



Previsão da resistência de juntas compósitas curvas com ressalto sujeitas a pressão interior

PEDRO AGOSTINHO DA ROCHA FERREIRA

novembro de 2021

PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS COMPÓSITAS CURVAS COM RESSALTO SUJEITAS A PRESSÃO INTERIOR

Pedro Agostinho da Rocha Ferreira

1160801

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de engenharia Mecânica



PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS COMPÓSITAS CURVAS COM RESSALTO SUJEITAS A PRESSÃO INTERIOR

Pedro Agostinho da Rocha Ferreira

1160801

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

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Rui Filipe Neves Araújo Rego

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce

Investigador, INEGI

Arguente

Professor Marco Paulo Lages Parente

Professor Auxiliar, FEUP

PALAVRAS-CHAVE

Juntas adesivas; Juntas curvadas; Juntas com ressalto; Material compósito reforçado a fibras de carbono; Método de elementos finitos; Modelos de dano coesivo.

RESUMO

Atualmente, a ligação adesiva tem um papel cada vez maior na indústria, resultado das vantagens que este tipo de ligação apresenta quando comparado com ligações mais tradicionais. Entre estas vantagens destacam-se a redução de peso e facilidade de aplicação do adesivo, o que permite a redução de tempo de fabrico e custo, bem como a capacidade de unir diferentes materiais sem danificar a estrutura a ligar. O mercado de adesivos apresenta diversas soluções, desde adesivos mais resistentes e frágeis, como o Araldite® AV138, ou adesivos menos resistentes, mas dúcteis, como o Araldite® 2015. Tem ainda surgido uma nova família de adesivos de poliuretano, que é capaz de conciliar elevada resistência e ductilidade, como o Sikaforce® 7752.

A presente dissertação compara o desempenho dos adesivos acima mencionados em juntas de ressalto curvas com substratos em compósito de matriz epóxida reforçada com fibras de carbono e sujeitas a pressão interior, considerando a variação dos seguintes parâmetros geométricos: comprimento de sobreposição (L_o), curvatura dos aderentes (R) e espessura dos aderentes (t_p). A análise da previsão da resistência das juntas foi feita através do Método de Elementos Finitos (MEF) e Modelos de Dano Coesivo (MDC). Este estudo recaiu sobre as tensões de corte (τ_{xy}) e tensões de arrancamento (σ_y) na camada de adesivo, o dano correspondente, a resistência da junta e a energia dissipada (U).

O método numérico foi validado com resultados positivos, através da comparação de dados numéricos e experimentais de juntas de sobreposição simples. Através da análise do método numérico verificou-se que o parâmetro t_p produziu um maior efeito no desempenho das juntas adesivas, principalmente na resistência da ligação. Um aumento de t_p resultou na diminuição acentuada da resistência. Verificou-se também que o aumento de L_o resulta no aumento das variáveis em estudo. No entanto, este aumento apresenta um comportamento logarítmico, logo quanto mais o L_o é aumentado, menor efeito tem no aumento do desempenho da junta. Relativamente aos adesivos, de modo geral o Araldite® 2015 apresentou melhor desempenho, seguido do Sikaforce® 7752. De facto, o adesivo Sikaforce® 7752 apresentou uma resistência mais elevada para t_p maiores. O adesivo Araldite® AV138 um desempenho relativamente mais baixo, já que apresentou resultados praticamente constantes independentemente da variação dos parâmetros.

KEYWORDS

Adhesive Joints; Curved joints; Joggle lap joints; Composite material reinforced with carbon fibers; Finite Element Method; Cohesive Zone Models.

ABSTRACT

Nowadays, the adhesive bonding method plays an increasingly predominant role across all industry. This comes from the advantages that this bonding method presents when compared to more traditional ones, such as mechanical fastening or welding. Among the advantages provided by the use of adhesives are the reduction in weight and the ease of application of the adhesive, which allows a reduction in manufacturing time and cost. The versatility of the adhesive also stands out since it allows joining different materials without damaging the structure to be bonded. The adhesives' market presents several solutions, from stronger and brittle adhesives, such as the Araldite® AV138, to less strong but ductile adhesives, such as the Araldite® 2015. A new family of polyurethane adhesives has also emerged, which is able to bring together high strength and ductility, as it is the case of the Sikaforce® 7752.

The present dissertation compares the performance of the three aforementioned adhesives in curved joggle lap joints with carbon fiber reinforced epoxy matrix composite adherends and subjected to internal pressure, considering the variation of the following geometric parameters: overlap length (L_o), adherends' radius of curvature (R) and adherend thickness (t_p). The analysis of the joint strength prediction was done using the Finite Element Method (FEM) and Cohesive Zone Models (CZM). This study focused on the shear (τ_{xy}) and peel stresses (σ_y) in the adhesive layer, the corresponding damage, the joint strength, and the energy dissipated (U).

The numerical method was validated with positive results by comparing numerical and experimental data from single lap joints. Through the numerical analysis, it was found that the parameter t_p produced a higher effect on the performance of the adhesive joints, mainly on the bond strength. An increase in t_p resulted in a heavy decrease in joint strength. It was also found that an increase in L_o results in an increase in all the variables under study. However, this increase exhibits a logarithmic behavior, which indicates that the more L_o is increased, the less effect it has on increasing joint performance. Regarding the adhesives, in general, the Araldite® 2015 presented the best performance, followed by the Sikaforce® 7752. In fact, the Sikaforce® 7752 adhesive even showed higher strength for larger t_p . The adhesive Araldite® AV138 showed a relatively lower performance, since it presented quite constant results regardless of the parameter variation.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EDP	<i>Exponent Drucker-Prager</i>
EFG	<i>Element-Fre Galerkin</i>
ELS	<i>End-Load Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
HRR	<i>Hutchinson Rice Resengreen</i>
JSD	Junta de Sobreposição Dupla
JSS	Junta de Sobreposição Simples
MAXE	<i>Maximum nominal strain criterion</i>
MAXP	<i>Maximum principal strain criterion</i>
MAXPS	<i>Maximum principal stress criterion</i>
MAXS	<i>Maximum nominal stress criterion</i>
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
NNRPIM	<i>Natural Neighbour Radial Point Interpolation Method</i>
PAM	<i>Point Assembly Method</i>
PIM	<i>Point Interpolation Method</i>
PRFC	Plástico reforçado com fibra de carbono
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro
QUADE	<i>Quadratic nominal strain criterion</i>
QUADS	<i>Quadratic nominal stress criterion</i>
RKP	<i>Reproducing Kernel Particle</i>
RPIM	<i>Radial Point Interpolation Method</i>
SDEG	<i>Stiffness Degradation</i>
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>

Lista de Unidades

%	Porcentagem
°	Grau
°C	Grau Celcius
°C/min	Grau Celcius por minuto
bar	Bar
g	Gramma
GPa	Giga-Pascal
h	Hora
kJ	Quilo-Joule
kN	Quilo-Newton
min	Minuto
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
MPa	Mega-Pascal
N	Newton
N/mm	Newton por milímetro

Lista de Símbolos

E	Módulo de Young
E_1	Módulo de elasticidade na direção longitudinal
E_2	Módulo de elasticidade na direção transversal
E_3	Módulo de elasticidade transversal
G	Módulo de elasticidade transversal
G_{12}	Módulo de elasticidade transversal no plano 12
G_{13}	Módulo de elasticidade transversal no plano 13
G_{23}	Módulo de elasticidade transversal no plano 23
G_c	Resistência à fratura
G_I	Taxa de libertação de energia pelo modo 1 de fratura
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{II}	Taxa de libertação de energia pelo modo 2 de fratura
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
K	Rigidez coesiva
K_{COH}	Matriz que relaciona tensões e deformações
k_{nn}	Parâmetro de rigidez
k_{ns}	Parâmetro de rigidez
k_{ss}	Parâmetro de rigidez

L_o	Comprimento de sobreposição
L_t	Comprimento total da junta
P	Força aplicada/ Carga aplicada
P_{max}	Força máxima/ Carga máxima
R	Curvatura dos aderentes
t_a	Espessura do adesivo
T_{max}	Tração coesiva máxima
t_n	Tensão coesiva à tração
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_p	Espessura dos aderentes
t_s	Tensão coesiva ao corte
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
U	Energia dissipada
x/L_o	Comprimento de sobreposição normalizado
δ	Deslocamento
δ_n	Deslocamento de tração
δ_s	Deslocamento de corte
ϵ	Deformação
ϵ_f	Deformação de rotura à tração
ϵ_n	Deformação à tração
ϵ_s	Deformação ao corte
ν	Coefficiente de Poisson
ν_{12}	Coefficiente de Poisson no plano 12
ν_{13}	Coefficiente de Poisson no plano 13
ν_{23}	Coefficiente de Poisson no plano 23
σ	Tensão
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y	Tensão de cedência à tração
σ_y/τ_{avg}	Tensão de arrancamento normalizada pela tensão de corte média
τ_{avg}	Tensão de corte média
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_{xy}/τ_{avg}	Tensão de corte normalizada pela tensão de corte média
τ_y	Tensão de cedência ao corte
γ_f	Deformação de rotura ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de tensões em ligações mecânicas (a) e adesivas (b) [3].	10
Figura 2 - Diferentes locais de aplicação de adesivos num veículo [7].	12
Figura 3 - Elementos estruturais que contêm ligações adesivas no Airbus A380 [11].	13
Figura 4 - Esforços de tração em juntas adesivas (adaptado de [14]).	13
Figura 5 - Esforços de compressão em juntas adesivas (adaptado de [15]).	14
Figura 6 - Distribuição de tensões em esforços de corte em juntas adesivas [1].	14
Figura 7 - Esforços de clivagem (a) e arrancamento (b) em juntas adesivas (adaptado de [14]).	14
Figura 8 - Modos de rotura em juntas adesivas: rotura adesiva (a), rotura coesiva (b), rotura mista (c) e rotura pelo aderente (d) (adaptado de [18]).	15
Figura 9 - Diferentes tipos de juntas adesivas: sobreposição simples (a), sobreposição dupla (b), sobreposição com chanfro (c), tubular (d), degrau (e), tira simples (f) e tira dupla (g) (adaptado de [20]).	16
Figura 10 - Efeito dos esforços de flexão na JSS e tensões ao longo da camada adesiva (adaptado de [21]).	16
Figura 11 - Possíveis reconfigurações de juntas topo a topo [22].	17
Figura 12 - Exemplo de juntas tubulares: ligações em varões (a) e ligações em tubos (b) (adaptado de [13]).	17
Figura 13 - Modos de propagação de uma fenda (adaptado [38]).	20
Figura 14 - Efeito das dimensões dos elementos coesivos na previsão de resistência em adesivos dúcteis e frágeis sob esforços de tração [42].	21
Figura 15 - Elementos coesivos aplicados através da aproximação local (a) e aproximação contínua (b) numa ligação adesiva [41].	22
Figura 16 - Leis coesivas triangulares (a) e trapezoidais (b) em modo puro e modo misto (adaptado de [33]).	22
Figura 17 - Geometria dos ensaios DCB (a) e ENF (b) [54].	23
Figura 18 - Distribuição de nós através de um método de previsão com malha (a) e um método sem malha (b) num modelo em duas dimensões (adaptado de [67]).	26
Figura 19 - Efeito de L_0 na resistência de uma junta adesiva (adaptado de [86]).	30

