tensões τ_{xy} com o aumento do ângulo do chanfro exterior do aderente.

Tabela 35 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, em função do ângulo do chanfro exterior dos aderentes

Adesivo	Ângulo do chanfro exterior do aderente					
	7,5°	15°	30°	45°	60°	90°
Araldite® AV138	2,88	4,54	5,79	6,02	6,03	6,19
Araldite® 2015	2,39	3,42	4,02	4,09	4,13	4,24
SikaForce® 7752	1,80	2,18	2,36	2,43	2,40	2,43

3.2.2.1.2 Resistência das juntas

A Figura 104 apresenta as curvas $P-\delta$ dos três adesivos analisados numericamente, considerando a alteração do ângulo do chanfro exterior em ambas as extremidades dos aderentes.

A distribuição das curvas $P-\delta$ mostra que os adesivos Araldite® AV138 e Aralite® 2015 são aqueles cujas juntas apresenta a maior resistência mecânica. Estes demonstram valores de $P_{m\acute{a}x}$ muito próximos um do outro, com a diferença de que no adesivo mais rígido (Araldite® AV138) o comportamento da junta ocorreu de forma linear até à rutura. O adesivo Araldite® 2015 apresenta plastificação do aderente devido aos valores elevados de $P_{m\acute{a}x}$ atingidos decorrentes da ductilidade do adesivo. O facto de o adesivo possuir alguma ductilidade, permite suportar cargas mais elevadas na junta e, como tal, um valor de $P_{m\acute{a}x}$ próximo do adesivo mais rígido deste estudo (Araldite® AV138). Este adesivo em análise apresenta um $\delta_{m\acute{a}x} \approx 20$ mm. Contudo, de forma a ser perceptível a evolução das curvas $P-\delta$, não é mostrada a curva $P-\delta$ completa na figura. O adesivo SikaForce® 7752 demonstra um comportamento linear até à rutura e, mais uma vez, é o que rompe a um valor de $P_{m\acute{a}x}$ mais reduzido.

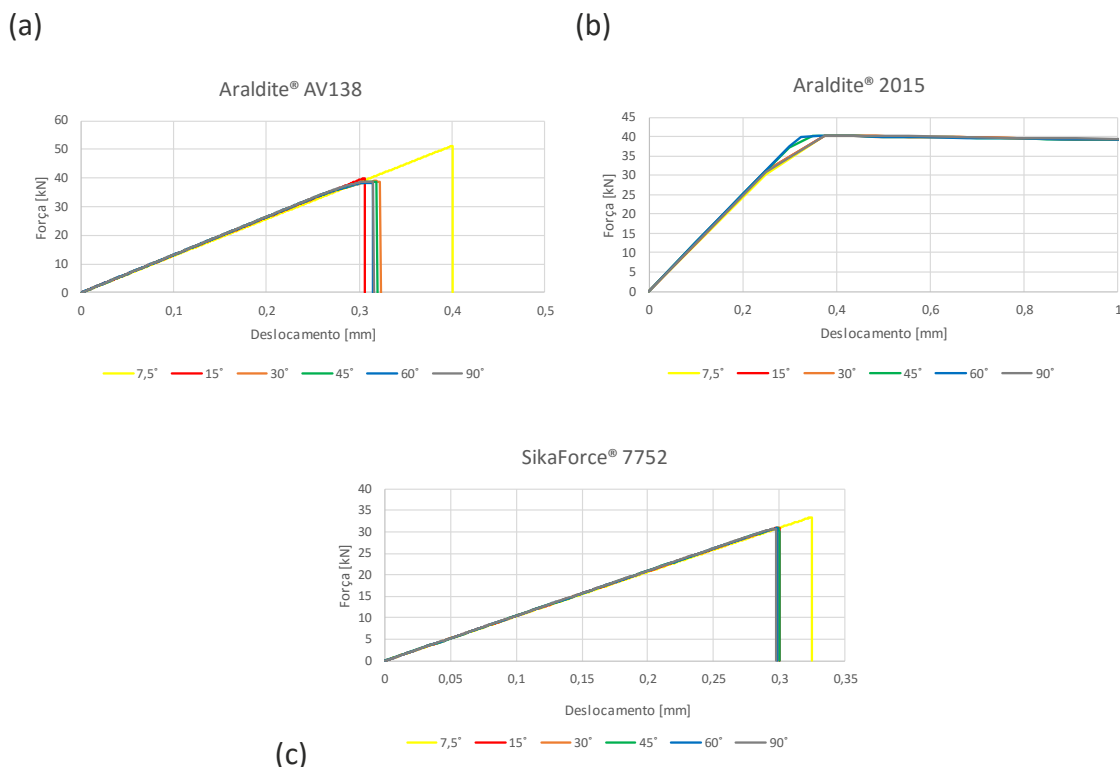


Figura 104 – Curvas P - δ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do chanfro exterior dos aderentes, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

3.2.2.1.2 Comparação de resultados

Na Tabela 36 estão apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função da variação do ângulo do chanfro exterior dos aderentes para os três adesivos, e o aumento percentual relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $\Theta=90^\circ$. Na Figura 105 é possível verificar as curvas de evolução de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos, com a variação de Θ .

A partir da tabela é possível verificar que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ observados são superiores para as juntas adesivas com o Araldite® AV138 para um ângulo de 15° . Dá-se uma diminuição da resistência mecânica a partir dos 30° e que tende a estabilizar até aos 90° . Este comportamento deve-se à incapacidade de os tubos de deformarem plasticamente devido ao aumento da secção dos mesmos nas extremidades da junta, originada pelo aumento do ângulo do chanfro exterior dos aderentes.

O adesivo Araldite® 2015 é o que apresenta valores de resistência mais elevados a partir de um ângulo de chanfro de 15° . De facto, o equilíbrio entre a resistência mecânica e a ductilidade do mesmo resulta num desempenho idêntico da junta com a variação do ângulo do chanfro. Como tal, a aplicação de um chanfro exterior nos aderentes numa junta adesiva com o Araldite® 2015 é indiferente no que toca à tentativa de melhoria do comportamento da mesma, mas implica custos extra na sua fabricação devido aos custos dos processos de maquinagem associados.

O SikaForce® 7752 apresenta um ligeiro aumento da resistência mecânica até a um ângulo de 15°. Para $\theta=7,5^\circ$ dá-se o $\Delta P_{\text{máx}}$ mais elevado registado entre todos os modelos analisados. O ligeiro acréscimo de $P_{\text{máx}}$ registado deve-se ao facto deste adesivo apresentar uma tensão de rutura mais reduzida que a dos restantes adesivos. Para $\theta=7,5^\circ$ este acréscimo é superior, uma vez que a secção transversal da junta nessas zonas é mais reduzida e, como tal, permite a plastificação dos tubos de alumínio.

Tabela 36 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] para os três adesivos em função do ângulo do chanfro exterior dos aderentes, e respetivo aumento percentual

θ [°]	Araldite® AV138	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	Araldite® 2015	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	SikaForce® 7752	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]
7,5°	51323,90	32,41	40128,93	-0,19	33437,65	8,65
15°	40061,55	3,35	40132,93	-0,18	30998,13	0,73
30°	38895,70	0,35	40132,70	-0,18	30844,17	0,23
45°	38675,21	-0,22	40122,94	-0,20	30839,33	0,21
60°	38406,61	-0,92	40104,72	-0,25	30812,86	0,13
90°	38761,30		40203,68		30774,38	

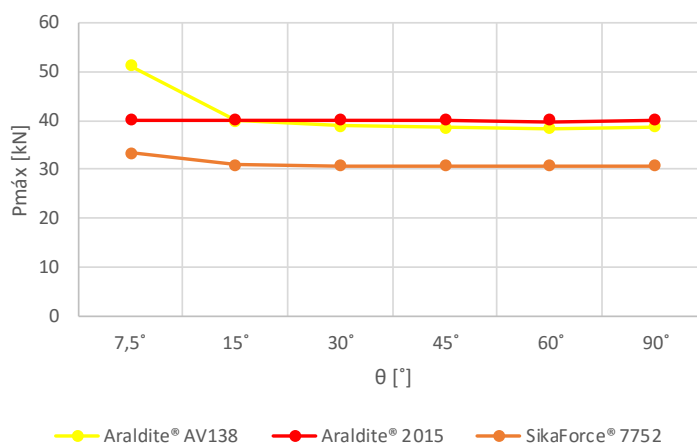


Figura 105 – Evolução de $P_{\text{máx}}$ em função do ângulo do chanfro exterior dos aderentes, para os três adesivos

A partir da Figura 105 verifica-se que a diminuição do ângulo do chanfro exterior dos aderentes provoca alterações mais evidentes no desempenho da junta quando o adesivo em questão apresenta uma rigidez mais elevada. Como tal, para o Araldite® 2015 não se dão alterações no que toca à variação de $P_{\text{máx}}$. Para o SikaForce® 7752 também não se observam oscilações significativas na curva apresentada. Para o adesivo

Araldite® AV138 dá-se um aumento substancial da resistência mecânica para $\theta=7,5^\circ$ uma vez que a diminuição da área transversal das extremidades da junta permite a plastificação dos tubos de alumínio, que resulta num aumento de $P_{\text{máx}}$.

3.2.2.2 Chanfro interior dos aderentes

Esta alteração geométrica consiste na aplicação de um chanfro interno dos aderentes de forma a tentar diminuir a concentração dos picos de tensão nas extremidades da junta. A aplicação desta alteração implica também a existência de um excesso de adesivo nas extremidades de L_0 , que poderá igualmente participar nas alterações do comportamento das juntas.

Ao aplicar um chanfro interior é necessário alterar as características da malha nessa zona (Figura 106). Como foi mencionado antes, a aplicação deste tipo de chanfro implica a existência de um excesso de adesivo. Como tal, a partir da figura indicada, é possível visualizar o chanfro interior (zona nº1) e o excesso de adesivo (zona nº2), divididos por uma linha preta representada na mesma. Para esta alteração geométrica consideraram-se elementos sólidos axissimétricos (CAX4R do ABAQUS®) e aplicados os *mesh controls* em função dos mesmos. Foram atribuídos valores de *bias ratio* na linha de partição que faz fronteira com o topo do tubo (linha vermelha da Figura 106). Como tal, esta zona ficou com 4 elementos, enquanto a fronteira que o chanfro faz com a película de adesivo (linha amarela da Figura 106) ficou com 10 elementos. Nesta última pretende-se obter uma precisão mais elevada na transmissão dos esforços, portanto é necessário este refinamento da malha.

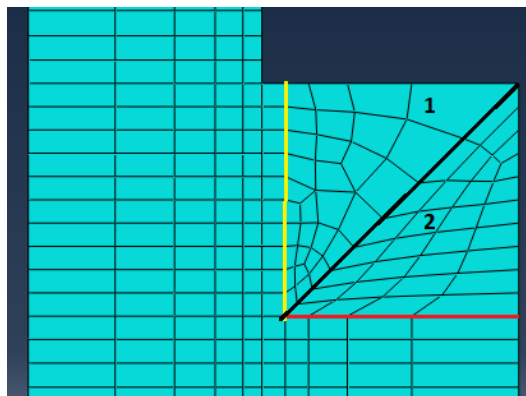


Figura 106 – Detalhe da malha usada no chanfro interior do aderente

3.2.2.2.1 Distribuições de tensões

3.2.2.2.1.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 107 estão representadas as curvas de distribuição das tensões σ_y dos provetes considerando a variação do ângulo do chanfro interior nos aderentes, para os três adesivos. Na Tabela 37 estão presentes os valores máximos de $\sigma_y/\tau_{\text{avg}}$ obtidos a partir

das mesmas curvas de forma a facilitar a visualização de alterações no comportamento nas juntas adesivas.