Figura 20 - Força de rotura de uma ligação adesiva em função de L_0 , para adesivos dúcteis e frágeis (adaptado de [13]).	31
Figura 21 - Distribuição da tensão de corte em JSS (1) e em JSS com chanfro interior (2 e 3) (adaptado de [93]).	32
Figura 22 - Sugestão para melhoria da eficiência de um JSS por Hart-Smith (adaptado de [96]).	33
Figura 23 - Rácio de força máxima (a), tensão de arrancamento (b) e deslocamento vertical (c) para uma JSS com chanfro em função do ângulo do chanfro (adaptado de [97]).	34
Figura 24 - Transferência de carga e distribuição de tensões em JSS com e sem filetes de adesivo (adaptado de [87]).	35
Figura 25 - Fator de intensidade da tensão em JSS com diferentes tipos de filetes de adesivo (adaptado de [87]).	35
Figura 26 - Geometria de uma JSS e de uma junta com ressalto (adaptado de [99]).	36
Figura 27 - Comparação da tensão de arrancamento (a) e tensão de corte (b) ao longo da camada de adesivo de uma JSS e uma junta com ressalto (adaptado de [100]).	36
Figura 28 - Tensão uniaxial (a), tensão de arrancamento (b) e tensão de corte (c) numa junta com ressalto (adaptado de [99]).	37
Figura 29 - Geometria de uma JSS sem curvatura (a) e com curvatura (b) [102].	38
Figura 30 - Geometria da junta com curvatura (adaptado de [103]).	38
Figura 31 - Ponte construída com elementos compósitos curvos [106].	39
Figura 32 - Ligações adesivas típicas na fuselagem de pequenos aviões (adaptado de [107]).	40
Figura 33 - Condições fronteira em JSS (a) e juntas com curvatura (b) (adaptado de [100]).	41
Figura 34 - Exemplo de geometria estudada em juntas com curvatura (adaptado de [111]).	41
Figura 35 - Geometria de uma junta curva com ressalto genérica e respetivas dimensões.	46
Figura 36 - Camada intralaminar criada nos modelos em estudo.	46
Figura 37 - Linhas adicionadas para a uniformização da malha.	46
Figura 38 - Diferença entre a malha não uniformizada (a) e a malha uniformizada (b).	47
Figura 39 - Caracterização do tipo de elementos usados na construção dos modelos.	47
Figura 40 - Representação das condições de carga simuladas, com pormenor nos apoios do modelo (a) e na carga aplicada horizontalmente (b).	48
Figura 41 - Escolha do tipo de malha para os aderentes.	48
Figura 42 - Definição da orientação dos elementos coesivos.	49
Figura 43 - Tipo de elemento atribuído às partições relativas aos aderentes.	49

Figura 44 - Tipo de elemento atribuído à camada de adesivo e camada intralaminar dos aderentes.	49
Figura 45 - Função <i>double bias</i> , utilizada na zona de sobreposição.....	50
Figura 46 - Comparação entre o tamanho dos elementos em juntas com espessura de 1,2 mm (a) e espessura de 2,4 mm (b).....	50
Figura 47 - Refinamento da malha ao comprimento dos aderentes.....	51
Figura 48 - Malha criada nos elementos coesivos.....	51
Figura 49 - Dimensão dos elementos com objetivo de uniformizar a malha.	51
Figura 50 - Tamanho escolhido para os elementos das extremidades.	52
Figura 51 - Curvas σ - ε experimentais da liga de alumínio AW6082 T651 e respetiva aproximação numérica [116].....	53
Figura 52 - Curvas σ - ε de provetes maciços do Araldite® AV138 [101].	54
Figura 53 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [101].	55
Figura 54 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Sikaforce® 7752 (adaptado de [120]).	56
Figura 55 - Lei coesiva triangular [122].	57
Figura 56 - Lei coesiva triangular modo I (a) e modo II (b) (adaptado de [124]).	58
Figura 57 - Ciclo térmico para cura das placas de compósito [134].	63
Figura 58 - Processo de abrasão manual (a) e limpeza com acetona (b) [135].	64
Figura 59 - Curvas P - δ para o adesivo Araldite® AV138 e L_0 de 20 mm (a) e 50 mm (b) [134].	65
Figura 60 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para o adesivo Araldite® 2015 e L_0 de 50 mm [136]. .	66
Figura 61 - Curvas P - δ para o adesivo Sikaforce® 7752 e L_0 de 37,5 mm (a) e 50 mm (b) [135].	67
Figura 62 - Rotura coesiva em juntas com adesivo Araldite® AV138 e L_0 de 10 mm [134].	68
Figura 63 - Rotura intralaminar em juntas com adesivo Araldite® AV138 e L_0 de 40 mm [134].	69
Figura 64 - Rotura coesiva em juntas com adesivo Araldite® 2015 e L_0 de 20 mm (a) e 80 mm (b) [136].	69
Figura 65 - Rotura coesiva em juntas com adesivo Sikaforce® 7752 e L_0 de 12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm [135].....	70
Figura 66 - P_{\max} experimental e numérico do adesivo Araldite® AV138.	70
Figura 67 - P_{\max} experimental e numérico do adesivo Araldite® 2015.	71
Figura 68 - P_{\max} experimental e numérico do adesivo Sikaforce® 7752.	71
Figura 69 - Substrato após a rotura da camada intralaminar.....	73
Figura 70 - Exemplo de rotura coesiva numa junta com adesivo Sikaforce 7752, L_0 de 10 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	74

Figura 71 - Exemplo de rotura intralaminar numa junta com adesivo Araldite® 2015, L_o de 10 mm, t_p de 2,4 mm e R de 1000 mm.	74
Figura 72 - Distribuição da tensão de corte ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	75
Figura 73 -Evolução da tensão de corte máxima em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	75
Figura 74 - Distribuição da tensão de arrancamento ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	76
Figura 75 - Distribuição da tensão de arrancamento ao longo de L_o , até 0,1 de comprimento normalizado, para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	77
Figura 76 - Evolução da tensão de arrancamento máxima em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	77
Figura 77 - Variação da variável SDEG em função de L_o para o adesivo Araldite® AV138, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	78
Figura 78 - Variação da variável SDEG em função de L_o para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	78
Figura 79 - Variação da variável SDEG em função de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	79
Figura 80 - Variação do P_{max} em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	80
Figura 81 - Variação do P_{max} em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 2,4 mm e R de 1000 mm.	80
Figura 82 - Variação do P_{max} em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 3,6 mm e R de 1000 mm.	81
Figura 83 - Variação de U em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.	82
Figura 84 - Variação de U em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 2,4 mm e R de 1000 mm.	82
Figura 85 - Variação de U em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, com t_p de 3,6 mm e R de 1000 mm.	83
Figura 86 - Distribuição da tensão de corte ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, com L_o de 10 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.	84
Figura 87 - Distribuição da tensão de arrancamento ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, L_o de 10 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.	85

Figura 88 - Variação da variável SDEG ao longo de L_o para o adesivo Araldite® AV138, L_o de 40 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.....	86
Figura 89 - Variação da variável SDEG ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, L_o de 40 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.....	87
Figura 90 - Variação da variável SDEG ao longo de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, L_o de 40 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.....	87
Figura 91 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Araldite® AV138, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.....	88
Figura 92 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.....	89
Figura 93 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.....	89
Figura 94 - Variação de U em função de L_o para o adesivo Araldite® AV138, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.....	90
Figura 95 - Variação de U em função de L_o para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.....	90
Figura 96 - Variação de U em função de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.....	91
Figura 97 - Distribuição da tensão de corte ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, R de 1000 mm, L_o de 10 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.	92
Figura 98 - Distribuição da tensão de arrancamento ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, R de 1000 mm, L_o de 10 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.....	93
Figura 99 - Variação da variável SDEG ao longo de L_o para o adesivo Araldite® AV138, L_o de 40 mm, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.	94
Figura 100 - Variação da variável SDEG ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, L_o de 10 mm, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.	94
Figura 101 - Variação da variável SDEG ao longo de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, L_o de 10 mm, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.	95
Figura 102 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Araldite® AV138, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.....	96
Figura 103 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Araldite® 2015, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.....	96
Figura 104 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.....	97

Figura 105 - Variação de U em função de L_0 pra o adesivo Araldite® AV138, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.....	98
Figura 106 - Variação de U em função de L_0 pra o adesivo Araldite® 2015, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.	98
Figura 107 - Variação de U em função de L_0 pra o adesivo Sikaforce® 7752, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.....	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens das ligações adesivas.....	11
Tabela 2 - Estado da arte - métodos de previsão de resistência de juntas adesivas.....	27
Tabela 3 - Configurações das JSS estudadas (adaptado de [97]).....	33
Tabela 4 - Estado-da-arte - juntas com curvatura.	41
Tabela 5 - Propriedades da liga de alumínio AW6082 T651 [116].	53
Tabela 6 - Propriedades elásticas ortotrópicas do PRFC (adaptado de [117]).	53
Tabela 7 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [118].	54
Tabela 8 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [101].	55
Tabela 9 - Propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 [120].	56
Tabela 10 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Araldite® AV138 [116].....	60
Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Araldite® 2015 [128].	60
Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 [120].	61
Tabela 13 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada intralaminar [132].	62
Tabela 14 - P_{max} experimental de JSS para o adesivo Araldite® AV138 [134].....	66
Tabela 15 - P_{max} experimental de JSS para o adesivo Araldite® 2015 [136].	67
Tabela 16 - P_{max} experimental de JSS para o adesivo Sikaforce® 7752 [135].	68
Tabela 17 - Modos de rotura em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.....	73
Tabela 18 - Modos de rotura em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, t_p de 2,4 mm e R de 1000 mm.....	73
Tabela 19 - Modos de rotura em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, t_p de 3,6 mm e R de 1000 mm.....	74
Tabela 20 - Modos de rotura em função de R para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, L_0 de 10 mm e t_p de 1,2 mm.....	84

Tabela 21 - Picos de tensão de corte para R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm, com o adesivo Araldite® 2015, L_0 de 10 mm e t_p de 1,2 mm.	85
Tabela 22 - Picos de tensão de arrancamento para R de 1000 mm, 2000 mm e 300 mm, com o adesivo Araldite® 2015, L_0 10 mm e t_p 1,2 mm.	86
Tabela 23 - Modos de rotura em função de t_p para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, L_0 de 30 mm e R de 1000 mm.	92

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligações adesivas	9
2.1.1	Caracterização das juntas.....	10
2.1.2	Aplicações das juntas adesivas	11
2.1.3	Tipos de esforços e modos de rotura	13
2.1.4	Tipos de juntas	15
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	18
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	18
2.2.2	Mecânica da fratura	19
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	21
2.2.3.1	Tipos de leis coesivas	22
2.2.3.2	Parâmetros coesivos.....	23
2.2.4	Mecânica do dano	24
2.2.5	Método de elementos finitos estendido.....	25
2.2.6	Métodos sem malha.....	26
2.2.7	Estado-da-arte na previsão de resistência de juntas adesivas	27
2.3	Modificação de juntas de sobreposição simples	30
2.3.1	Efeito dos parâmetros geométricos principais.....	30
2.3.1.1	Comprimento de sobreposição.....	30
2.3.1.2	Espessura do adesivo e aderentes.....	31

2.3.2	Efeito de alterações geométricas para aumento de resistência	32
2.3.2.1	Utilização de chanfros.....	32
2.3.2.2	Utilização de filetes de adesivos	34
2.3.3	Juntas com ressalto	35
2.3.4	Juntas com curvatura	37
2.3.4.1	Considerações gerais	37
2.3.4.2	Aplicações possíveis.....	39
2.3.4.3	Modelação numérica	40
2.3.4.4	Estado-da-arte de juntas com curvatura	41
3	DESENVOLVIMENTO	45
3.1	Abordagem numérica para modelação de juntas curvas	45
3.1.1	Geometrias analisadas	45
3.1.2	Condições da análise numérica	47
3.1.3	Materiais	52
3.1.3.1	Liga de alumínio AW6082 T651	52
3.1.3.2	PRFC.....	53
3.1.3.3	Adesivos.....	53
3.1.3.3.1	Araldite® AV138	53
3.1.3.3.2	Araldite® 2015.....	54
3.1.3.3.3	Sikaforce® 7752.....	56
3.1.4	Modelo de dano coesivo	57
3.1.5	Leis coesivas para simulação dos modelos.....	59
3.1.5.1	Araldite® AV138.....	59
3.1.5.2	Araldite® 2015	60
3.1.5.3	Sikaforce® 7752	61
3.1.5.4	Camada intralaminar	61
3.1.6	Validação da técnica numérica.....	62
3.1.7	Fabrico das juntas.....	62
3.1.7.1	Juntas em PRFC.....	62

3.1.7.2	Juntas em liga de alumínio.....	63
3.1.8	Ensaio das juntas.....	64
3.1.9	Resultados obtidos.....	64
3.1.9.1	Curvas $P-\delta$	65
3.1.9.1.1	Araldite® AV138.....	65
3.1.9.1.2	Araldite® 2015.....	66
3.1.9.1.3	Sikaforce 7752.....	67
3.1.9.2	Modos de rotura.....	68
3.1.9.2.1	Araldite® AV138.....	68
3.1.9.2.2	Araldite® 2015.....	69
3.1.9.2.3	Sikaforce 7752.....	69
3.1.9.3	Resistência das juntas e validação da técnica numérica.....	70
3.2	Modelação numérica de juntas curvas.....	72
3.2.1	Comprimento de sobreposição.....	73
3.2.1.1	Análise dos modos de rotura.....	73
3.2.1.2	Análise de tensões na junta.....	75
3.2.1.3	Estudo da variável de dano.....	78
3.2.1.4	Previsão da resistência.....	80
3.2.1.5	Previsão da energia dissipada.....	82
3.2.2	Raio de curvatura dos aderentes.....	83
3.2.2.1	Análise dos modos de rotura.....	84
3.2.2.2	Análise de tensões na junta.....	84
3.2.2.3	Estudo da variável de dano.....	86
3.2.2.4	Previsão da resistência.....	88
3.2.2.5	Previsão da energia dissipada.....	89
3.2.3	Espessura dos aderentes.....	91
3.2.3.1	Análise dos modos de rotura.....	91
3.2.3.2	Análise de tensões na junta.....	92
3.2.3.3	Estudo da variável de dano.....	93
3.2.3.4	Previsão da resistência.....	95

3.2.3.5	Previsão da energia dissipada.....	98
3.2.4	Discussão dos resultados obtidos.....	99
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	105
4.1	Conclusões	105
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	107
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	111

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As juntas adesivas são uma alternativa crescente aos métodos de ligação mais tradicionais, em vários ramos da indústria, proporcionando vantagens em relação às ligações mecânicas ou soldadura. Através da utilização de adesivos como forma de ligação, é possível a ligação entre diferentes materiais, sem danificar as estruturas a ligar. Outras vantagens são facilidade de aplicação, o que permite uma redução do tempo e custo de fabrico, a elevada resistência à fadiga e a capacidade de vedação de fluidos. No que diz respeito a juntas curvas, estas são ainda um pouco recentes, pelo que a sua utilização recai sobretudo em peças curvas para a indústria aeronáutica. Assim, uma vez que poucos trabalhos foram desenvolvidos no âmbito destas juntas, torna-se de extrema relevância o aprofundar do conhecimento relativo ao comportamento de juntas curvas.

Para uma utilização mais eficiente das juntas adesivas, é importante conhecer o comportamento destas quando sujeitas a determinadas condições. Para isso, surgiram diversas técnicas numéricas que são capazes de o fazer de forma precisa. O Método de Elementos Finitos (MEF) tem vindo a destacar-se neste meio, por ser uma técnica de precisão elevada, tanto em problemas simples, como em problemas mais complexos. Os Modelos de Dano Coesivo (MDC) são também uma metodologia baseada em elementos finitos, que combina parâmetros de tenacidade e resistência, que permite prever com precisão o desempenho de ligações adesivas. Esta técnica vem resolver algumas limitações do MEF, como a dependência do tamanho da malha em regiões críticas e a necessidade de uma fenda inicial quando se usam técnicas da mecânica da fratura convencional. Os MDC dependem de vários parâmetros, como a escolha da forma da lei coesiva e os critérios de iniciação e propagação, todos estes com possível impacto no comportamento da junta. Assim, é necessário um conhecimento completo e detalhado destes efeitos para uma correta aplicação deste método.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo a realização de um estudo numérico sobre juntas de ressalto curvas com substrato em matriz epóxida reforçada com fibras

de carbono e sujeitas a pressão interior. As juntas são simuladas com três adesivos diferentes: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

Inicialmente, tenciona-se fazer uma validação da técnica numérica a utilizar, para cada um dos adesivos. Para isso, este tipo de estudo foi realizado em juntas de sobreposição simples, sendo que os resultados foram comparados com valores obtidos de forma experimental. Ao comparar os estudos numéricos e experimentais é possível avaliar se a técnica numérica utilizada também permite obter resultados viáveis em juntas curvas, por semelhança de mixicidade do carregamento entre as duas juntas.

Por fim, é realizado um estudo numérico, bem como a apresentação dos resultados obtidos. Este estudo consiste em simular as juntas curvas com ressalto no *software* Abaqus® nas condições de carga definidas. São também variados os seguintes parâmetros geométricos: comprimentos de sobreposição (L_o) que varia entre 10 mm e 80 mm, com intervalos de 10 mm, curvatura dos aderentes (R) de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm e espessura dos aderentes (t_p) de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm. O objetivo passa por analisar a influência que os parâmetros L_o , R e t_p produzem no comportamento das juntas adesivas, bem como os três adesivos utilizados, nomeadamente em termos de modo de rotura, tensões na junta, evolução da variável de dano, resistência da junta e energia dissipada.

1.3 Organização da dissertação

Para uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido na presente dissertação, esta divide-se em 4 capítulos distintos.

No primeiro capítulo é feita uma contextualização do trabalho a realizar, são definidos os objetivos, feita uma breve descrição dos mesmos, e finalmente é apresentada a organização da dissertação.

No segundo capítulo é realizado um enquadramento teórico de todos os temas considerados de abordagem relevante para uma boa perceção do trabalho realizado, e divide-se em três partes. Inicialmente é feita uma introdução às ligações adesivas, abordando tópicos como as características deste tipo de ligação, possíveis aplicações, tipos de esforços, assim como modos de rotura e tipos de junta. De seguida, é abordada a temática da previsão da resistência de juntas adesivas. Aqui, são expostos e descritos os métodos numéricos de maior relevo nesta área, sendo ainda apresentado um estado-da-arte deste mesmo tópico, com trabalhos realizados mais recentemente. Na terceira parte, são apresentadas alterações comuns realizadas à geometria das JSS e os efeitos que estas causam. De seguida, é abordado o tema das juntas com curvatura. Nesta instância, são apresentadas algumas considerações gerais sobre estas juntas, assim como aplicações possíveis e particularidades na modelação numérica. Por fim, é apresentado um estado-da-arte relativo a juntas curvas.

O terceiro capítulo divide-se essencialmente em três partes. Na primeira parte é descrita a abordagem numérica realizada neste trabalho. Aqui, são descritas as geometrias analisadas, materiais utilizados, bem como as condições da análise. É também feita uma breve descrição do modelo de dano coesivo utilizado, assim como as leis coesivas para a simulação dos modelos. Na segunda parte é realizada a validação da técnica numérica a utilizar na presente dissertação. Para isso, são exibidos dados numéricos e experimentais de três trabalhos diferentes realizados em JSS e que visam demonstrar a precisão do método numérico. Na terceira, e última parte, é realizado o estudo numérico e é feita a apresentação e discussão dos dados obtidos. Os dados apresentados relativos à que influência a variação dos parâmetros geométricos L_0 , R e t_p produzem em termos de modo de rotura, tensões na junta, resistência da junta e energia dissipada, em cada um dos adesivos estudados.

No quarto capítulo, que consiste nas conclusões e propostas de trabalhos futuros, é feita uma reflexão dos pontos mais relevantes verificados na análise numérica. São apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas
- 2.3 Modificação de juntas de sobreposição simples

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são abordados temas considerados essenciais à realização da dissertação em questão. Inicialmente, é feita uma abordagem a conceitos mais gerais, como configurações de junta, tipos de esforço e modos de rotura, bem como possíveis aplicações de ligações adesivas. De seguida, são apresentados os métodos de previsão de resistência de juntas adesivas considerados mais relevantes. É também feito um estado-da-arte, onde são apresentados trabalhos recentes já desenvolvidos nesta área. Por fim, é feita uma análise relativa a modificação de juntas de sobreposição simples. Nesta instância é dada especial atenção a juntas com curvatura, uma vez que são o objeto de estudo desta dissertação. Aqui, são abordados temas como o possíveis aplicações e desafios da modelação numérica das mesmas. Visto que, as juntas curvas ainda são um tópico recente, é feito um estado-da-arte, onde são apresentados trabalhos desenvolvidos recentemente nesta área.

2.1 Ligações adesivas

O desempenho de qualquer tipo de ligação reside na sua capacidade de assegurar estabilidade e segurança numa dada estrutura, unindo da melhor forma os diferentes constituintes. Atualmente, existem inúmeras soluções no que diz respeito a ligações, no entanto as mais comuns são as ligações mecânicas, soldadas e adesivas, sendo todas elas apresentam vantagens e desvantagens distintas.