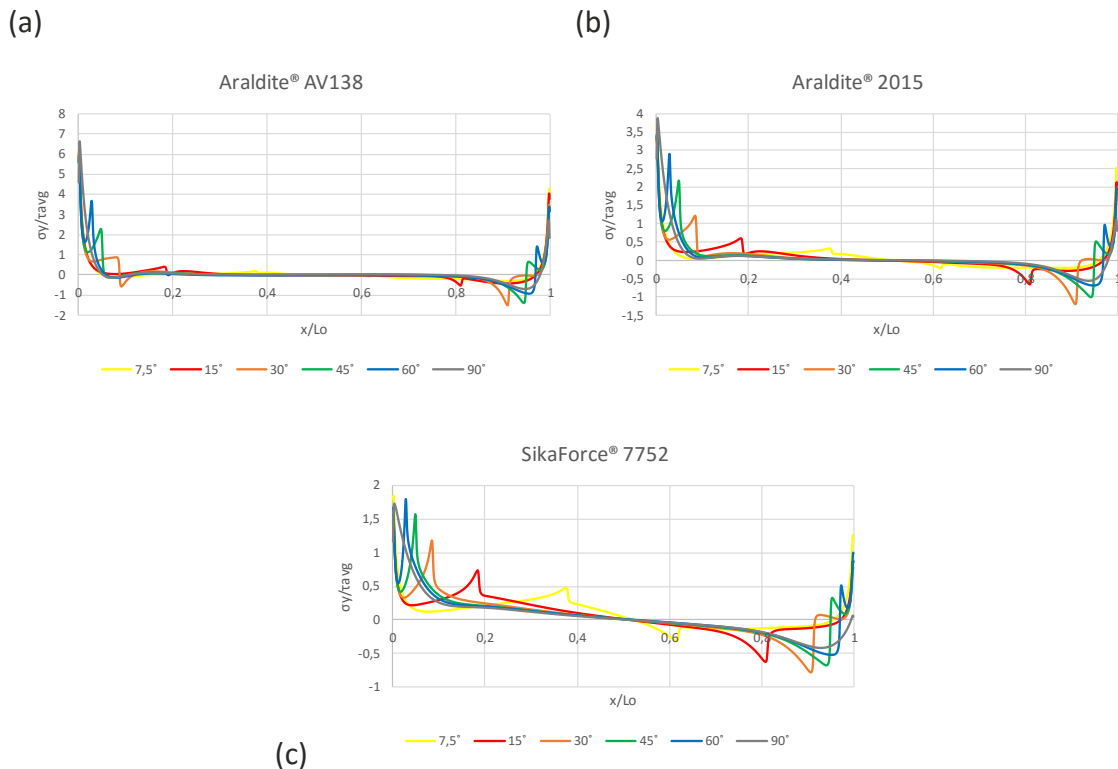


Figura 107 – Distribuição de tensões σ_y/τ_{avg} em função do ângulo do chanfro interior dos aderentes, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

A visualização da distribuição dos gradientes de tensões σ_y de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ em direção à zona central da sobreposição (Figura 107) permite aferir a existência de dois picos de concentrações de tensões. O primeiro pico é o mais elevado pois está situado na extremidade da junta adesiva. Aqui, a secção transversal do aderente é mais reduzida e, como tal, a junta torna-se mais suscetível a concentrações de tensões σ_y nesse local. O segundo pico é mais reduzido e surge para valor de x/L_0 que corresponde ao local em que se dá a inclinação θ do chanfro interior do aderente. Apesar disto, as curvas apresentam uma boa coerência no sentido de que os adesivos com maior valor de E acusam valores mais elevados de σ_y/τ_{avg} (Tabela 37).

De uma forma geral, verifica-se que o aumento do ângulo do chanfro interior do aderente causa um acréscimo da concentração de tensões na junta. Uma vez que a rigidez do adesivo é inferior à dos tubos de alumínio, a diminuição o ângulo do chanfro implica a existência de uma quantidade de adesivo na extremidade da junta mais elevada. Como tal, dá-se uma suavização da distribuição de tensões originadas pela deformação longitudinal, já que o adesivo apresenta uma rigidez inferior ao do tubo de alumínio.

Tabela 37 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, em função do ângulo do chanfro interior dos aderentes

Adesivo	Ângulo do chanfro interior do aderente					
	7,5°	15°	30°	45°	60°	90°
Araldite® AV138	6,28	6,17	5,94	5,96	5,91	6,65
Araldite® 2015	3,73	3,39	3,28	3,38	3,45	3,88
SikaForce® 7752	1,85	1,51	1,49	1,58	1,79	1,73

A partir da leitura dos valores máximos de σ_y/τ_{avg} , presentes na Tabela 37, verifica-se genericamente um ligeiro decréscimo dos mesmos em relação aos da geometria base do provete. A existência de um chanfro interior do aderente implica a deposição de um excesso de adesivo na extremidade de L_0 , que por sua vez permite uma ligeira diminuição das tensões em relação às do provete com a geometria base. Isto acontece porque o adesivo apresenta um valor de E inferior ao do alumínio, e como a secção transversal de adesivo em relação à de alumínio é superior, existirá uma atenuação das tensões instaladas nessa zona da junta adesiva.

3.2.2.2.1.2 Tensões de corte

Na Figura 108 estão representadas as curvas de distribuição das tensões τ_{xy} dos provetes com chanfro interior do aderente, para os três adesivos. Na Tabela 37 estão presentes os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} obtidos a partir das mesmas curvas. Estão também os valores máximos de σ_y/τ_{avg} relativos aos provetes com a geometria definida na secção (com $L_0=40\text{mm}$) de forma a facilitar a visualização de alterações no comportamento nas juntas adesivas.

Tal como aconteceu relativamente à distribuição de tensões σ_y , também para as tensões τ_{xy} se verifica a existência de dois picos de tensão. Ao efetuar a leitura das curvas de distribuição de tensões τ_{xy} de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ em direção à zona central da junta adesiva, verifica-se que o segundo pico possui um valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} superior ao do primeiro pico. O valor de x/L_0 onde se geram as maiores tensões corresponde à zona onde se inicia a variação geométrica que origina o chanfro. Essa alteração geométrica

gerou singularidades que provocaram o aparecimento desse pico. Além disso, a deformação diferencial dos aderentes nessa zona é bastante acentuada, contribuindo para a elevada concentração de tensões τ_{xy} . As curvas apresentam uma evolução lógica relativamente à rigidez que os adesivos apresentam.

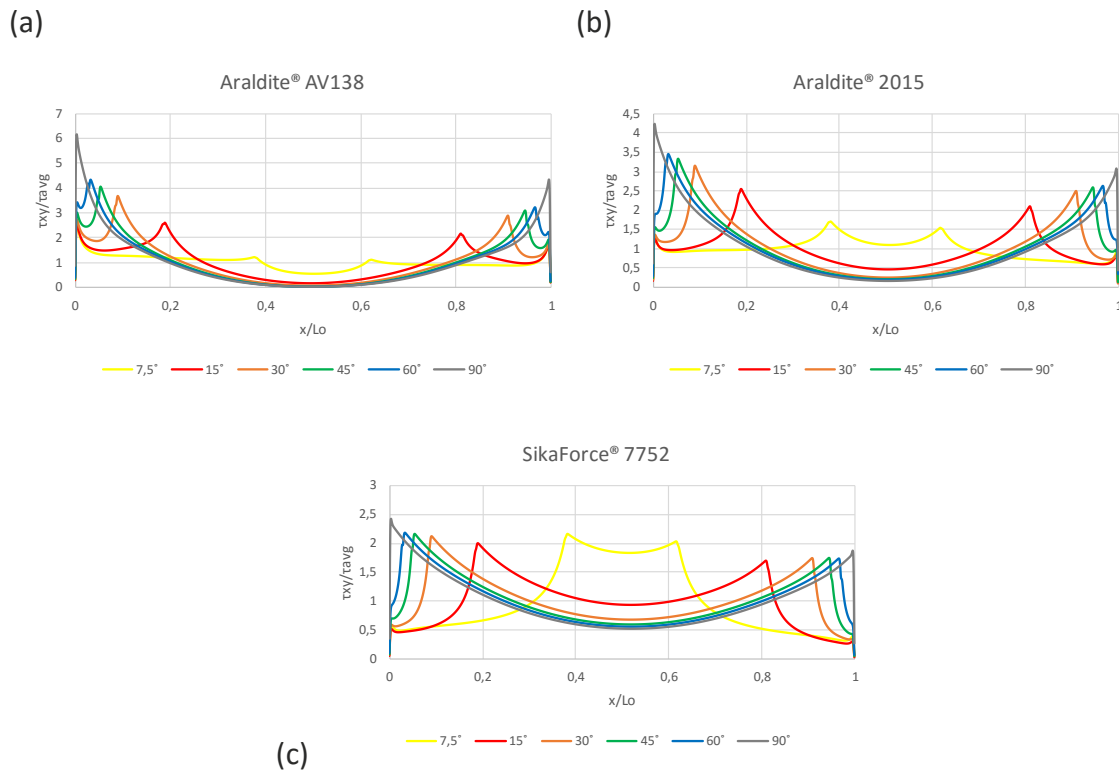


Figura 108 – Distribuição de tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função do ângulo do chanfro interior dos aderentes, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Na Tabela 37 estão presentes os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, retirados a partir da Figura 108. As juntas analisadas apresentam uma diminuição do valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} para todos os adesivos, para ângulos do chanfro interior dos aderentes mais reduzidos. Os picos gerados em $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ serão inferiores, uma vez que excesso de adesivo permite uma redução da propagação das tensões τ_{xy} graças ao diferencial de rigidez entre o mesmo e o tubo de alumínio.

Tabela 38 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, em função do ângulo do chanfro interior dos aderentes

Adesivo	Ângulo do chanfro interior do aderente					
	7,5°	15°	30°	45°	60°	90°
Araldite® AV138	2,56	2,59	3,69	4,03	4,32	6,19
Araldite® 2015	1,71	2,54	3,16	3,32	3,44	4,24
SikaForce® 7752	2,16	2,01	2,12	2,16	2,19	2,43

3.2.2.2 Resistência das juntas

A Figura 109 apresenta as curvas $P-\delta$ dos três adesivos analisados numericamente, considerando a variação do chanfro interior dos aderentes.

As curvas $P-\delta$ deste caso de estudo apresentam linearidade até à rutura para o adesivo Araldite® AV138 e SikaForce® 772 e a ocorrência de plastificação dos aderentes para o caso do Araldite® 2015. Para este último caso, $\delta_{m\acute{a}x} \approx 20$ mm, mas truncou-se a curva devido a questões relacionadas com a escala do gráfico que não permitem uma boa perceção da evolução das curvas $P-\delta$. Verifica-se uma boa coerência relativamente à rigidez que os adesivos apresentam e os respetivos valores de $P_{m\acute{a}x}$. O adesivo Araldite® 2015 apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}$ muito próximo do Araldite® AV138 devido à plastificação gerada nos aderentes, originada pela sua ductilidade. No que concerne às juntas adesivas com o SikaForce® 7752, regista-se o valor de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevado para um ângulo de chanfro igual a 7,5°. Para este ângulo, a quantidade de adesivo nessa zona da junta é substancialmente mais elevada. Como se trata de um adesivo de elevada ductilidade, dá-se uma deformação plástica elevada no tubo de alumínio interior. Isto resulta numa melhoria do desempenho da junta e que supera o das juntas com os adesivos de epóxido. Contudo, o aumento do ângulo do chanfro origina um decréscimo de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas com este adesivo. Para um ângulo de 15° verifica-se um valor de $P_{m\acute{a}x}$ próximo dos restantes adesivos. A partir deste valor observa-se que o SikaForce® 7752 é o que possui as juntas adesivas com menor resistência mecânica.