As ligações mecânicas, apesar de exigirem uma mão de obra fácil e rápida, requerem sempre perfuração das superfícies, o que pode afetar o desempenho das mesmas. A elevada concentração de tensões, localizada em torno da ligação, afeta também a resistência da união, sobretudo em esforços de fadiga [1].

As ligações soldadas ocupam também um lugar importante na indústria, pois podem ser usadas em diversas aplicações, uma vez que apresentam uma enorme diversidade de processos. No entanto, a complexidade deste tipo de ligação carece de e um tratamento muito cuidado das superfícies, bem como uma mão de obra especializada, o que se traduz num elevado custo de fabrico. Ainda que os resultados a nível de desempenho sejam elevados, deste tipo de ligação surge sempre uma zona termicamente afetada, onde a resistência do material diminui drasticamente [2].

As ligações adesivas apresentam-se como uma solução bastante versátil, pois permitem a união entre superfícies com espessuras consideráveis, geometrias

complexas ou de diferentes naturezas. Ao contrário das ligações mecânicas, e como é apresentado na Figura 1, as ligações adesivas garantem uma distribuição de tensões mais uniforme, já que o adesivo é aplicado entre as superfícies sob forma de película, não sendo assim necessária a perfuração dos componentes. A forma sob a qual o adesivo é aplicado evita também problemas de erosão por desgaste e fadiga, para além de ter a capacidade de vedar, que elimina problemas com a erosão [1].

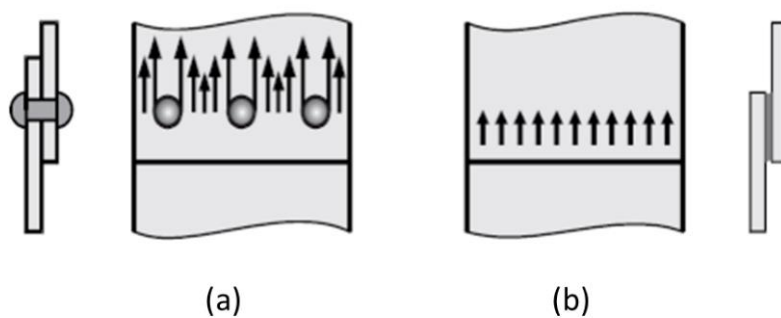


Figura 1 - Distribuição de tensões em ligações mecânicas (a) e adesivas (b) [3].

O enquadramento histórico das ligas adesivas torna-se algo complicado, uma vez que não é possível indicar as primeiras utilizações de materiais como adesivos. De facto, a utilização de adesivos aconteceu de forma gradual. Uma das primeiras menções é feita por *Gaius Plinius Secundus*, naturalista romano, que afirma que a cola foi inventada por *Daedalus*, entre 1300-1000 ac. [4]. A evolução dos adesivos deu-se de forma acentuada, no século XX. Desde então os adesivos passaram de serem feitos à base de ossos, pele, peixe, leite e plantas, até evoluírem para adesivos como são usados atualmente. Este fenómeno teve como principal influência a revolução industrial.

2.1.1 Caracterização das juntas

Na criação de uma junta adesiva é possível identificar três estados distintos. Inicialmente, o adesivo deve encontrar-se no estado líquido, de maneira que se espalhe pela superfície com facilidade, isto para que se crie uma ligação molecular entre os substratos. De seguida, o adesivo deve endurecer, para que, assim, a junta seja capaz de suportar as cargas a que estará sujeita. Por fim, é necessário compreender que a durabilidade da junta e a capacidade de suportar as cargas será afetada por diversos fatores. São exemplos o tipo de junta, a forma como a carga é aplicada e o ambiente a que estará sujeita. Assim, para o fabrico de uma boa ligação adesiva, é necessário conhecimento de diversas ciências, como a física, química ou engenharia dos materiais [5].

Quando comparadas com os métodos de ligação mais convencionais, as ligações adesivas apresentam diversas vantagens, nomeadamente quanto à facilidade de utilização, o que resulta numa elevada cadência de produção e por isso custos

reduzidos. Estas ligações apresentam também bons desempenhos no que diz respeito a esforços de fadiga, bem como vibrações e choques. A forma como é aplicado origina também bons acabamentos, uma vez que não há a necessidade de modificar as peças.

As fragilidades destas ligações estão geralmente associadas à necessidade de uma preparação prévia dos componentes a unir. A natureza polimérica dos adesivos, também se revela uma desvantagem, já que as suas características se podem alterar quando exposto a condições adversas. O controlo de qualidade desta junta é também algo difícil de realizar, muito devido à irreversibilidade deste tipo de ligações. Na Tabela 1 estão evidenciadas, de forma resumida, as principais vantagens e desvantagens associadas às ligações adesivas.

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens das ligações adesivas.

Vantagens	Desvantagens
Facilidade de utilização	Preparação superficial prévia cuidada
Boa cadência de produção	Tempo de vida limitado pelas condições ambientais
Custos normalmente baixos	Difícil inspeção da junta
Elevada resistência à fadiga	Ligação irreversível
Absorção de vibrações e choques	Baixa resistência a forças de arrancamento e clivagem
Bons acabamentos superficiais	
Não requer modificações das peças a unir	

2.1.2 Aplicações das juntas adesivas

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, as ligações adesivas ocupam um lugar cada vez mais de destaque em diversas áreas, tais como a indústria automóvel, aeronáutica, construção civil e naval.

Na indústria automóvel, inicialmente, o uso de adesivos era bastante reduzido, sendo principalmente usado para preencher espaços vazios na solda, como forma de evitar a corrosão. No entanto, com a necessidade de reduzir o peso dos veículos, a fim de os tornar mais sustentáveis, recorreu-se ao uso de materiais mais leves como o alumínio e plásticos reforçados. Para a união destes diferentes materiais recorreu-se ao uso de adesivos, por ser a ligação mais recomendável. O uso de ligações adesivas acentua ainda mais o objetivo da redução do peso, por ser uma ligação tipicamente leve [6]. Na Figura 2 é evidenciado o uso deste tipo de ligação.

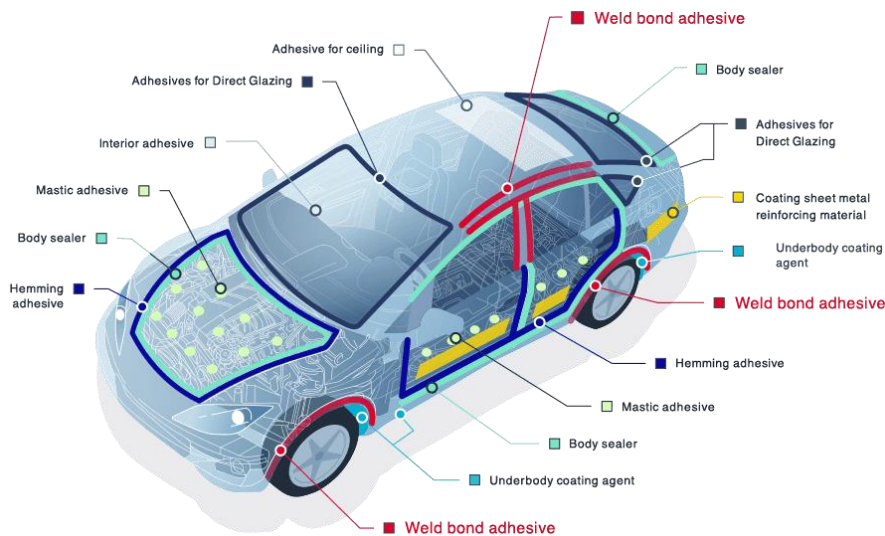


Figura 2 - Diferentes locais de aplicação de adesivos num veículo [7].

A indústria da construção civil é também um dos principais mercados de adesivos, pelas grandes superfícies de contacto que estão envolvidas. O uso deste tipo de ligações já é algo comum há algumas décadas em elementos não estruturais. As ligações adesivas vêm resolver problemas fundamentais associados aos demais métodos de ligação, como elevadas concentrações de tensão, enfraquecimento da secção transversal em ligações mecânicas e tensões residuais em ligações soldadas. Além disto, permite ainda a redução do peso global de estruturas, a ligação de diferentes materiais e permite ainda um acabamento esteticamente agradável. Tudo isto são características que tornam o uso de adesivos vantajoso nesta indústria [8]. Mais recentemente, as ligações adesivas têm também vindo a ser utilizados em elementos estruturais ou como elementos de reforço em estruturas pré-existentes. A principal barreira ao crescimento destas ligações, neste tipo de elementos prende-se com o elevado tempo de vida esperado destas estruturas e as condições adversas a que estão sujeitas, uma vez que o comportamento dos adesivos nestas situações ainda não é totalmente conhecido [9].

Também na indústria aeronáutica o uso de adesivos se revelou determinante na construção de qualquer tipo de aeronave, independentemente da sua complexidade. Fatores que contribuíram para a utilização deste tipo de ligação foram a elevada resistência à fadiga que estas ligações tipicamente oferecem, bem como, uma redução significativa do peso, bom isolamento e amortecimento de vibrações. Apesar das vantagens apresentadas, o uso desta técnica deve ser realizado com o maior cuidado, pois não existem meios de controlo de qualidade capazes de avaliar, de forma precisa, o seu estado [10]. A Figura 3 dá indicação dos componentes estruturais do Airbus A380 que contêm ligações adesivas. Isto é indicativo do estado atual da extensiva utilização de ligações adesivas na indústria aeronáutica.

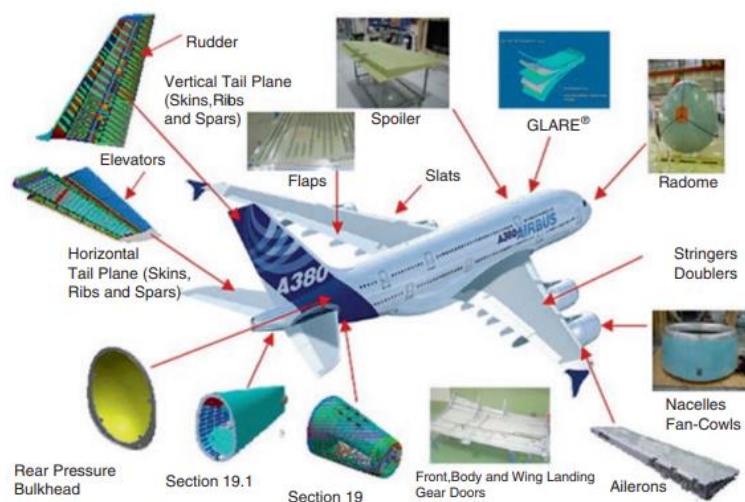


Figura 3 - Elementos estruturais que contêm ligações adesivas no Airbus A380 [11].