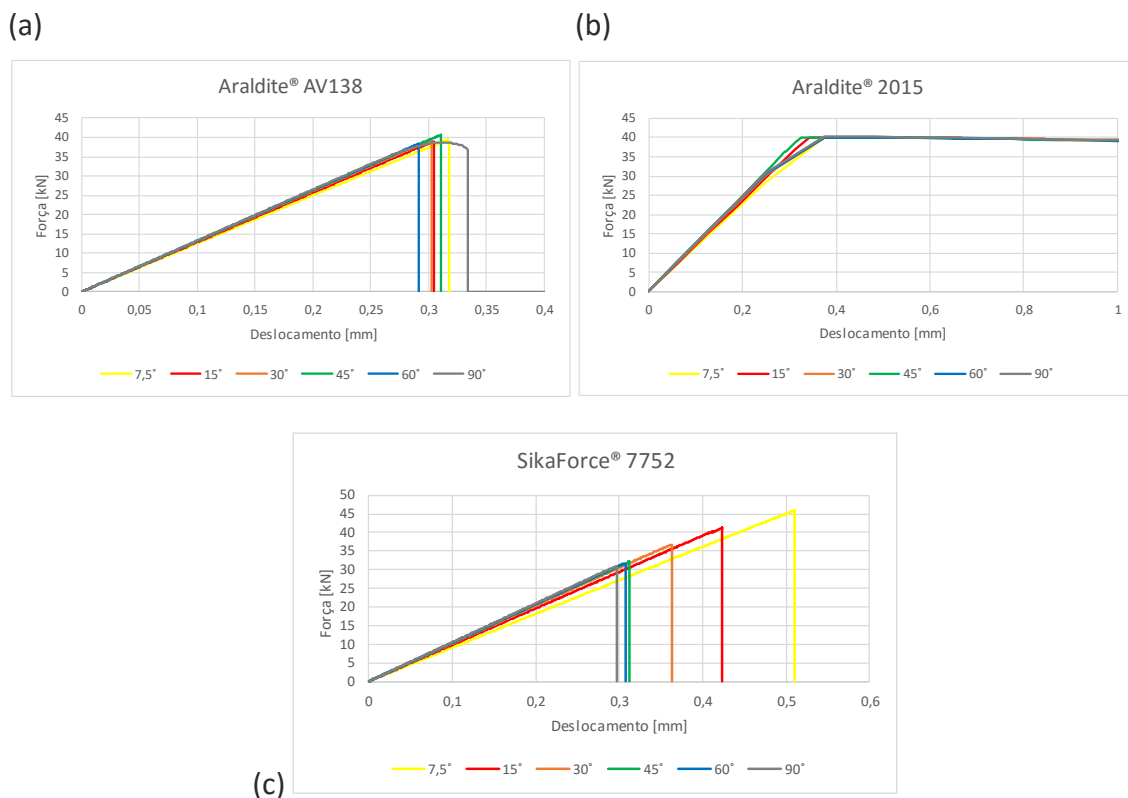


Figura 109 – Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do chanfro interior dos aderentes, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

3.2.2.2.2 Comparação de resultados

Na Tabela 39 estão presentes os valores de $P_{\text{máx}}$ em função da variação do ângulo do chanfro interior dos aderentes adicionado nas extremidades das juntas, para os três adesivos, e o aumento percentual relativamente ao valor de $P_{\text{máx}}$ para $\theta=90^\circ$. Na Figura 110 é possível verificar as curvas de evolução de $P_{\text{máx}}$ para os três adesivos, com a variação de θ .

Relativamente às juntas adesivas com o Araldite® AV138, é possível observar que a existência de um chanfro interior nos aderentes permite uma estabilização de $P_{\text{máx}}$ para todos os ângulos considerados. De facto, o excesso de adesivo nas extremidades da junta permite um amaciamento das tensões geradas e, como tal, uma diminuição de $P_{\text{máx}}$. Por esta razão é que, comparativamente às juntas com chanfro exterior dos aderentes, não se verifica o mesmo aumento percentual para um ângulo de $7,5^\circ$.

No que concerne às juntas com o Araldite® 2015, não se registam alterações na resistência da junta com a variação do ângulo de chanfro, uma vez que o equilíbrio entre tensão de rutura e rigidez deste adesivo permite uma boa adaptabilidade às várias alterações impostas.

As juntas com o SikaForce® 7752 apresentam um $\Delta P_{\text{máx}}$ elevado para ângulos mais reduzidos, nomeadamente para 7,5°. A sua ductilidade associada a uma quantidade mais elevada deste material nas extremidades da junta para ângulos mais reduzidos, resulta numa plastificação mais acentuada dos tubos de alumínio. Por este motivo se verifica um valor de $P_{\text{máx}}$ mais elevado para $\theta=7,5^\circ$.

Tabela 39 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] para os três adesivos em função do ângulo do chanfro interior dos aderentes, e respetivo aumento percentual

θ [°]	Araldite® AV138	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	Araldite® 2015	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	SikaForce® 7752	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]
7,5°	39422,30	1,71	40134,68	-0,17	45865,92	49,04
15°	38952,25	0,49	40131,61	-0,18	41169,77	33,78
30°	39340,78	1,49	40135,75	-0,17	36710,51	19,29
45°	40666,77	4,92	40147,97	-0,14	32174,15	4,55
60°	38351,39	-1,06	40116,47	-0,22	31735,27	3,12
90°	38761,30		40203,68		30774,38	

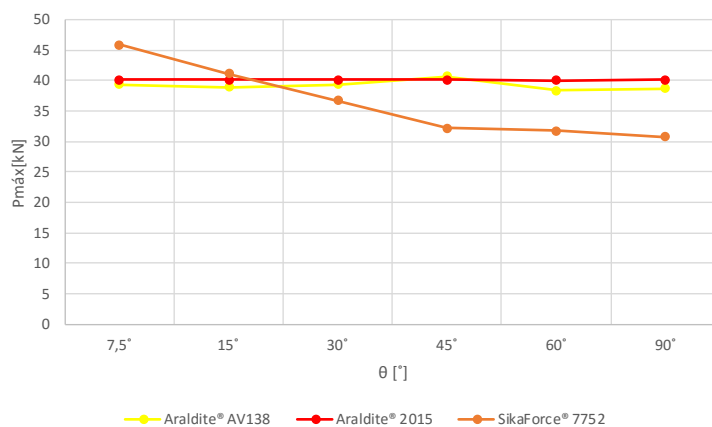


Figura 110 – Evolução de $P_{\text{máx}}$ em função do ângulo do chanfro interior dos aderentes, para os três adesivos

A partir da Figura 110 é possível observar que ambos os adesivos de epóxico demonstram uma estabilização de $P_{\text{máx}}$ ao longo de toda a variação de ângulo de chanfro interior dos aderentes. No que concerne às juntas com o SikaForce® 7752, verifica-se um decréscimo de $P_{\text{máx}}$ à medida que o ângulo de chanfro aumenta, contudo estas juntas demonstram uma estabilização do comportamento mecânico a partir de $\theta=45^\circ$.

3.2.2.3 Filete de adesivo

A aplicação de um filete de adesivo nas extremidades de L_0 visa a redução das tensões de pico e, desta forma, prevenir a rutura prematura da junta. Esta alteração provoca um aumento de L_0 , passando a existir valores acima e abaixo do comprimento normalizado, ou seja, $x/L_0 < 0$ e de $x/L_0 > 1$. Seguidamente são apresentados os dados obtidos pela análise numérica com estas alterações mencionadas, para os três adesivos.

À semelhança do que aconteceu relativamente aos chanfros dos aderentes, também nesta situação é necessário modificar as características da malha para zona da junta adesiva tubular (Figura 111). Para o filete de adesivo consideraram-se elementos sólidos axissimétricos (CAX4R do ABAQUS®) e aplicados os *mesh controls* em função dos mesmos. Foram atribuídos valores de *bias ratio* na linha de partição que faz fronteira com o topo do tubo (linha vermelha da Figura 111). Como tal esta zona ficou com 4 elementos enquanto a fronteira que o chanfro faz com a película de adesivo (linha amarela da Figura 111) ficou com 10 elementos. Nesta última pretende-se obter uma precisão mais elevada na transmissão dos esforços, portanto é necessário este refinamento da malha.

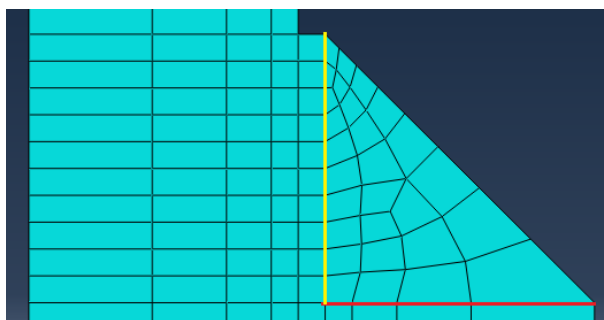


Figura 111 – Detalhe da malha usada no filete de adesivo

3.2.2.3.1 Distribuições de tensões

3.2.2.3.1.1 Tensões de arrancamento

Os resultados da análise numérica relativamente à distribuição das tensões σ_y são apresentadas na Figura 112. A partir destas, criou-se a Tabela 40 de forma a apresentar de forma clara os respetivos valores máximos de σ_y/τ_{avg} .

A distribuição de tensões σ_y para os três adesivos mostra a presença de mais do que um pico de tensão: um em cada extremidade da junta adesiva (próximo de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$) e os outros na extremidade dos filetes de adesivo, cujo valor x/L_0 encontra-se fora do comprimento normalizado, uma vez que os filetes de adesivo são acrescentados nas extremidades de L_0 . Existe uma diminuição das tensões σ_y para os valores de x/L_0 que correspondem às zonas centrais dos filetes de adesivo. Isto deve-se ao facto de a rigidez do adesivo ser inferior ao do aderente, pois apesar de se encontrar nas extremidades, o

seu valor de E mais reduzido relativamente ao do alumínio permite diminuir a concentração de tensões nessa zona. A partir da Tabela 40 é possível observar este efeito descrito a partir da leitura dos valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os provetes com filete de adesivo, em comparação com aqueles que não o têm.

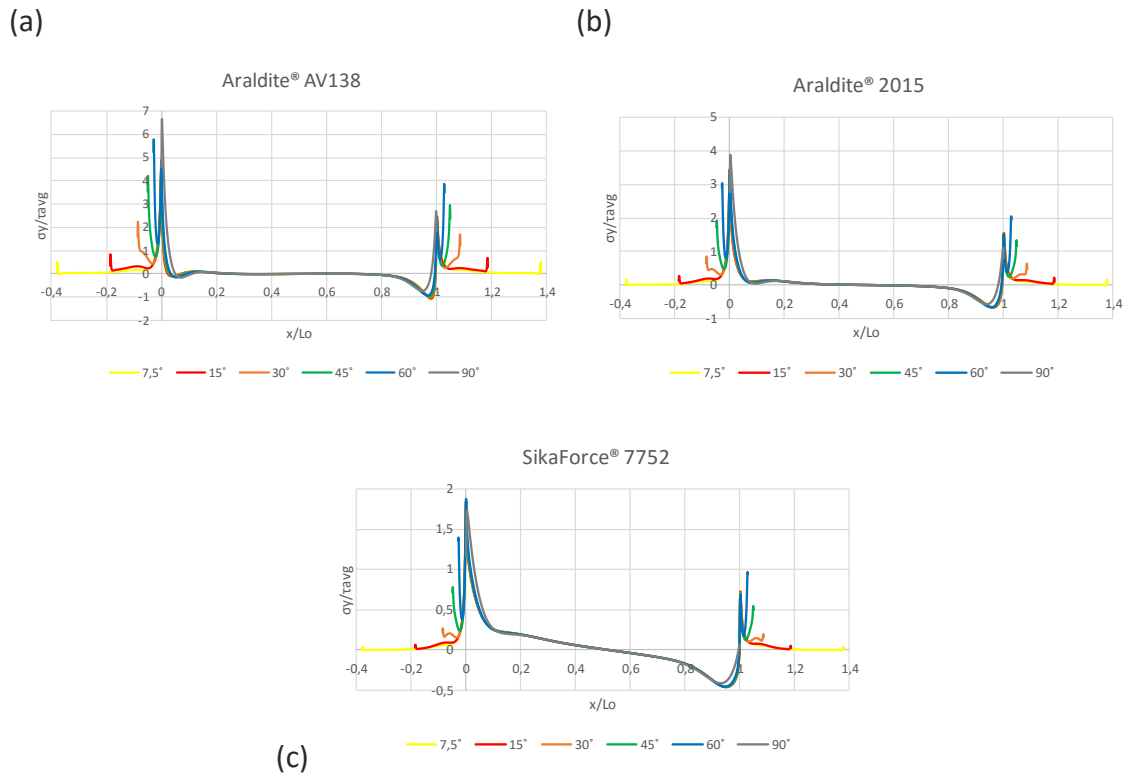


Figura 112 – Distribuição de tensões σ_y/τ_{avg} em função do ângulo do filete de adesivo, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Na Tabela 40 verifica-se que, no geral, houve uma descida dos valores máximos de σ_y/τ_{avg} com a diminuição do ângulo do filete de adesivo. O acréscimo de um filete de adesivo nas extremidades das juntas permite uma distribuição mais suavizada das tensões de compressão causadas pela deformação longitudinal. A maior diferença registada está no Araldite® AV138, uma vez que este é o adesivo com maior valor de E .