Relativamente à indústria naval, as características mais relevantes para a utilização de adesivos são a resistência à humidade, temperatura e durabilidade. As cargas que este deve sustentar revelam-se também um critério importante, sendo os esforços principais de flexão, torção e corte. As ligações em que são mais comumente utilizadas ocorrem nos painéis laterais e no casco [12].

2.1.3 Tipos de esforços e modos de rotura

Na projeção de uma ligação adesiva é essencial saber-se previamente a que tipo de carregamentos a junta estará sujeita, para que seja possível prever o seu comportamento, e assim fabricar a junta que melhor se adequa à situação. Existem cinco tipos de esforços: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento. Em modelos reais, uma junta pode estar sujeita a uma combinação de vários esforços.

Os esforços de tração ocorrem quando as forças se encontram aplicadas perpendicularmente aos substratos, e uniformemente distribuídas ao longo da área de ligação, como é visível na Figura 4. Teoricamente, a distribuição de tensões neste tipo de carregamento é uniforme. No entanto, tipicamente ocorrem picos de tensões nas extremidades da ligação devido a esforços de arrancamento e clivagem [13].

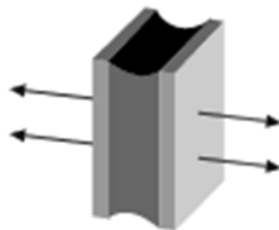


Figura 4 - Esforços de tração em juntas adesivas (adaptado de [14]).

Os esforços de compressão ocorrem nas mesmas condições que a tração, apenas as forças apresentam direções contrárias, como é verificado na Figura 5. Na realidade, qualquer junta sujeita a compressão pura não necessita de adesivo, desde que a força seja elevada o suficiente, e não ocorra movimento relativo entre as superfícies [13].

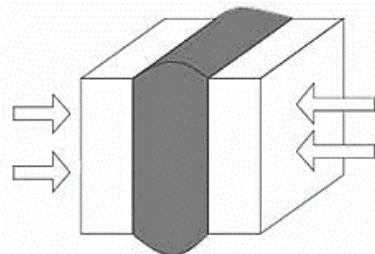


Figura 5 - Esforços de compressão em juntas adesivas (adaptado de [15]).

Os esforços de corte resultam de um carregamento paralelo ao plano da junta, o que leva ao movimento dos dois substratos em direções diferentes[13]. As tensões máximas ocorrem nas extremidades da ligação, enquanto no centro estes valores são reduzidos (Figura 6). Isto deve-se à deformação diferencial em cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, já que estes se deformam de forma longitudinal a uma taxa crescente, de uma extremidade à outra da sobreposição [16].

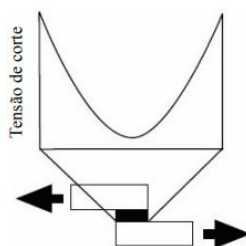


Figura 6 - Distribuição de tensões em esforços de corte em juntas adesivas [1].

Os esforços de clivagem e arrancamento (Figura 7) são bastante semelhantes. Normalmente devem ser evitados carregamente desta natureza nas ligações adesivas. Os esforços de clivagem ocorrem quando são aplicadas forças de tração na extremidade de um aderente rígidos. Já os esforços de arrancamento ocorrem quando esse mesmo carregamento é feito na extremidade de um aderente flexível [13].

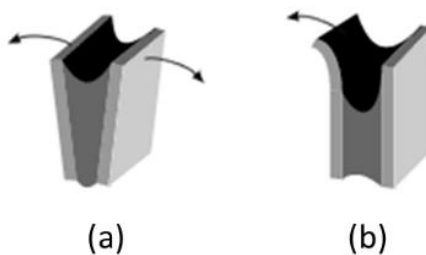


Figura 7 - Esforços de clivagem (a) e arrancamento (b) em juntas adesivas (adaptado de [14]).

No que diz respeito a modos de rotura, a norma ASTM D 5573 - 99 [17] prevê sete modos de rotura. No entanto, os mais comuns são rotura coesiva, rotura adesiva, rotura mista e rotura pelo aderente, ilustrados na Figura 8.

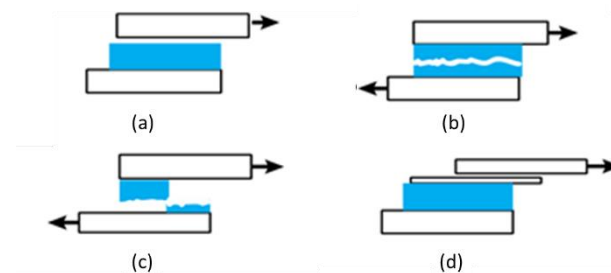


Figura 8 - Modos de rotura em juntas adesivas: rotura adesiva (a), rotura coesiva (b), rotura mista (c) e rotura pelo aderente (d) (adaptado de [18]).

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre os aderentes e o adesivo é mais forte que a resistência interna do adesivo, pelo que a rotura ocorre pelo adesivo. Nesta situação, ambas as superfícies ficam cobertas por uma camada de adesivo. A rotura adesiva ocorre na interface entre um dos aderentes e o adesivo. Neste caso um dos aderentes encontra-se coberto pelo adesivo, enquanto o outro não apresenta resíduos de adesivo. A rotura mista consiste na combinação dos dois tipos de rotura anteriormente indicados, e normalmente resulta de uma limpeza deficiente de uma das superfícies do aderente, ou das propriedades do próprio adesivo. Por fim, pode ainda correr rotura pelo substrato. A rotura pelo aderente ocorre quando a resistência deste é inferior à do adesivo e à ligação entre o adesivo e o próprio aderente. Pode ainda ser contemplado um outro modo de rotura, neste caso rotura intralaminar. Este tipo de rotura é exclusivo a materiais compósitos e enquadra-se na rotura pelo aderente [19]. O modo de rotura preferencial é o coesivo, quer se dê no adesivo ou no aderente, pois desta forma é possível aproveitar a totalidade da resistência dos constituintes da junta. Assim, uma junta que rompe de forma coesiva, pode ser considerada uma junta bem concebida [1].

2.1.4 Tipos de juntas

Como visto nos subcapítulos anteriores, as juntas adesivas podem estar sujeitas a diferentes tipos de carregamento, e conseqüentemente, esforços. Assim, as juntas adesivas podem também apresentar diferentes configurações, estando as mais comuns apresentadas na Figura 9.

Numa junta adesiva ideal, o adesivo deve ser solicitado na direção em que este é mais resistente à rotura. Assim, a junta deve ser fabricada de modo a proporcionar uma distribuição de tensões favorável à mesma. Algumas juntas podem ser de difícil fabrico, dispendiosas, ou de difícil alinhamento, pelo que estes fatores devem ser sempre analisados, de forma a otimizar o desempenho da junta [13].

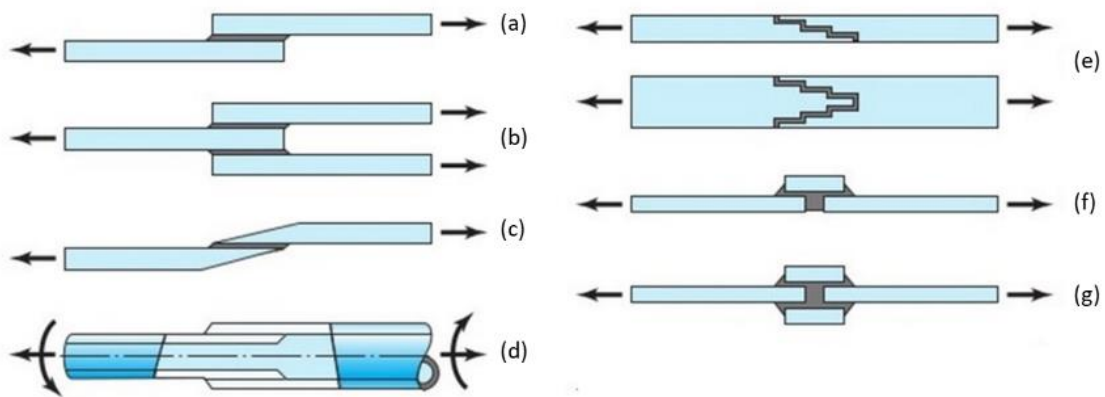


Figura 9 - Diferentes tipos de juntas adesivas: sobreposição simples (a), sobreposição dupla (b), sobreposição com chanfro (c), tubular (d), degrau (e), tira simples (f) e tira dupla (g) (adaptado de [20]).

A junta de sobreposição simples (JSS) é a mais utilizada na indústria, por ser de fácil fabrico e pelo facto de o adesivo ser solicitado maioritariamente ao corte. Posto isto, uma vez que os aderentes não se encontram no mesmo plano, gera-se um momento fletor, como é visível na Figura 10, que pode comprometer o desempenho desta configuração [16]. De modo a contrair os efeitos da flexão, a configuração mais usual é a junta de sobreposição dupla (JSD). Ainda que a JSD também esteja sujeita a efeitos de flexão, estes são notavelmente menores. Por outro lado, o seu processo de fabrico é mais demorado e nem sempre exequível.

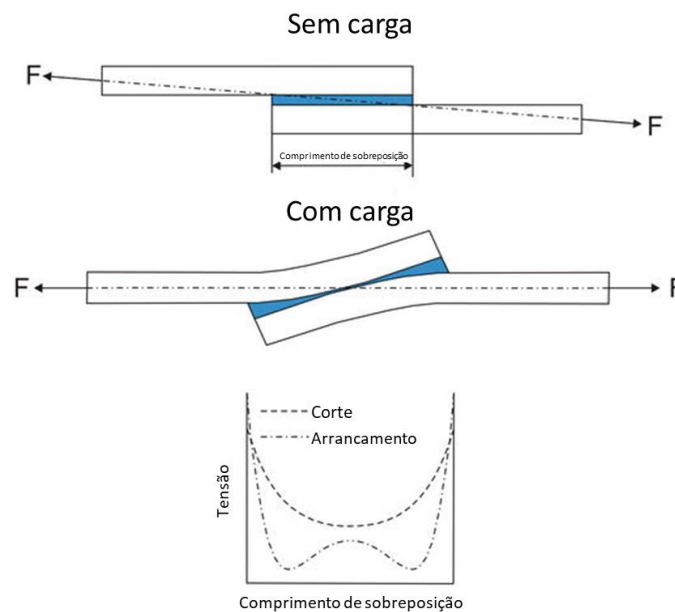


Figura 10 - Efeito dos esforços de flexão na JSS e tensões ao longo da camada adesiva (adaptado de [21]).

As juntas topo a topo são as mais simples de fabricar, de todas as apresentadas. O grande inconveniente reside na baixa resistência que apresentam, uma vez que carregamentos que promovam a flexão de junta, resultam em esforços de clivagem.

Como é apresentado na Figura 11, podem ser feitas alterações a esta configuração, tendo em vista o melhoramento deste aspeto. No entanto estes processos resultam num encarecimento do processo de fabrico [16].