Tabela 40 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, em função do ângulo do filete de adesivo

Adesivo	Ângulo do filete de adesivo					
	7,5°	15°	30°	45°	60°	90°
Araldite® AV138	4,43	4,42	4,38	4,54	5,78	6,65
Araldite® 2015	3,23	3,23	3,25	3,29	3,45	3,88
SikaForce® 7752	1,84	1,84	1,83	1,85	1,88	1,73

De uma forma geral, verifica-se que a adição de um filete de adesivo nos provetes permite a diminuição da concentração de tensões nas extremidades da junta adesiva tubular para adesivos mais rígidos. Este comportamento, ainda que evidente, não se dá de forma tão acentuada em juntas com adesivos mais dúcteis.

3.2.2.3.1.2 Tensões de corte

A Figura 113 mostra os resultados da análise numérica relativamente à distribuição das tensões τ_{xy} . A Tabela 41 resume os respetivos valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} .

A distribuição das tensões τ_{xy} , tal como a distribuição das σ_y , apresenta coerência relativamente ao posicionamento das curvas, uma vez que os picos de concentração observados na Figura 113 aumentam à medida que a rigidez dos adesivos aumenta. Desta forma, observa-se igualmente um maior valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} para os respetivos adesivos (Tabela 41).

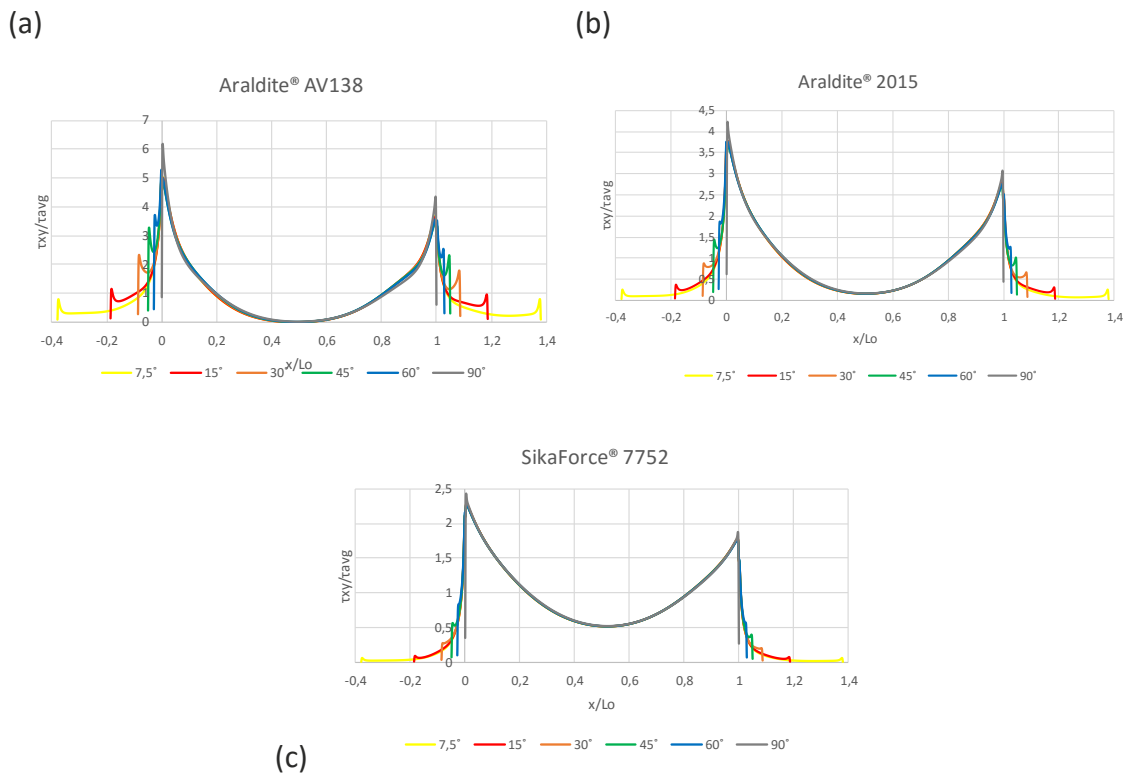


Figura 113 – Distribuição de tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função do ângulo do filete de adesivo, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Tabela 41 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, em função do ângulo do filete de adesivo

Adesivo	Ângulo do filete de adesivo					
	7,5°	15°	30°	45°	60°	90°
Araldite® AV138	5,03	4,99	4,90	5,01	5,29	6,19
Araldite® 2015	3,78	3,78	3,75	3,72	3,77	4,24
SikaForce® 7752	2,29	2,29	2,28	2,28	2,29	2,43

A adição de um filete de adesivo em ambas as extremidades aumenta o valor de L_0 através do qual as tensões τ_{xy} se distribuem. Este aumento efetuado com um material mais dúctil do que o do aderente (alumínio) faz com que a deformação diferencial seja

mais reduzida nessas zonas. Como tal, as tensões τ_{xy} vão-se distribuir de forma mais uniforme por toda a área de sobreposição, o que provoca uma redução do valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} . Como tal, com o auxílio da Tabela 41, verifica-se a redução das tensões de pico, sobretudo para os adesivos que apresentam maior valor de E .

3.2.2.3.2 Resistência das juntas

Na Figura 114 estão presentes as curvas P - δ obtidas por intermédio da análise numérica por MDC no ABAQUS®, considerando a existência de um filete de adesivo nas extremidades de L_0 , para os três adesivos.

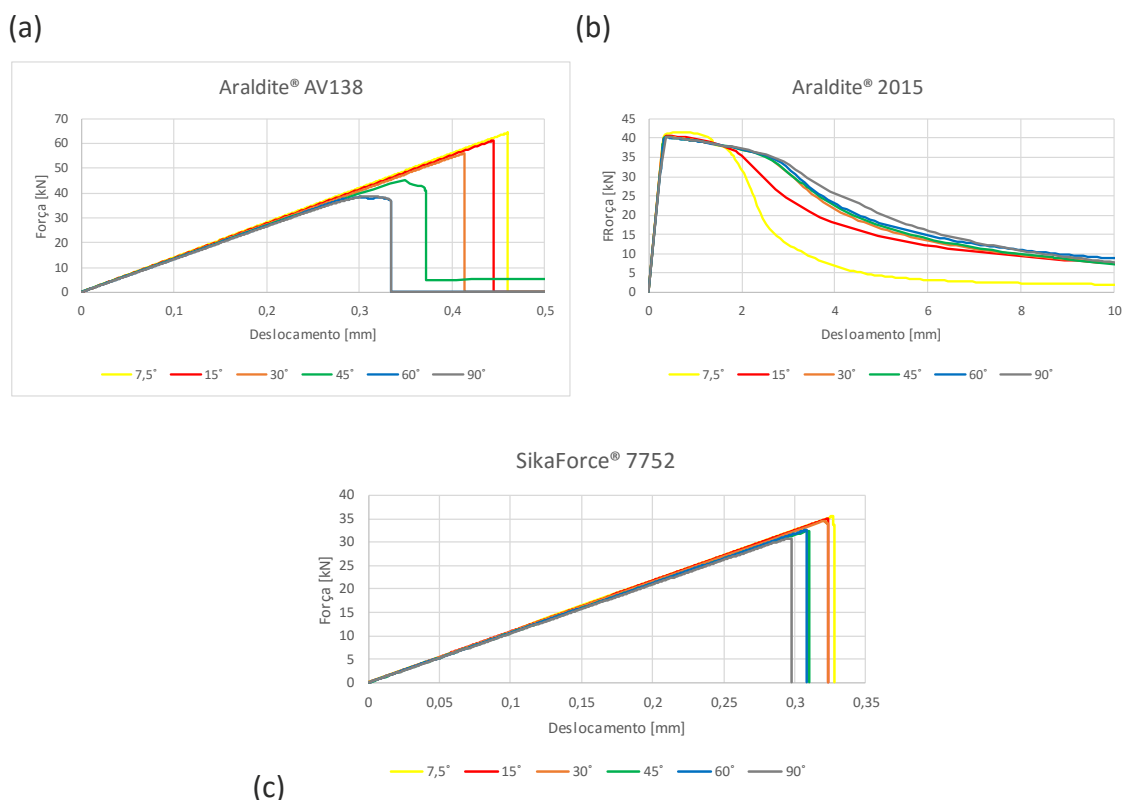


Figura 114 – Curvas P - δ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do filete de adesivo, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

As curvas apresentadas mostram como a rigidez global das juntas adesivas está de acordo com a maior ou menor ductilidade característica do adesivo em questão. Para as juntas com o Araldite® AV138, a diminuição do ângulo do filete de adesivo origina um aumento da resistência da junta. Como se trata de um adesivo muito rígido, o excesso de adesivo nas extremidades da junta vai permitir a deformação plástica do alumínio e, como tal, um acréscimo do valor de $P_{m\acute{a}x}$. Para ângulos de filete de adesivo mais reduzido, regista-se uma redução da resistência da junta. De notar que, para um ângulo de 45°, $\delta_{m\acute{a}x} \approx 4$ mm.

O aumento do ângulo do filete de adesivo nas juntas com adesivo Araldite® 2015 não provoca alterações na resistência da mesma. Como este adesivo apresenta um bom equilíbrio entre resistência e ductilidade, o mesmo é capaz de absorver as cargas induzidas na junta com tipo de configuração, sem que haja alterações significativas de $P_{m\acute{a}x}$. A sua ductilidade permite que a junta em questão atinja valores de $P_{m\acute{a}x}$ elevados, muito próximos dos do Araldite® AV138. Para este caso, ocorre a plastificação dos tubos de alumínio, cujo valor de $\delta_{m\acute{a}x} \approx 50$ mm.

Como foi dito antes, estes valores de $\delta_{m\acute{a}x}$ mencionados para o Araldite® AV138 e para o Araldite® 2015 foram omitidos do gráfico apresentado de forma a que seja mais perceptível o comportamento das juntas adesivas até à sua rutura.

No que concerne às juntas com o adesivo SikaForce® 7752, verifica-se um decréscimo de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento do ângulo do filete de adesivo. Um ângulo mais reduzido implica uma menor quantidade de adesivo no filete e, como tal, menor será a capacidade de absorver tensões nessa zona. Isto resulta numa redução da resistência da junta.

As juntas adesivas com o SikaForce® 7752 apresentam-se novamente como sendo as que apresentam a menor resistência mecânica observada. Para este caso, verifica-se um comportamento semelhante ao das juntas com o Araldite® AV138. Contudo, como este adesivo de poliuretano apresenta uma tensão de rotura inferior, menores serão as tensões desenvolvidas e, conseqüentemente, menor serão os valores de $P_{m\acute{a}x}$ registados.

3.2.2.3.3 Comparação de resultados

Na Tabela 42 estão apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função do ângulo de filete de adesivo, para os três adesivos, assim como o respetivo aumento percentual relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido para a junta com $\theta=90^\circ$. Na Figura 115 encontram-se representados graficamente os valores de $P_{m\acute{a}x}$ mencionados.

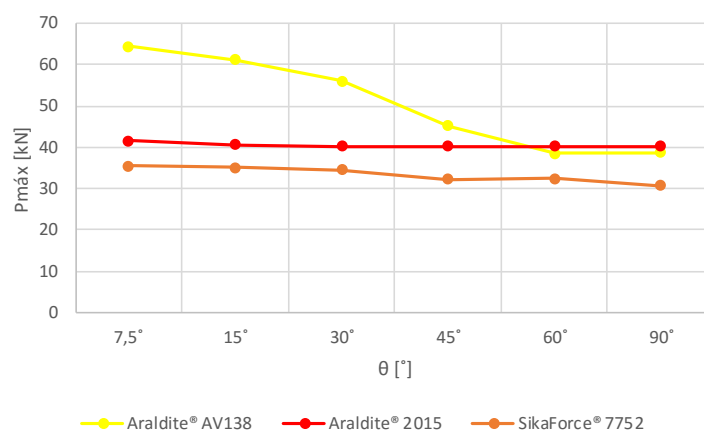
O acréscimo de filete de adesivo nas extremidades de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ permitiu aumentar a resistência das juntas com o Araldite® AV138 para ângulos mais reduzidos. Como este adesivo de epóxido apresenta uma rigidez bastante elevada, este acréscimo de adesivo permitiu atenuar a formação dos picos de tensão. Desta forma, a camada adesiva consegue absorver uma maior quantidade de cargas e gerar a plastificação do aderente e, como tal, aumentar $P_{m\acute{a}x}$.

As juntas adesivas mais com o Araldite® 2015 não apresentam alterações no seu comportamento para qualquer ângulo do filete de adesivo. O SikaForce® 7752 apresenta uma estabilização na resistência mecânica entre $\theta=7,5^\circ$ e $\theta=30^\circ$. A partir de $\theta=45^\circ$ dá-se um ligeiro decréscimo de $P_{m\acute{a}x}$. Este comportamento ocorre devido à redução da quantidade de adesivo nas extremidades da junta. Como tal, a plastificação dos aderentes dá-se a uma taxa mais reduzida e, conseqüentemente, a junta não será capaz de suportar carregamentos tão elevados.

Tabela 42 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] para os três adesivos em função do ângulo do filete de adesivo, e respetivo aumento percentual

θ [°]	Araldite® AV138	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	Araldite® 2015	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	SikaForce® 7752	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]
7,5°	64346,70	66,01	41520,08	3,27	35502,29	15,36
15°	61270,03	58,07	40559,97	0,89	35103,89	14,07
30°	56081,75	44,68	40302,74	0,25	34464,95	11,99
45°	45213,91	16,65	40227,04	0,06	32277,61	4,88
60°	38572,29	-0,49	40158,19	-0,11	32503,64	5,62
90°	38761,30		40203,68		30774,38	

A Figura 115 apresenta a variação gráfica de $P_{\text{máx}}$ para os três adesivos conforme a existência de filete de adesivo na junta.

Figura 115 – Evolução de $P_{\text{máx}}$ em função do ângulo do filete de adesivo, para os três adesivos

A partir do gráfico é possível observar que a adição de filete de adesivo gerou não condicionou o desempenho mecânico para as juntas com o Araldite® 2015. Relativamente ao SikaForce® 7752 verifica-se um comportamento semelhante apesar de que entre $\theta=45^\circ$ e $\theta=90^\circ$ se observam ligeiras oscilações nos valores de $P_{\text{máx}}$. As juntas com o Araldite® AV138 são as que definitivamente ficam mais condicionadas com a adição de um filete de adesivo. Uma vez que se trata de um adesivo extremamente rígido, o acréscimo deste material na junta vai permitir uma melhoria na resistência das juntas. De facto, para ângulos mais reduzidos registam-se valores de $P_{\text{máx}}$ mais elevados.

3.2.3 Análise dos resultados obtidos

Na Tabela 43 estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada parâmetro geométrico indicado e o aumento percentual relativamente ao primeiro valor de resistência da variação imposta no respetivo parâmetro, para cada adesivo.

Tabela 43 – Resumo da resistência máxima obtida em função do parâmetro geométrico considerado, com o respetivo aumento percentual

Parâmetro geométrico considerado	Variação imposta	$P_{m\acute{a}x}$ [N]			$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]		
		Araldite®	Araldite®	SikaForce®	Araldite®	Araldite®	SikaForce®
		AV138	2015	7752	AV138	2015	7752
L_o [mm]	10	21546,61	14539,30	10496,25	-	-	-
	20	27465,82	28891,84	19455,48	27,5	98,7	85,4
	30	37577,95	40036,13	26153,55	74,4	175,4	149,2
	40	38761,30	40203,68	30778,64	79,9	176,5	193,2
	50	38972,83	40647,09	33786,90	80,9	179,6	221,9
t_{SI} [mm]	1	25961,72	21173,94	22986,35	-	-	-
	2	38761,30	40203,68	30778,64	49,3	89,9	33,9
	3	48900,00	50091,65	35231,77	88,4	110,2	53,3
	4	51352,61	50104,69	38065,68	97,8	110,3	65,6
	5	49882,48	50119,40	39972,17	92,1	110,3	73,9
t_{SE} [mm]	1	35234,68	23829,17	35139,16	-	-	-
	2	38761,30	40203,68	30778,64	10,0	68,7	-12,4
	3	35872,45	40199,59	29016,46	1,8	68,7	-17,4
	4	34361,73	40181,93	28164,33	-2,5	68,6	-19,8
	5	33553,46	40194,25	27660,85	-4,8	68,7	-21,3
$t_{SI}-t_{SE}$ [mm]	1	29344,94	21171,12	26041,66	-	-	-
	2	38761,30	40203,68	30778,64	32,1	89,9	18,2
	3	44235,01	55065,69	32986,27	50,7	160,1	43,5
	4	47821,69	55713,67	34249,25	63,0	163,2	49,0
	5	49905,15	55947,24	35032,82	70,1	164,3	52,4
Chanfro exterior do aderente	7,5°	51323,90	40128,93	33437,65	-32,41	-0,19	8,65
	15°	40061,55	40132,93	30998,13	3,35	-0,18	0,73
	30°	38895,70	40132,70	30844,17	0,35	-0,18	0,23
	45°	38675,21	40122,94	30839,33	-0,22	-0,20	0,21
	60°	38406,61	40104,72	30812,86	-0,92	-0,25	0,13
Chanfro interior do aderente	7,5°	39422,30	40134,68	45865,92	1,71	-0,17	49,04
	15°	38952,25	40131,61	41169,77	0,49	-0,18	33,78
	30°	39340,78	40135,75	36710,51	1,49	-0,17	19,29
	45°	40666,77	40147,97	32174,15	4,92	-0,14	4,55
	60°	38351,39	40116,47	31735,27	-1,06	-0,22	3,12
	90°	38761,30	40203,68	30774,38	-	-	-

Filete de adesivo	7,5°	64346,70	41520,08	35502,29	66,01	3,27	15,36
	15°	61270,03	40559,97	35103,89	58,07	0,89	14,07
	30°	56081,75	40302,74	34464,95	44,68	0,25	11,99
	45°	45213,91	40227,04	32277,61	16,65	0,06	4,88
	60°	38572,29	40158,19	32503,64	-0,49	-0,11	5,62
	90°	38761,30	40203,68	30774,38	-	-	-

Como mostra a tabela, verificam-se diversos tipos de alterações na resistência das juntas adesivas tubulares conforme o tipo de alteração paramétrica e respetiva variação. No que toca à variação de L_0 , é possível observar que o seu aumento origina um acréscimo de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas adesivas. O Araldite® 2015 é o adesivo que apresenta maior resistência para valores mais elevados de L_0 , graças à plastificação que o tubo interior sofre devido à indução de cargas mais elevadas resultante da ductilidade do adesivo. Para valores de L_0 inferiores, as juntas com o adesivo Araldite® AV138 são as que apresentam maior valor de $P_{m\acute{a}x}$, uma vez que este adesivo se apresenta como sendo bastante rígido. O adesivo SikaForce® 7752 apresenta-se como sendo o adesivo menos resistente neste estudo para qualquer valor de L_0 , apesar de demonstrar um crescimento de $P_{m\acute{a}x}$ elevado.

No que toca à análise de resistência considerando a variação de t_{SI} , verifica-se que o seu aumento tende a ficar sem efeito para valores mais elevados. De facto, para $t_{SI}=3$ mm denota-se uma estabilização de $P_{m\acute{a}x}$ relativamente ao Araldite® AV138 e ao Araldite® 2015. A partir deste valor de t_{SI} verifica-se que ambos os adesivos mencionados apresentam valores de $P_{m\acute{a}x}$ muito próximos. O Araldite® AV138 é um adesivo bastante rígido e apresenta naturalmente uma resistência elevada. O Araldite® 2015 não possui uma resistência elevada mas a ductilidade é uma característica bem presente no mesmo. Como tal, dá-se plastificação do tubo de menor secção e conseqüentemente um aumento de $P_{m\acute{a}x}$. Para o SikaForce® 7752 observa-se um acréscimo de $\Delta P_{m\acute{a}x}$ ao longo de todos os valores de t_{SI} considerados. Este comportamento deve-se ao facto deste adesivo ser o mais dúctil dos três e, como tal, ele possui a capacidade de permitir uma grande deformação plástica do tubo interior e, desta forma, gerar um aumento de $P_{m\acute{a}x}$. De facto, as juntas com SikaForce® 7752 são as que apresentam a maior resistência inicial, contudo, para valores de t_{SI} superiores a 1 mm o seu desempenho piora em relação às dos outros adesivos.

Relativamente à variação do valor de t_{SE} observam-se alterações bastante distintas entre os três adesivos. No caso do Araldite® AV138, verifica-se que este possui a maior resistência entre os três adesivos, para $t_{SE}=1$ mm. Posteriormente dá-se um $\Delta P_{m\acute{a}x} \approx 10\%$ para $t_{SE}=2$ mm e a partir de $t_{SE}=3$ mm o aumento percentual reduz drasticamente, o que originou uma perda substancial da resistência da junta adesiva. Como tal, esta análise demonstrou que a partir deste valor de t_{SE} , o adesivo Araldite® AV138 não consegue transmitir os esforços entre os tubos de forma a compensar o diferencial de rigidez de ambos, resultante da alteração do valor de t_{SE} . Para as juntas com o Araldite® 2015

verifica-se um $\Delta P_{\text{máx}} \approx 68,7\%$ a partir de $t_{\text{SE}}=2$ mm. O aumento do valor deste parâmetro geométrico deixa de influenciar a resistência da junta, uma vez que se verifica uma estabilização da mesma. Com isto, observa-se que este adesivo é o que permite a indução de cargas mais elevadas na respetiva junta adesiva graças à sua ductilidade e, portanto, verifica-se que as suas juntas adesivas são as que possuem a maior resistência mecânica a partir $t_{\text{SE}}=2$ mm. Para o adesivo SikaForce® 7752 denota-se um decréscimo gradual da resistência da junta com o aumento de t_{SE} . Como tal, verifica-se que a resistência reduzida deste adesivo se deve à diferença no tamanho da secção transversal que existe entre o tubo interior e o tubo exterior. Este fator vai gerar um diferencial de rigidez em ambos os aderentes que não vai permitir a distribuição de esforços através da camada adesiva sem que esta sofra rutura prematuramente.