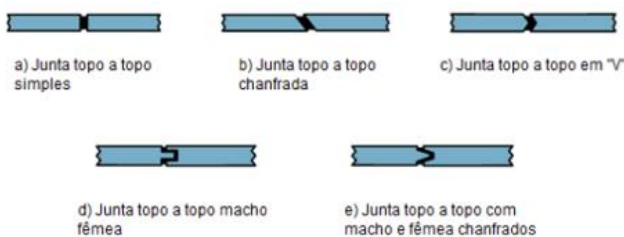


Figura 11 - Possíveis reconfigurações de juntas topo a topo [22].

As juntas com tira são normalmente utilizadas para manter alinhadas as cargas de serviço. São boas alternativas às juntas de sobreposição, quando a sua utilização não é possível ou recomendada, devido à espessura dos aderentes. A utilização da junta com tira dupla é preferível, pois minimiza os efeitos do momento fletor, e consequentemente dos esforços de arrancamento. Existem outras variantes desta junta, que apresentam melhor desempenho em relação a carregamentos que promovem a flexão. No entanto, estas requerem maquinagem, o que pode aumentar bastante o custo e complexidade de fabrico [13].

As juntas tubulares (Figura 12) são tipicamente usadas na ligação de varões ou tubos. Este tipo de junta é uma boa opção em relação às ligações topo a topo, pois apresenta uma maior resistência à flexão. Além disso, as juntas tubulares possuem uma maior área de sobreposição. Este tipo de junta, por ser uma ligação interior revela bastantes dificuldades ao nível da verificação de qualidade da junta. Para além disso, requer também um elevado nível de maquinagem, o que se traduz num custo de fabrico elevado, quando comparada com configurações mais simples [13].

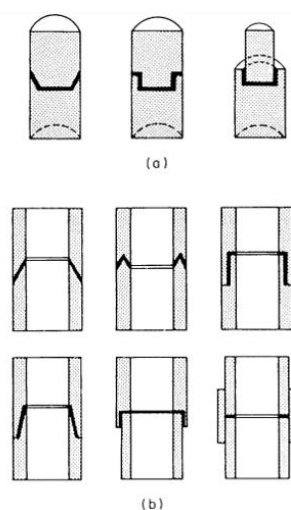


Figura 12 - Exemplo de juntas tubulares: ligações em varões (a) e ligações em tubos (b) (adaptado de [13]).

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

O uso de ligações adesivas tem vindo a aumentar nas diferentes áreas da indústria, resultado das vantagens que estas apresentam face às ligações mais tradicionais. Assim, torna-se importante o uso de técnicas de previsão de resistência, de modo a aperfeiçoar o uso de adesivos. Existem, essencialmente, duas alternativas no estudo da previsão da resistência de uma junta: análises de forma fechada (método analítico) e métodos numéricos (por exemplo, método de elementos finitos) [23].

Os estudos que inicialmente permitiram avanços neste campo remontam à década de 30, com o modelo criado por Volkersen [24], que considera os materiais inteiramente elásticos e que o adesivo apenas deforma em corte. Na década seguinte surgiram trabalhos de Goland e Reissner [25] que tinham também em consideração os efeitos dos esforços de arrancamento. No entanto, os métodos analíticos revelam-se demasiado complexos quando se introduz a hipótese de o adesivo se deformar plasticamente, de se usarem aderentes compósitos ou materiais diferentes. Por isso, surgiu a necessidade da utilização de métodos numéricos. Neste campo, o método de elementos finitos (MEF) é o mais comum. Adams e Peppiatt [26] foram os primeiros a utilizar o MEF neste contexto. A influência dos filetes de adesivo, rotação da junta e plasticidade de adesivos e aderentes foi também estudada por Harris e Adams [27].

O MEF pode também ser combinado com técnicas da mecânica da fratura, no entanto isto resulta em elevados esforços computacionais, e dificulta também a avaliação do crescimento da fenda, uma vez que existe a necessidade de refazer a malha, na eventualidade de propagação da fenda [28].

Com o avanço dos métodos numéricos, surgiu a combinação da modelação convencional pelo MEF, com elementos coesivos. Esta técnica incorpora o MEF em zonas onde não é previsto ocorrer dano pela mecânica da fratura com modelos de dano coesivo (MDC). Mais recentemente surgiram outras técnicas de modelação do crescimento das fendas, como o método de elementos finitos estendido (MEFX), que usa funções de enriquecimento para representar um campo de deslocamentos descontínuo. Existem ainda métodos que não recorrem ao uso de malhas, no entanto, o estudo destas técnicas na previsão da resistência de juntas adesivas não é muito comum.

2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste na utilização de métodos analíticos ou numéricos, tipicamente MEF, para a obtenção de valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão destes valores é feita usando critérios de 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 do estado limite. Para tal, os valores obtidos são comparados com os valores admissíveis dos materiais, de modo a prever a resistência da ligação [29]. No que diz respeito aos métodos analíticos, uma solução simples foi também apresentada por Volkersen [24].

Na utilização do MEF como parte da mecânica dos meios contínuos, estudos iniciais realizadas por Adams et al. [16], utilizaram as tensões principais máximas como critério de rotura do adesivo. A principal limitação deste método é o facto de desprezar todas as restantes tensões principais, ainda que estas nem sempre sejam nulas. A existência de singularidades de tensões, que ocorrem nas extremidades das ligações, torna a dimensão da malha um fator importante a considerar na previsão da resistência.

De modo a ultrapassar as dificuldades impostas pela dependência da malha devido as singularidades, ao longo dos anos surgiram diversos trabalhos. Zhao et al. [30] aplicou o critério em que a rotura ocorre quando a densidade de energia média plástica média sobre uma certa distância atinge um valor crítico. A energia específica é menos sensível ao tamanho da zona de integração, uma vez que é calculada como sendo uma média sobre uma área, em análises bidimensionais (2D), ou sobre um volume, no caso de análises tridimensionais (3D) [29].

Em estudos mais recentes, Wu et al. [31] comparou o comportamento de juntas de chanfro interior com juntas em degrau, que apresentavam falhas propositadas na camada de adesivo. Para isso, usou o critério da tensão de corte máximo em adesivos com comportamento frágil, e o critério de deformação ao corte máxima em adesivos com comportamento dúctil. A utilização da mecânica dos meios contínuos em conjunto com MEF apresenta a vantagem de permitir uma análise tipicamente simples, que é possível realizar-se também em geometrias complexas. Os principais inconvenientes prendem-se com a dependência do tamanho da malha, devido a variações bruscas da geometria, e por não ser possível prever a existência de defeitos.

2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos assenta no princípio de que os materiais são contínuos. Isto revela-se um problema quando os materiais apresentam defeitos, como fendas, cantos ou reentrâncias. Assim, a mecânica dos meios contínuos não é capaz de apresentar uma solução para estes casos, que resultam em singularidades de tensão e deformação [29]. Em contrapartida, a mecânica da fratura assume que os materiais não são necessariamente contínuos, e prevê a existência de falhas, tipicamente fendas, efeito do processo de fabrico ou qualquer outro problema durante o seu funcionamento. Em teoria, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° , este efeito foi descoberto por Williams [32] em 1959. Este efeito também se aplica à singularidade de tensão existente entre as faces de duas faces ligadas. Assim sendo, a singularidade existe, mesmo já não existindo

superfícies livres [33]. A mecânica da fratura permite avaliar se os defeitos existentes na estrutura são propensos a atingir dimensões críticas que levem a roturas estruturais ou se, durante o tempo de utilização da estrutura, estes defeitos mantêm dimensões aceitáveis. Os avanços nesta área foram possíveis devido aos trabalhos desenvolvidos por Arnold [34], que estudou a fratura em fibras de vidro. Isto permitiu avaliar que todos os corpos apresentam defeitos, que para maiores dimensões há uma maior presença de defeitos e que a rotura ocorre através do defeito mais crítico.

Em materiais dúcteis, uma grande quantidade de material plastifica e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final. Por isso, a teoria da mecânica da fratura linear elástica (MFLE) não é aplicável nestes casos. Assim, foi desenvolvida por Hutchinson [35] e por Rice [36] a solução HRR (Hutchinson Rice Resengreen) para modelar este tipo de materiais.

A mecânica da fratura assenta em dois critérios, que são implementados para o estudo de materiais com falhas, designadamente o fator de intensidade de tensão e a taxa de libertação de energia. O fator de intensidade de tensão está relacionado com as mudanças no campo de tensões na periferia das fendas. No entanto, estes são difíceis de determinar quando a fenda ocorre na interface ou na proximidade. Assim sendo, a taxa de libertação de energia é o critério usado tipicamente, e usa a taxa de libertação de energia a tração e corte (G_I ou G_{II} , respetivamente), e o respetivo valor crítico (G_c).

Como apresentado na Figura 13, uma fenda pode propagar-se de três diferentes modos. O modo I representa o modo de abertura, o modo II e III são modos de corte. No modo II as fendas apresentam movimento relativo perpendicular à frente da fenda, já no modo III o movimento relativo é paralelo à frente da fenda [37].

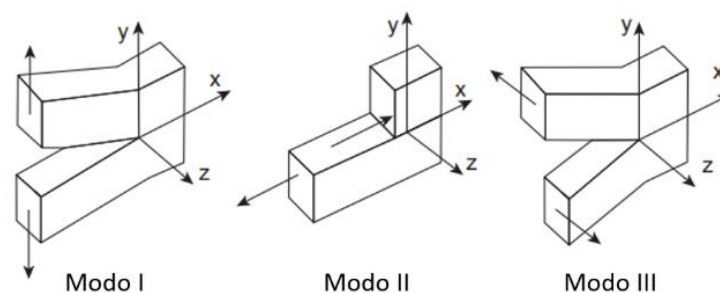


Figura 13 - Modos de propagação de uma fenda (adaptado [38]).

Tipicamente, a rotura de juntas adesivas ocorre em modo misto, devido às propriedades de tração e corte dos adesivos, e também devido aos aderentes. Para isso, deve ser introduzido o conceito de envelope da fratura, que fornece uma função para a rotura em função dos modos de fratura.

2.2.3 Modelos de dano coesivo

Os MDC fornecem uma alternativa no que diz respeito à previsão da resistência de juntas adesivas. O estudo destes modelos teve início com os trabalhos pioneiros de Barenblatt [39] e Dugdale [40], que descreveram o dano sob cargas estáticas na zona de processo da fratura na frente da fenda. Uma das principais vantagens que os MDC apresentam, relativamente aos restantes métodos de previsão, deve-se ao facto de não estarem dependentes das dimensões da malha, como é verificado na Figura 14. Isto acontece porque a evolução do dano é realizada através de critérios energéticos medidos sobre uma área, em vez de assumir valores de um ponto único [41].