Considerando a variação de t_{SI} e de t_{SE} de forma simultânea, verifica-se uma tendência crescente na resistência das juntas à medida que estes parâmetros aumentam. O aumento da rigidez dos tubos causada pelo respetivo aumento de espessura permite uma maior indução de esforços até à rutura da junta. Para $t_{\text{SI}}-t_{\text{SE}}=1$ mm verifica-se que a junta com maior resistência pertence à que inclui o adesivo Araldite® AV138. A partir de valores para $t_{\text{SI}}-t_{\text{SE}}=2$ mm os valores mais elevados de $P_{\text{máx}}$ registados dizem respeito ao Araldite® 2015. Este sofre um aumento $\Delta P_{\text{máx}}$ elevado ($\approx 89,9\%$) e, como tal, dá-se um aumento da resistência da junta adesiva. A junta adesiva com SikaForce® 7752 apresenta para $t_{\text{SI}}-t_{\text{SE}}=1$ mm o segundo maior valor de resistência entre os três adesivos. Contudo, a partir de $t_{\text{SI}}-t_{\text{SE}}=2$ mm o aumento percentual que se dá não permite que este adesivo passe a ter um melhor desempenho relativamente aos restantes. Como tal, observa-se que o SikaForce® 7752 origina as juntas desta análise numérica com os menores valores de $P_{\text{máx}}$, exceto o correspondente para $t_{\text{SI}}-t_{\text{SE}}=1$ mm. Apesar destas diferenças registadas para os três adesivos, verifica-se que todos apresentam uma tendência para se estabilizarem para valores mais elevados de $t_{\text{SI}}-t_{\text{SE}}$.

Ao considerar a existência de um chanfro exterior nos aderentes e a variação do ângulo do mesmo, é possível observar para as juntas com o Araldite® AV138 que, para $\theta=7,5^\circ$, dá-se um acréscimo de $P_{\text{máx}}$. Como os picos de tensões são mais reduzidos, haverá uma melhor distribuição das mesmas e, como tal, uma maior capacidade de absorção de cargas. Para os restantes ângulos verifica-se uma estabilização da resistência das juntas. Para as juntas com o SikaForce® 7752 verifica-se um comportamento idêntico às do Araldite® AV138, ou seja, apenas para $\theta=7,5^\circ$ se observa um valor de $P_{\text{máx}}$ mais distinto dos restantes. Este comportamento deve-se às mesmas razões descritas para o Araldite® AV138, contudo, o acréscimo de resistência não é tão elevado pois o SikaForce® 7752 apresenta uma tensão de rutura inferior à do adesivo de epóxido. Ao aplicar um chanfro exterior dos aderentes verifica-se uma estabilização da resistência mecânica para as juntas com o Araldite® 2015. O balanço equilibrado entre resistência e ductilidade deste adesivo permite-lhe uma boa adaptabilidade às diferentes variações de ângulo impostas.

Ao aplicar um chanfro interior nos aderentes verifica-se que as juntas com o Araldite® 2015 mostram uma indiferença relativamente a esta alteração geométrica no que toca à evolução da sua resistência mecânica. De facto, o mesmo sucede para as juntas com o Araldite® AV138, contudo, em comparação com o estudo com o chanfro exterior dos aderentes, verifica-se que neste caso de estudo não ocorre o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ para $\theta=7,5^\circ$. Isto deve-se ao facto de que um chanfro interior apresenta um excesso de adesivo nas extremidades da junta que vai permitir amaciar a distribuição de tensões e, como tal, reduzir o valor de $P_{m\acute{a}x}$. No que toca às juntas com o adesivo SikaForce® 7752, verifica-se um aumento da resistência das juntas com a redução do ângulo do chanfro. O aumento do ângulo vai reduzir a quantidade de adesivo nas extremidades da junta e reduzir a taxa de deformação diferencial. Como tal, menor será a capacidade de distribuir as tensões e menor será a resistência que a junta consegue suportar. A partir de $\theta=45^\circ$ verifica-se uma estabilização de $P_{m\acute{a}x}$.

Finalmente, no que concerne às juntas com um filete de adesivo, não se verificam alterações no comportamento das juntas com o Araldite® 2015. Acontece o mesmo para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, apesar de ocorrerem ligeiras oscilações a partir de $\theta=45^\circ$. A partir deste ângulo a quantidade de adesivo no filete não é a suficiente para permitir uma melhor distribuição de tensões, comparativamente aos valores de ângulo inferiores. A resistência das juntas aumenta significativamente para as juntas com o Araldite® AV138. O filete de adesivo melhora progressivamente o desempenho das juntas com este adesivo para ângulos mais reduzidos, uma vez que se trata de um adesivo bastante rígido. Como tal, uma maior quantidade de adesivo permite um maior amaciamento das tensões instaladas e, conseqüentemente, um aumento de $P_{m\acute{a}x}$. A partir de $\theta=60^\circ$ dá-se uma estabilização da resistência das juntas.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Após a validação dos dados numéricos a partir dos experimentais, procedeu-se às análises paramétricas numéricas pretendidas recorrendo ao *software* ABAQUS®. Desta forma, obtiveram-se as distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} para todas as alterações geométricas efetuadas nas juntas adesivas tubulares, assim como as curvas $P-\delta$ que traduzem a evolução da resistência das mesmas.

Desta forma, conclui-se que, para valores de L_0 mais elevados, tanto as tensões σ_y como as tensões τ_{xy} apresentam valores de pico mais elevados. No caso das tensões σ_y , o aumento de L_0 traduz um aumento da rigidez global da junta e, como tal, ocorrem concentrações de tensões mais elevadas para $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$. Para as tensões τ_{xy} , valores inferiores de L_0 limitam a taxa de deformação diferencial, o que permite uma distribuição de tensões τ_{xy} mais uniforme. Verifica-se também que o Araldite® AV138 é o que apresenta maiores picos de σ_y/τ_{avg} e de τ_{xy}/τ_{avg} , uma vez que é o adesivo que apresenta maior valor de E .

A diminuição do valor de t_{SI} gera um aumento das tensões σ_y . Isto acontece porque, à medida que a espessura do tubo interior diminui, maior será a taxa de deformação transversal que o mesmo sofre. No que toca às tensões τ_{xy} , existe também um aumento de σ_y/τ_{avg} à medida que t_{SI} diminui. A redução da secção transversal do tubo interior tem como consequência uma maior deformação diferencial do mesmo quando se aplica um carregamento à junta adesiva. Para ambas as distribuições de tensões, verifica-se que os adesivos com maior rigidez são os que apresentam valores de pico superiores.

Ao aumentar t_{SE} geram-se maiores tensões σ_y . Isto ocorre devido ao diferencial de rigidez entre os dois tubos nesta extremidade da ligação, o que resulta em maiores tensões geradas na camada de adesivo. Desta forma, quanto maior for a diferença de espessura entre tubos, maior é a deformação que o adesivo tem de suportar devido ao facto de um tubo ser muito rígido e o outro apresentar uma deformação transversal elevada. Para além destas diferenças, verifica-se que os adesivos mais rígidos são aqueles que apresentam valores máximos de σ_y/τ_{avg} e de τ_{xy}/τ_{avg} mais elevados

O acréscimo de $t_{SI}-t_{SE}$ traduz-se num aumento da rigidez dos tubos. Ao aumentar a espessura de ambos os tubos, a deformação transversal exercida nos mesmos causada pelo carregamento imposto será mais reduzida devido ao acréscimo de rigidez. Relativamente às tensões τ_{xy} , denota-se uma distribuição mais uniforme para valores de $t_{SI}-t_{SE}$ mais elevados. Para espessuras mais reduzidas, a deformação diferencial é mais elevada e, como tal, geram-se picos de tensões τ_{xy} mais elevados nas zonas próximas de

$x/L_0=0$ e $x/L_0=1$. Mais uma vez, verifica-se que os adesivos de maior rigidez apresentam valores máximos de σ_y/τ_{avg} e τ_{xy}/τ_{avg} mais elevados.

Relativamente à adição de um chanfro externo dos aderentes, as tensões σ_y demonstraram um acréscimo do valor de pico à medida que o ângulo do chanfro aumenta. Verifica-se, contudo, que a partir dos 30° deixa de haver evoluções significativas nas tensões de pico. O aumento de σ_y/τ_{avg} deve-se ao facto de que, com a existência de um chanfro exterior, os aderentes apresentam uma secção mais reduzida nas extremidades da junta capaz de suportar as deformações transversais impostas pelo adesivo. Como tal, o acréscimo é evidente e denota-se sobretudo para os adesivos mais rígidos. Também nas distribuições das tensões τ_{xy} é possível concluir que existe um acréscimo dos valores máximos das tensões de pico. Como foi explicado, o chanfro implica uma redução da secção transversal dos tubos nesse local e, como tal, dá-se uma diminuição da rigidez dos mesmos. Ao gerar-se deformação diferencial causada pelo adesivo, as tensões vão se concentrar mais nessas zonas, o que resulta num aumento dos máximos de τ_{xy}/τ_{avg} . Este comportamento deixa de ocorrer a partir para o intervalo de ângulos de chanfro entre 30° e 90° .

Considerando a existência de um chanfro interior do aderente, verifica-se uma redução das tensões σ_y para ângulos mais reduzidos. Contudo, dá-se a formação de dois picos de tensão para ambas as extremidades das juntas. O pico mais elevado está situado na extremidade da junta adesiva, cuja secção transversal do aderente é mais reduzida e, como tal, a junta torna-se mais suscetível a concentrações de tensões σ_y nesse local. O segundo pico é mais reduzido e surge para valor de x/L_0 que corresponde ao local em que se dá a inclinação θ do chanfro interior do aderente. Para esta configuração de chanfro existe um excesso de adesivo na extremidade das juntas que permite uma atenuação das tensões transmitidas quando se dá a deformação transversal dos tubos. Por este motivo verifica-se um decréscimo dos valores máximos de σ_y/τ_{avg} relativamente ao mesmo provete sem o chanfro. No que toca às tensões τ_{xy} , verifica-se o mesmo tipo de comportamento, na medida em que ângulos de chanfro superiores vão apresentar valores de τ_{xy}/τ_{avg} mais elevados. É possível registar o aparecimento de um pico para o valor de x/L_0 que corresponde à zona onde se inicia a variação geométrica que origina o chanfro. Além disso, a deformação diferencial dos aderentes nessa zona é bastante acentuada, contribuindo para a elevada concentração de tensões τ_{xy} . A existência de um excesso de adesivo nas extremidades das juntas origina uma redução dos valores de pico para o para os três adesivos. O diferencial de rigidez entre o adesivo e o tubo de alumínio permite uma distribuição mais uniforme das tensões τ_{xy} pela camada adesiva. Para além disto, observa-se uma variação na distribuição das curvas de tensões σ_y e τ_{xy} coerente, na medida em que os adesivos com maior valor de E apresentam maiores valores de pico.

Finalmente, a inclusão de um filete de adesivo nas extremidades de L_0 originou a formação de dois picos de tensão para cada extremidade da junta: um em cada próximo

de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ e os outros na extremidade dos filetes de adesivo, cujo valor de x/L_0 se encontra fora do comprimento normalizado, uma vez que os filetes de adesivo são acrescentados nas extremidades de L_0 . A existência de um filete de adesivo permite a redução σ_y quando se implementam ângulos mais reduzidos, uma vez que no momento em que se dá a deformação transversal dos tubos, o filete de adesivo permite um amaciamento do arrancamento originado, uma vez que o adesivo apresenta um valor de E muito inferior ao do alumínio. Relativamente às tensões τ_{xy} , o filete de adesivo permite reduzir a intensidade da deformação diferencial nas extremidades das juntas devido à discrepância de rigidez entre ele e o tubo. Como tal verifica-se um decréscimo das tensões τ_{xy} quando se consideram ângulos de filete de adesivo mais reduzidos.

Relativamente à análise numérica por MDC envolvendo a variação de L_0 entre 10 mm e 50 mm, é possível aferir um acréscimo considerável de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 , para todos os adesivos. Contudo, este comportamento evidencia-se nas juntas com o Araldite® 2015 enquanto as juntas adesivas com menor resistência pertencem ao SikaForce® 7752.