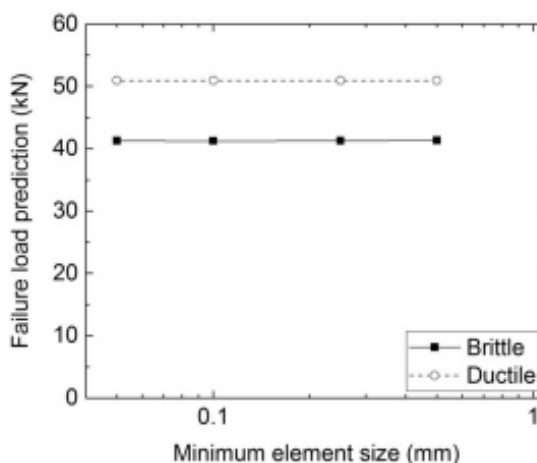


Figura 14 - Efeito das dimensões dos elementos coesivos na previsão de resistência em adesivos dúcteis e frágeis sob esforços de tração [42].

Nos MDC são aplicadas leis coesivas de tração-separação para modelar interfaces ou regiões finitas. Esta técnica assenta no pressuposto de que pode ser artificialmente introduzida uma ou mais fendas na estrutura, de forma a analisar a evolução do dano, através de descontinuidades no campo dos deslocamentos. Existem duas possíveis abordagens no que diz respeito a modelos coesivos: a aproximação local e a aproximação contínua. Os elementos coesivos podem representar uma camada fina de adesivo de espessura constante (aproximação contínua) ou a interface entre diferentes camadas (aproximação local), como é verificado na Figura 15.

Este método de previsão é normalmente utilizado com recurso à análise por MEF, o que permite modelar o comportamento dos materiais, sem a necessidade de introduzir uma fenda inicial. A dificuldade em determinar as propriedades da ligação adesiva são o principal inconveniente, já que estas são diferentes no adesivo e nos aderentes. Assim, para a aplicação de MDC em associação com MEF é necessária a determinação de propriedades relativas à libertação de energia na propagação da fenda na direção normal (G_{IC}) e de corte (G_{IIC}), bem como a tensão coesiva à tração (t_n^0) e tensão coesiva ao corte (t_s^0) [43].

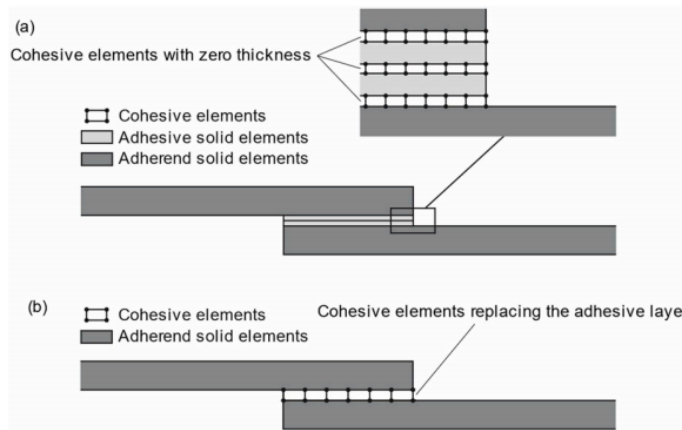


Figura 15 - Elementos coesivos aplicados através da aproximação local (a) e aproximação contínua (b) numa ligação adesiva [41].

A facilidade da utilização destes modelos coesivos, aliada à capacidade de prever de forma bastante realista a resistência da junta, permite que esta técnica seja usada diretamente em juntas mais complexas, usadas na indústria. São exemplos disso estudos recentes feitos em juntas adesivas de turbinas eólicas [44], painéis de *sandwich* [45] e em aplicações usadas na indústria aeroespacial [46].

2.2.3.1 Tipos de leis coesivas

As leis coesivas definem o comportamento do material durante a formação e evolução da fenda. Assim, o tipo de lei coesiva a ser usado deve ser escolhido tendo em conta o comportamento do material e a interface a ser simulado. Por isso, ao longo dos anos, foram desenvolvidos modelos como os triangulares [47], trapezoidais [48], linear parabólico [49], exponencial [50] e polinomial [51]. Mais recentemente surgiu também um novo modelo, desenvolvido por Benyahia et al. [52], que apresenta resultados promissores. O modelo em causa apresenta uma tipologia linear exponencial.

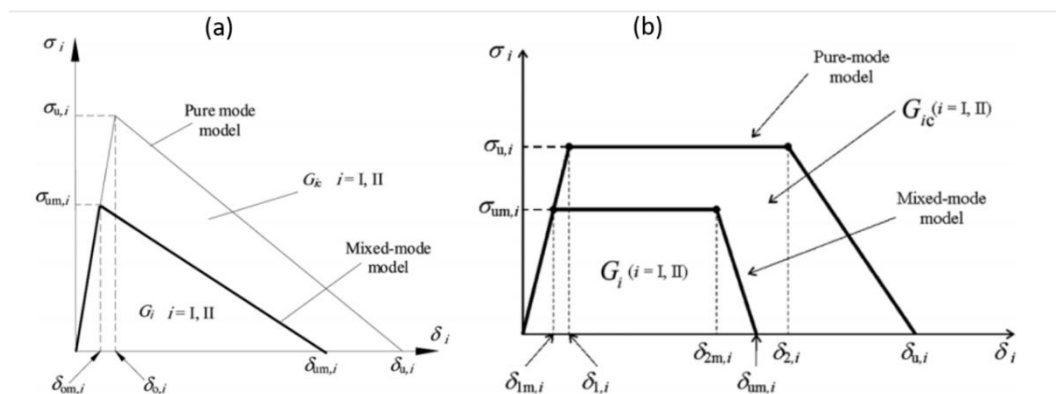


Figura 16 - Leis coesivas triangulares (a) e trapezoidais (b) em modo puro e modo misto (adaptado de [33]).

As leis triangulares e trapezoidais, por apresentarem resultados viáveis e uma simplicidade de aplicação, são as mais utilizadas. Estas leis podem ser aplicadas sobre diferentes modos, neste caso, puro e misto, como apresentado na Figura 16.

Em relação as leis triangulares, o pico das curvas representa o início do dano, quando a fenda começa a propagar-se. No modo de carregamento misto, os critérios de energia são obtidos através da combinação dos carregamentos dos modos puros (tração e corte) [43]. Normalmente, as leis triangulares são usadas sobretudo em ligações com adesivos frágeis e com uma reduzida deformação plástica após a cedência. Isto, por serem mais simples, quando comparados com as leis trapezoidais e ao mesmo tempo apresentarem resultados igualmente plausíveis. No que diz respeito a adesivos dúcteis, é preferível o uso de leis trapezoidais, pois estas permite deformações plásticas [42].

2.2.3.2 Parâmetros coesivos

A análise por MDC permite uma prever o comportamento de juntas adesivas de uma forma bastante viável. Para isso, existem algumas premissas que devem ser cumpridas, particularmente a caracterização da ligação em condições geométricas que resultem em esforços que sejam idênticos aos simulados, bem como a escolha de uma lei coesiva que se adeque ao comportamento do adesivo [53]. Assim, deve ser assegurada uma correta identificação dos parâmetros coesivos (G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0). Para isso, surgiram diferentes técnicas de cálculo destes parâmetros, nomeadamente o método de definição individual de parâmetros, método inverso e método direto, sendo que cada um apresenta diferentes graus de complexidade, bem como limitações. Independentemente do método utilizado, normalmente recorre-se a ensaios do tipo *Double-Cantilever Beam* (DCB) ou *End-Notched Flexure* (ENF) para a determinação dos parâmetros coesivos. A geometria destes ensaios encontra-se na Figura 17.

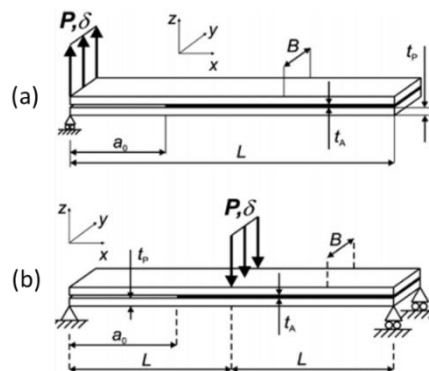


Figura 17 - Geometria dos ensaios DCB (a) e ENF (b) [54].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na caracterização individual de cada um dos parâmetros coesivos, através de testes adequados [55]. A maior falha apontada a este método reside nos desvios entre os parâmetros do material maciço e do adesivo como camada fina. Este problema é causado pelas restrições às

deformações da camada de adesivo impostas pelos aderentes, e também pelo modo de propagação misto das fendas nas ligações adesivas [23]. De facto, em materiais maciços as fendas têm tendência a propagar-se perpendicularmente à direção da tensão máxima. Já em camadas finas de adesivo as fendas tendem a propagar-se no sentido longitudinal da direção uma vez que o adesivo, tipicamente, é mais fraco e flexível que os aderentes.

No método inverso, os parâmetros coesivos são calculados através de um processo iterativo de ajuste entre previsões numéricas e dados experimentais (normalmente curva P - δ ou curva- R) até que sejam obtidos valores aceitáveis [56]. Os parâmetros G_{IC} e G_{IIC} são geralmente determinados através de ensaios DCB e ENF, respetivamente, e são usados como parâmetros de entrada para a respetiva lei coesiva. Em relação aos parâmetros t_n^0 e t_s^0 , podem ser usados, inicialmente, valores aproximados para se iniciar o processo iterativo [57].

O método direto permite obter a forma exata da lei coesiva, uma vez que os MDC da ligação são determinados a partir de dados fornecidos por ensaios de caracterização à fratura. Isto é realizado pela diferenciação das curvas G_I - δ_n ou G_{II} - δ_s (em que δ_n representa o deslocamento à tração e δ_s o deslocamento ao corte) [54]. A validação deste método pode ser feita replicando de forma numérica os ensaios de caracterização com uma geometria idêntica e a lei coesiva obtida experimentalmente como forma de previsão do comportamento do adesivo. De seguida, é comparada a curva P - δ resultante com a curva obtida inicialmente. A limitação deste processo relaciona-se com o facto de ser também necessário incluir testes por MDC que atualmente, não se encontram estudados, sendo apenas possível fazer este tipo de teste em geometria em modo puro. A avaliação dos parâmetros G_I e G_{II} é feita segundo métodos baseados na MFLE. No entanto, estes apenas podem ser aplicados em adesivos com baixa ductilidade. Assim, em adesivos com elevada ductilidade o integral- J surge como alternativa à validação dos parâmetros G_I e G_{II} [58].