À semelhança do que ocorre com o aumento de L_0 , após estudar o efeito da variação crescente de t_{SI} e $t_{SI}-t_{SE}$, é possível observar valores de resistência superiores para o Araldite® 2015 e inferiores para o SikaForce® 7752. Em ambos estes estudos, para a primeira condição paramétrica imposta ($t_{SI}=1$ mm e $t_{SI}-t_{SE}=1$ mm), o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta o valor de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevado. Contudo, a partir da condição seguinte ($t_{SI}=2$ mm e $t_{SI}-t_{SE}=2$ mm), o Araldite® 2015 consegue obter um melhor desempenho uma vez que se dá a plastificação do tubo interior, e consequentemente, um aumento de $P_{m\acute{a}x}$.

O aumento do valor de t_{SE} provoca um aumento considerável de $P_{m\acute{a}x}$ para o Araldite® 2015 mas que se estabiliza rapidamente a partir de $t_{SE}=2$ mm reduzidos. Relativamente ao Araldite® AV135 não se observam melhorias na resistência das juntas exceto para $t_{SE}=2$ mm. Para valores de t_{SE} superiores a esse $\Delta P_{m\acute{a}x}$ torna-se desprezável. No que toca à resistência do SikaForce® 7752 conclui-se que o aumento de t_{SE} prejudica o seu desempenho, uma vez que ocorre uma redução gradual de $P_{m\acute{a}x}$.

Relativamente à variação simultânea de t_{SI} e de t_{SE} , no geral verifica-se um aumento na resistência das juntas com o aumento do valor desses parâmetros e uma tendência para se estabilizarem para valores mais elevados de $t_{SI}-t_{SE}$. Para $t_{SI}-t_{SE}=1$ mm pode-se observar que a junta adesiva tubular com maior valor de $P_{m\acute{a}x}$ é a do Araldite® AV138. A partir de $t_{SI}-t_{SE}=2$ mm os valores mais elevados de $P_{m\acute{a}x}$ registados dizem respeito ao Araldite® 2015. Este sofre um aumento $\Delta P_{m\acute{a}x}$ elevado ($\approx 89,9\%$) e, como tal, dá-se um aumento da resistência da junta adesiva. A junta adesiva com SikaForce® 7752 é a segunda mais resistente para $t_{SI}-t_{SE}=1$ mm entre os três adesivos. Contudo, a partir de $t_{SI}-t_{SE}=2$ mm o aumento percentual que se dá não permite que este adesivo passe a ter um melhor desempenho relativamente aos restantes.

No que concerne à aplicação de um chanfro exterior dos aderentes, foram registadas as alterações mais significativas para as juntas com o Araldite® AV138 e para o SikaForce® 7752. Para um ângulo de 7,5° obtiveram-se os valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevados para estes adesivos. As restantes variações dimensionais deste parâmetro não apontam qualquer alteração significativa na medida em que se verifica uma estabilização da resistência mecânica das juntas em questão. Este acréscimo registado para o ângulo de chanfro mais reduzido deve-se à maior taxa de deformação plástica que ocorre nos aderentes resultante da diminuição da secção transversal dos mesmos nessas zonas. Consequentemente, dá-se um acréscimo de $P_{m\acute{a}x}$. As juntas com o Araldite® 2015 não mostraram qualquer evidência de alteração comportamental com a variação do ângulo de chanfro devido à capacidade que este adesivo possui em se adaptar aos vários casos de estudo considerados.

Para as juntas adesivas tubulares com chanfro interior dos aderentes verifica-se, mais uma vez, uma indiferença comportamental relativamente ao Araldite® 2015. O equilíbrio entre resistência mecânica e ductilidade do mesmo permitem a sua adaptabilidade a diversos ângulos de chanfro impostos. Este comportamento ocorre igualmente para o Araldite® AV138. Apesar disso, em comparação com as juntas com chanfro exterior, observa-se que, para um ângulo de 7,5°, não se dá o aumento percentual elevado registado nesse caso. O chanfro interior dos aderentes implica a existência de um excesso de adesivo nas extremidades da junta, que neste caso é o principal fator que contribui para uma atenuação das tensões geradas nessas zonas e, como tal, provoca uma descida de $P_{m\acute{a}x}$. Relativamente às juntas com o SikaForce® 7752, observa-se que ângulos de chanfro mais reduzidos resultam num aumento de $P_{m\acute{a}x}$. De facto, este adesivo é o que apresenta melhor desempenho para os ângulos de 7,5° e 15°. O excesso de adesivo nas extremidades da junta induz cargas mais elevadas no alumínio. Como se trata de um adesivo extremamente dúctil, dá-se uma plastificação acentuada nos aderentes e, portanto, um aumento de $P_{m\acute{a}x}$. Contudo, a partir dos 15° dá-se uma redução do valor de $P_{m\acute{a}x}$ até aos 45° e que tende a estabilizar a partir desse valor.

Finalmente, no que concerne à aplicação de um filete de adesivo, verifica-se um acréscimo da resistência das juntas adesivas com o Araldite® AV138. Como se trata de um adesivo rígido, o excesso de adesivo nas extremidades da junta permite a plastificação dos aderentes. Com o aumento do ângulo do filete, a partir dos 15° verifica-se uma diminuição de $P_{m\acute{a}x}$ e que estabiliza a partir dos 60°. Dá-se um comportamento semelhante nas juntas com o SikaForce® 7752. Neste caso, a resistência mecânica mantém-se estável no intervalo de ângulos entre 7,5° e 30°. Contudo, a partir dos 45° dá-se uma ligeira redução de $P_{m\acute{a}x}$ uma vez que a quantidade de adesivo nas extremidades da junta deixa de ser suficiente para permitir uma distribuição mais suave das tensões. Desta forma, dá-se uma redução deterioração do comportamento da junta adesiva.

Como sugestões para trabalhos futuros, apresentam-se as seguintes:

- Efetuar análises numéricas considerando a variação do diâmetro dos tubos;
- Efetuar o estudo paramétrico nos adesivos mais dúcteis adotando leis coesivas mais adequadas;
- Validar os resultados numéricos das alterações geométricas com ensaios experimentais.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Da Silva, L.F.M. and A. Öchsner, *Modeling of adhesively bonded joints*. 2008: Springer.
2. Labbé, S. and J.-M. Drouet, *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012. **33**: p. 26-35.
3. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
4. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000, Nova Iorque: McGraw-Hill.
5. Pinto, S.D.M., *Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis*. 2013, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
6. Dillard, D.A. and A.V. Pocius, *Adhesion Science and Engineering Volume 1: The Mechanics of Adhesion*. 2002, Nova Iorque: ELSEVIER.
7. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
8. Correia, J.A.F.O., A.M.P. Jesus, and A.L.L. Silva, *Simulação por elementos finitos de curvas S-N de ligações rebitadas*. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, 2011. **Vol 19**.
9. Weisman, C., *Welding handbook*. 1976: American Welding Society.
10. Santos, J.F.d.O., *Processos de Soldadura*. 1993.
11. Robert W. Messler, J., *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. 1999: Wiley - VCH.
12. Silva, L.F.M.d., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011, Berlim: Springer.
13. Esteves, J.L.S., *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*, in *Departamento de engenharia mecânica*. 1990, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Universidade do Porto.
14. Silva, L.F.M.d., A.G.d. Magalhães, and M.F.S.F.d. Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindustria.
15. Ebnesajjad, S., *Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing*. 2011: ELSEVIER.
16. Louro, A., et al., *Adesivos em engenhos mecânicos: Adesivos estruturais na construção de aviões*. 2011, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.

17. Mays, G.C. and A.R. Hutchinson, *Adhesives in Civil Engineering*. 1992, Ne York: Cambridge University Press.
18. Brandão, A., et al., *Adesivos em automóveis: Que adesivos se utilizam em automóveis e qual a sua função?* 2010, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Porto.
19. Santos, A.F., *Avaliação do comportamento mecânico de um adesivo estrutural epóxi utilizado na indústria automobilística*. 2005, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo.
20. Sika, *Automotive Realizing Visions*, Sika, Editor. 2010.
21. COGNARD, P., *Building & Construction Adhesives-Part I*. General Information and Rules. Adhesives & Sealants, 2003.
22. MURAD, D., *Global adhesives and sealants state of the union*. The ChemQuest Group, april, 2007.
23. Loureiro, A.M.V., S. Borschiver, and P.L.d.A. Coutinho, *Tendências Tecnológicas de Adesivos e Selantes Aplicados na Construção Civil*. Journal of Technology Management & Innovation, 2009. **Vol. 4**.
24. Kinloch, A.J., *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. 1987: Springer Science & Business Media.
25. Scott, N., *Linha de Adesivos Estruturais Crystic Crestomer® e Guia de Aplicação*, N.S.E.Q. Ltd, Editor. 2016.
26. Adams, R.D., *Adhesive bonding: Science, technology and applications*. 2005, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
27. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
28. Teixeira, L.M.B.S., *Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais*. 2000, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
29. Souza, G.F.d. and B.S.d. Silva, *Efeito do adesivo e do comprimento de sobreposição em juntas coladas*. 2015, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca: Rio de Janeiro.
30. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
31. Sousa, F.S.M.d., *Caracterização de adesivos de altas temperaturas para aplicações aeroespaciais* 2010, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
32. Vallée, T., J.R. Correia, and T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles—Part II: Strength prediction*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(13): p. 1915-1930.
33. Vallée, T., J.R. Correia, and T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(13): p. 1903-1914.

34. Gonçalves, J.P.M., *Contribuições para a análise numérica e experimental do comportamento de juntas de sobreposição simples*. 2012.
35. Goncalves, J., M. De Moura, and P. De Castro, *A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(5): p. 357-365.
36. Santos, D.J.d., *Estudo Experimental da Resistência Mecânica de Junções Adesivas*. 2007, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo.
37. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
38. Adams, R. and N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of strain analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
39. Harris, J. and R. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
40. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
41. Vaningen, J. and A. Vlot, *Stress analysis of adhesively bonded single lap joints: Survey and evaluation of analyses*. NASA STI/Recon Technical Report N, 1993. **94**: p. 34643.
42. da Silva, L.F., R.F. Lima, and R. Teixeira, *Development of a computer program for the design of adhesive joints*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(12): p. 889-918.
43. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**(1/2): p. 41-47.
44. Goland, M. and E. Reissner, *The Stress in Cemented Joint*. Trans. ASME, 1944. **66**: p. A17.
45. Panigrahi, S. and B. Pradhan, *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. Journal of Reinforced plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
46. Hart-Smith, L., *Stress analysis- A continuum mechanics approach(in adhesive bonded joints)*. Developments in adhesives- 2.(A 82-28576 13-39) London, Applied Science Publishers, 1981, 1981: p. 1-44.
47. Penado, F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1998. **11**(3): p. 272-287.
48. Williams Jr, J.H., *Stresses in adhesive between dissimilar adherends*. The Journal of Adhesion, 1975. **7**(2): p. 97-107.
49. Ojalvo, I. and H. Eidinoff, *Bond thickness effects upon stresses in single-lap adhesive joints*. AIAA Journal, 1978. **16**(3): p. 204-211.
50. Bigwood, D. and A. Crocombe, *Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints*. International journal of Adhesion and Adhesives, 1989. **9**(4): p. 229-242.

51. Adams, R. and V. Mallick, *A method for the stress analysis of lap joints*. The Journal of Adhesion, 1992. **38**(3-4): p. 199-217.
52. Almeida, F.J.S., *Estudo e otimização de juntas do tipo Tpeel soldadas, adesivas e híbridas*. 2015.
53. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints*. 1973: Citeseer.
54. Delale, F., F. Erdogan, and M. Aydinoglu, *Stresses in adhesively bonded joints: a closed-form solution*. Journal of Composite Materials, 1981. **15**(3): p. 249-271.
55. Yuceoglu, U. and D.P. Updike, *Stress analysis of bonded plates and joints*. 1980.
56. Allman, D., *A theory for elastic stresses in adhesive bonded lap joints*. The Quarterly journal of mechanics and applied mathematics, 1977. **30**(4): p. 415-436.
57. Renton, W.J. and J.R. Vinson, *The efficient design of adhesive bonded joints*. The Journal of Adhesion, 1975. **7**(3): p. 175-193.
58. Chen, D. and S. Cheng, *An analysis of adhesive-bonded single-lap joints*. ASME, Transactions, Journal of Applied Mechanics, 1983. **50**: p. 109-115.
59. Szépe, F., *Strength of adhesive-bonded lap joints with respect to change of temperature and fatigue*. Experimental Mechanics, 1966. **6**(5): p. 280-286.
60. Pirvics, J., *Two dimensional displacement-stress distributions in adhesive bonded composite structures*. The Journal of Adhesion, 1974. **6**(3): p. 207-228.
61. Thamm, F., *Stress distribution in lap joints with partially thinned adherends*. The Journal of Adhesion, 1976. **7**(4): p. 301-309.
62. CHAN, W. and C. SUN. *Interfacial stresses and strength of lap joints*. in *21st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 1980.
63. Wu, Z., A. Romeijn, and J. Wardenier, *Stress expressions of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends*. Composite Structures, 1997. **38**(1-4): p. 273-280.
64. Courant, R., *Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations*. Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics, 1994: p. 1-1.
65. Da Silva, L.F. and R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012: Springer.
66. Carver, D. and G. Wooley, *Stress concentration factors for bonded lap joints*. Journal of Aircraft, 1971. **8**(10): p. 817-820.
67. Adams, R. *The mechanics of bonded joints*. in *Int. Conf. on Struct. Adh. in Eng., Bristol, Conf. Publ. C180-86*. 1986.
68. Adams, R. and R. Davies, *Strength of lap shear joints*. The mechanics of adhesion, 2002: p. 111-144.
69. Crocombe, A., Adams, and RD, *Influence of the spew fillet and other parameters on the stress distribution in the single lap joint*. The Journal of Adhesion, 1981. **13**(2): p. 141-155.
70. Dorn, L. and W. Liu, *The stress state and failure properties of adhesive-bonded plastic/metal joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1993. **13**(1): p. 21-31.

71. Tsai, M., J. Morton, and F. Matthews, *Experimental and numerical studies of a laminated composite single-lap adhesive joint*. Journal of Composite Materials, 1995. **29**(9): p. 1254-1275.
72. Magalhães, A., M. De Moura, and J. Gonçalves, *Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials*. International journal of adhesion and adhesives, 2005. **25**(4): p. 313-319.
73. Al-Samhan, A. and S. Darwish, *Finite element modeling of weld-bonded joints*. Journal of materials processing technology, 2003. **142**(3): p. 587-598.
74. Adams, R. and N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive bonded tubular lap joints*. The Journal of Adhesion, 1977. **9**(1): p. 1-18.
75. Adams, R.D. and R. Davies, *Strength of joints involving composites*. The Journal of Adhesion, 1996. **59**(1-4): p. 171-182.
76. He, X., *A review of finite element analysis of adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(4): p. 248-264.
77. Rodríguez, R.Q., et al., *Failure criteria for adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 26-36.
78. Zhao, X., *Stress and failure analysis of adhesively bonded joints*. 1991, University of Bristol.
79. Charalambides, M., A. Kinloch, and F. Matthews. *Strength prediction of bonded joints, AGARD Conference. in 83rd Meeting*. 1997.
80. Whitney, J.M. and R. Nuismer, *Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations*. Journal of composite materials, 1974. **8**(3): p. 253-265.
81. Nuismer, R. and J.M. Whitney, *Uniaxial failure of composite laminates containing stress concentrations*, in *Fracture mechanics of composites*. 1975, ASTM International.
82. Zhao, X., R. Adams, and L. Da Silva, *Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(8): p. 837-856.
83. Williams, M., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the seismological society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
84. Hutchinson, J., *Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(1): p. 13-31.
85. Rice, J. and G.F. Rosengren, *Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(1): p. 1-12.
86. Griffith, A.A., *The phenomena of rupture and flow in solids*. Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 1921. **221**: p. 163-198.
87. Fernlund, G. and J. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 1: Analytical method*. International journal of adhesion and adhesives, 1991. **11**(4): p. 213-220.

88. Fernlund, G. and J. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 2: Experimental study*. International journal of adhesion and adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
89. Zeng, Y., *Feasibility study of cohesive zone model on crack propagation in pipeline steel under monotonic and fatigue loading*. 2015: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Netherlands.
90. Dillard, D.A., et al., *Observations of decreased fracture toughness for mixed mode fracture testing of adhesively bonded joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1515-1530.
91. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
92. Barenblatt, G.I., *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*. Advances in applied mechanics, 1962. **7**: p. 55-129.
93. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
94. Hillerborg, A., M. Modéer, and P.-E. Petersson, *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*. Cement and concrete research, 1976. **6**(6): p. 773-781.
95. Jousset, P. and M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2014. **132**: p. 48-69.
96. Roth, S., G. Hütter, and M. Kuna, *Simulation of fatigue crack growth with a cyclic cohesive zone model*. International Journal of Fracture, 2014. **188**(1): p. 23-45.
97. Wang, J.T., *Relating Cohesive Zone Model to Linear Elastic Fracture Mechanics*. 2010.
98. Jin, Z.-H. and C. Sun, *A comparison of cohesive zone modeling and classical fracture mechanics based on near tip stress field*. International journal of solids and structures, 2006. **43**(5): p. 1047-1060.
99. Kregting, R., *Cohesive zone models: towards a robust implementation of irreversible behavior*. Philips Applied Technologies, 2005.
100. Campilho, R.D., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
101. Cornec, A., I. Scheider, and K.-H. Schwalbe, *On the practical application of the cohesive model*. Engineering fracture mechanics, 2003. **70**(14): p. 1963-1987.
102. Wang, Y., J. Chen, and H. Li, *Improved cohesive zone model and its application in interface contact analysis*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2008. **21**(4): p. 295-302.
103. Fernandes, T.A., et al., *Adhesive selection for single lap bonded joints: Experimentation and advanced techniques for strength prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
104. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.

105. Daudeville, L. and P. Ladeveze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
106. Voyiadjis, G.Z. and P.I. Kattan, *Damage mechanics*. 2005: CRC Press.
107. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
108. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008: John Wiley & Sons.
109. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
110. Dolbow, J. and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
111. Monteiro, D.F., *Análise do comportamento a fractura de juntas de aço efectuadas com adesivos estruturais*. 2012.
112. Carbas, R.J.C., *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi*. 2012.
113. Mota, A.I.M., *Juntas de sobreposição simples com camada adesiva compósita*. 2013, Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
114. Pereira, A., et al., *Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints*. Journal of Materials Processing Technology, 2010. **210**(4): p. 610-617.
115. Adams, R. and J. Harris, *The influence of local geometry on the strength of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987. **7**(2): p. 69-80.
116. Lang, T. and P. Mallick, *Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints*. International Journal of Adhesion and adhesives, 1998. **18**(3): p. 167-177.
117. Belingardi, G., L. Goglio, and A. Tarditi, *Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(4): p. 273-282.
118. Groth, H. and P. Nordlund, *Shape optimization of bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 1991. **11**(4): p. 204-212.
119. Cherry, B. and N. Harrison, *Note: The Optimum Profile for a Lap Joint*. The Journal of Adhesion, 1970. **2**(2): p. 125-128.
120. Adams, R. and N. Peppiatt, *Effect of Poisson's ratio strains in adherends on stresses of an idealized lap joint*. The journal of strain analysis for engineering design, 1973. **8**(2): p. 134-139.
121. Gleich, D., M. Van Tooren, and A. Beukers, *Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures*. Journal of adhesion science and technology, 2001. **15**(9): p. 1091-1101.
122. da Silva, L.F., et al., *Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength*. The journal of adhesion, 2006. **82**(11): p. 1091-1115.

123. Kishore, A.N. and N.S. Prasad, *An experimental study of Flat-Joggle-Flat bonded joints in composite laminates*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **35**: p. 55-58.
124. Avila, A.F. and P.n.d.O. Bueno, *Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites*. International journal of adhesion and adhesives, 2004. **24**(5): p. 407-414.
125. Zeng, Q.-G. and C. Sun, *Novel design of a bonded lap joint*. AIAA journal, 2001. **39**(10): p. 1991-1996.
126. Taib, A.A., et al., *Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006. **26**(4): p. 226-236.
127. Taib, A.A., et al., *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International journal of adhesion and adhesives, 2006. **26**(4): p. 237-248.
128. Yan, Z.-M., et al., *A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum single lap joint*. International journal of adhesion and adhesives, 2007. **27**(8): p. 687-695.
129. Hosseinzadeh, R., K. Shahin, and F. Taheri, *A simple approach for characterizing the performance of metallic tubular adhesively-bonded joints under torsion loading*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(16): p. 1613-1631.
130. Das, R. and B. Pradhan, *Adhesion failure analyses of bonded tubular single lap joints in laminated fibre reinforced plastic composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(6): p. 425-438.
131. Qiu, C., et al., *Joint capacity of bonded sleeve connections for tubular fibre reinforced polymer members*. Composite Structures, 2017. **163**: p. 267-279.
132. Mendelson, A., *Plasticity : theory and application*. 1983, Malabar, Fla.: R.E. Krieger.
133. Hosseinzadeh, R., N. Cheraghi, and F. Taheri, *An engineering approach for design and analysis of metallic pipe joints under torsion by the finite element method*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2006. **41**(6): p. 443-452.
134. Esmaeel, R.A. and F. Taheri, *Influence of adherend's delamination on the response of single lap and socket tubular adhesively bonded joints subjected to torsion*. Composite Structures, 2011. **93**(7): p. 1765-1774.
135. Xu, W. and G. Li, *Finite difference three-dimensional solution of stresses in adhesively bonded composite tubular joint subjected to torsion*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(4): p. 191-199.
136. Hipol, P.J., *Analysis and optimization of a tubular lap joint subjected to torsion*. Journal of composite materials, 1984. **18**(4): p. 298-311.
137. Knox, E., M. Cowling, and S. Hashim, *Fatigue performance of adhesively bonded connections in GRE pipes*. International journal of fatigue, 2000. **22**(6): p. 513-519.
138. Reedy, E. and T.R. Guess, *Composite-to-metal tubular lap joints: strength and fatigue resistance*. International Journal of Fracture, 1993. **63**(4): p. 351-367.

139. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
140. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013.
141. Campilho, R.D., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
142. Neto, J., R.D. Campilho, and L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
143. Pinto, A.M.G., et al., *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
144. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International journal for numerical methods in engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
145. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
146. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
147. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
148. Kafkalidis, M. and M. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
149. Liljedahl, C., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International journal of fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
150. Chen, X., *Numerical Study of Stable Tearing Crack Growth Events Using the Cohesive Zone Model Approach*. 2013.
151. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
152. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
153. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction, 2nd Edition*. 2002, Munique: Hanser.
154. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.

155. Leffler, K., K.S. Alfredsson, and U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
156. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
157. Campilho, R., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
158. De Moura, M., et al., *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 419-426.
159. Marques, E. and L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.
160. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014.
161. Radice, J. and J. Vinson, *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. Composites science and technology, 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
162. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, and J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
163. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2012.
164. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009, Universidade do Porto (Portugal).
165. Reis, P., F. Antunes, and J. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. Composite structures, 2005. **67**(1): p. 125-133.
166. Luo, Q. and L. Tong, *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(7): p. 2349-2370.
167. Vable, M. and J.R. Maddi, *Boundary element analysis of adhesively bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 2006. **26**(3): p. 133-144.
168. Grant, L., R. Adams, and L.F. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International journal of adhesion and adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.
169. Davis, M. and D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International journal of adhesion and adhesives, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
170. Campilho, R., et al., *Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008. **22**(13): p. 1565-1591.
171. Shishesaz, M. and N. Bavi, *Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013. **27**(11): p. 1197-1225.

-
172. Owens, J.F.P., *Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded composite-to-metal shear joints*. 1999.
 173. Yang, Q. and B. Cox, *Cohesive models for damage evolution in laminated composites*. *International Journal of Fracture*, 2005. **133**(2): p. 107-137.