2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano permite simular o desgaste progressivo do material no adesivo, ou seja, o adesivo perde a sua rigidez ou resistência de forma progressiva, até atingir o ponto de falha, onde perde a totalidade da rigidez ou resistência. Isto é feito através da introdução de dano nos elementos, o que modifica a resposta do material, pela redução dos esforços transmitidos. Como referência desta metodologia, são exemplos os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [59] para a delaminação de compósitos e rotura da matriz, bem como o de Kattan e Voyiadjis [60] para camadas finas de adesivo. As variáveis do dano podem ser caracterizadas por dois grupos. Variáveis que recorrem à redefinição das propriedades do material para a previsão da quantidade de dano e variáveis relacionadas com a definição física de um tipo de dano em específico, como a porosidade ou a área relativa de micro-cavidade [60]. A análise da evolução do dano é

feita em função da carga para simulações estáticas e em função do número de ciclos para análises de fadiga. A mecânica do dano apresenta-se como uma alternativa aos MDC, uma vez que permite a simulação gradual do dano e da evolução de uma fenda com trajetórias tanto pré-definidas, como arbitrárias [61]. No entanto, a determinação dos parâmetros e das propriedades físicas usadas para a simulação da evolução do dano podem ser complexas, pelo que os MDC continuam a ser mais usados na previsão do comportamento de juntas. Assim, o uso desta técnica ainda não se encontra muito estudada no que diz respeito a ligações adesivas.

2.2.5 Método de elementos finitos estendido

O método de elementos finitos estendido (MEFX) é uma evolução do MEF, que permite a modelação do crescimento do dano para a previsão de fratura, que se baseia na resistência dos materiais para a iniciação do dano e na deformação para a avaliação da fratura. No MEFX não é necessário que a fenda se propague numa direção conhecida, o que se torna uma vantagem quando comparado com os MDC. Assim, a fenda pode propagar-se livremente pela estrutura, sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria da descontinuidade e sem a constante necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [62]. O MEFX baseia-se no conceito da partição de unidade, que consiste na introdução funções de enriquecimento local para os deslocamentos na proximidade da fenda, que permite o crescimento e separação entre faces da fenda. Resultado do crescimento da fenda, a extremidade da fenda muda continuamente a sua posição e orientação, em função das condições de carregamento e geometria da estrutura, à medida que é feita a introdução das funções de enriquecimento local [63].

No *software* Abaqus® encontra-se disponível a criação de modelos através do MEFX para a análise do crescimento do dano. O Abaqus® permite a análise de através de fendas já existentes ou pela introdução de uma fenda numa nova região. As leis tração-separação para a simulação a evolução do dano até à fratura podem ser lineares ou exponenciais. A iniciação do dano pode seguir seis critérios diferentes, nomeadamente [64]:

- *Maximum principal stress criterion* (MAXPS);
- *Maximum principal strain criterion* (MAXP);
- *Maximum nominal stress criterion* (MAXS);
- *Maximum nominal strain criterion* (MAXE);
- *Quadratic nominal stress criterion* (QUADS);
- *Quadratic nominal strain criterion* (QUADE).

2.2.6 Métodos sem malha

Os métodos de previsão de resistência que não recorrem ao uso de malha têm vindo a tornar-se, cada vez mais, uma alternativa aos restantes métodos de previsão. Apesar de esta técnica já se encontrar bastante estudada em diversos ramos da engenharia, poucos trabalhos se encontram direcionados à previsão de resistência no que diz respeito a ligações adesivas.

Ainda que o MEF seja usado com sucesso em diversos estudos, este apresenta algumas limitações. Situações em que ocorram grandes deformações afetam o rigor deste método, devido a distorções na malha. Uma reorganização da malha poderia solucionar o problema, no entanto isto resultaria num aumento acentuado do esforço computacional. Por isto, o MEF não é a alternativa mais viável em situações em que há a constante necessidade de reajustar a malha. Assim, para transpor os problemas destes métodos, surge a necessidade de desenvolver métodos sem malha [65].

A aplicação de um método sem malha normalmente segue os seguintes princípios[66]. Primeiro, estuda-se a geometria do problema e estabelece-se o domínio sólido e contorno. De seguida definem-se as condições naturais e essenciais dos limites. Posto isto, o domínio e fronteiras do problema são definidos por um conjunto de nós com uma distribuição que pode ser regular ou irregular. Como representado na Figura 18, ao contrário dos métodos de previsão mais convencionais, neste método o conjunto de nós não forma uma malha, uma vez que para a formulação das funções (de aproximação ou interpolação) não é necessário qualquer tipo de conhecimento prévio relativo à relação entre cada um dos nós. Na verdade, a única informação necessária é a localização espacial de cada nó.

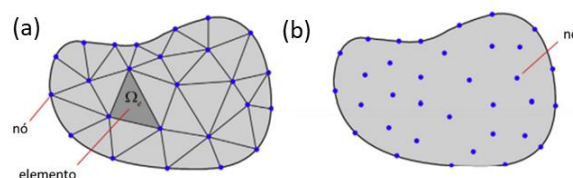


Figura 18 - Distribuição de nós através de um método de previsão com malha (a) e um método sem malha (b) num modelo em duas dimensões (adaptado de [67]).

Assim como os métodos dependentes de malha, a densidade de nós, bem como a sua distribuição, afeta o desempenho dos métodos sem malha. Uma distribuição de nós mais refinada leva a resultados mais precisos. No entanto, ao aumento do número de nós está também associado a um aumento do esforço computacional. Assim, zonas em que seja previsível uma elevada concentração de tensões devem apresentar uma densidade nodal maior, quando comparadas com zonas em que a concentração de tensões não é espetável. A utilização destes métodos pode apresentar diferentes modelos. Alguns dos modelos mais comuns são: *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) [68, 69], *Element-Fre Galerkin* (EFG) [70], *Reproducing Kernel Particle* (RKP) [71,

72] e *Radial Point Interpolation Method* (RPIM) [73], que surge como melhoria dos modelos *Point Interpolation Method* (PIM) [74] e *Point Assembly Method* (PAM) [75].

No que toca a ligações adesivas, este método torna-se verdadeiramente vantajoso quando usado em problemas de mecânica da fratura ou de dano, uma vez que é possível simular a evolução do dano, sem que para isso seja necessário o reajuste da malha. Na verdade, nos modelos que não recorrem ao uso de malhas, o caminho de propagação da fenda é independente da distribuição das partículas no modelo [76]. Ainda que estes modelos sejam de uma elevada complexidade de aplicação e exijam um elevado esforço computacional, estudos recentes comprovam que este tipo de análise é mais capaz e preciso que outros métodos mais convencionais. De facto, o uso correto de métodos sem malha pode até resultar numa eficiência computacional superior à de modelos em 3D, obtidos por elementos finitos [77].

2.2.7 Estado-da-arte na previsão de resistência de juntas adesivas

Na Tabela 2 encontram-se apresentados alguns dos estudos atuais considerados relevantes no que diz respeito à previsão de resistência de juntas adesivas.

Tabela 2 - Estado da arte - métodos de previsão de resistência de juntas adesivas

Artigo	Descrição
Monsef et al. [78]	O presente artigo tem por objetivo estudar o efeito dos diferentes ensaios de fratura em modo II em ligações adesivas. Para isso, desenvolveu-se uma combinação entre os métodos direto e inverso, para que a lei coesiva fosse obtida com recurso a dados experimentais de carga-deslocamento, através de métodos analíticos, para representar a zona de fratura em modo II. Foram usados os ensaios ENF e <i>End-Load Split</i> (ELS). Os resultados indicam que a lei coesiva não depende do tipo de ensaios utilizado. A lei coesiva quando comparada com valores obtidos através do método da integral- <i>J</i> , apresenta também valores concordantes.

Sánchez-Arce et al. [79]

Este trabalho visa implementar o critério Exponent Drucker-Prager (EDP) num método sem malha, em concreto no método Natural Neighbour Radial Point Interpolation Method (NNRPIM), e compará-lo com o critério de von Mises, no estudo de JSS com aderentes de alumínio e com diferentes tipos de adesivos e comprimentos de sobreposição. A correlação entre os dados obtidos e valores experimentais indicam que o critério EDP foi implementado com sucesso, bem como a capacidade de prever, com melhor precisão, o comportamento do adesivo nas ligações, quando comparado com o critério de von Mises. A conclusão final foi que o método NNPRIM é uma alternativa fidedigna em análises elásticas de juntas adesivas.

Zhang et al. [80]

No artigo em questão usaram-se juntas compósito-metal em degrau, com quatro ângulos diferentes. Com base nos dados experimentais obtidos foram criados modelos através do MEF em conjunto com a mecânica do dano, incorporado no *software* Abaqus®, para estudar a influência, sob esforços de tração, de três propriedades: o material metálico usado (aço, alumínio e titânio), a sequência de empilhamento e as características do adesivo. Os resultados mostram que a plasticidade do metal e o ângulo da junta influenciam o limite plástico da junta. O titânio foi o material que garantiu uma tensão de cedência mais elevada. A sequência de empilhamento resultou em diferentes tensões de cedência, bem com zonas de rotura. As propriedades dos adesivos tiveram também uma influência significativa na resistência da junta.

-
- Sánchez-Arce et al. [81] No presente artigo foram aplicados o método sem malha NNRPIM e a análise por MEF a juntas de sobreposição simples. Os resultados foram comparados com dados experimentais obtidos através de ensaios em JSS com um adesivo frágil com quatro comprimentos de sobreposição diferentes. A comparação do método NNRIPIM com a análise por MEF revelou uma discrepância de 3% no que diz respeito à previsão de resistência, e uma discrepância de 6% em relação ao pico da tensão de corte, nas curvas de distribuição de tensões. Assim, concluiu-se também que o método NNRIP é uma boa alternativa na previsão de resistência de juntas adesivas.
-
- Machado et al. [82] O objetivo do presente trabalho passa pela validação do MEFX como método de previsão de resistência em JSS com diferentes comprimentos de sobreposição. Foram usados três adesivos com propriedades distintas e testou-se o comportamento das juntas sob esforços de corte e arrancamento, o que permitiu a análise das juntas em diferentes condições. Em relação ao MEFX foram usados diferentes critérios de início de dano, baseados em tensão ou deformação. Foram usadas formas lineares e exponenciais para as leis de propagação do dano. Os resultados obtidos colocam o MEFX como um método aceitável para a previsão de juntas, através dos critérios MAXPS e QUADS.
-
- Mbacké et al. [83] Este artigo tem por objetivo o desenvolver um método computacional, para a previsão do tempo de vida de estruturas com ligações adesivas. Foi selecionada uma formulação baseada em MDC com a inclusão de danos por fadiga. Este modelo foi implementado no software Abaqus® através de elementos finitos e as simulações foram realizadas para o modo I de propagação da fenda. Os dados experimentais com os quais foram comparados validam o estudo efetuado. Assim, conclui-se que o modelo se encontrava bem formulado e tinha sido corretamente implementado, apresentando-se assim como adequado para a previsão do tempo de vida de estruturas com ligações adesivas.
-

2.3 Modificação de juntas de sobreposição simples

No presente capítulo é feita uma abordagem relativa à técnica de modificação de juntas de sobreposição, e o resultado que estas têm na própria junta. Assim, são abordados os efeitos da alteração dos parâmetros geométricos principais, como por exemplo comprimento de sobreposição (L_o), espessura dos aderentes (t_p) e espessura do adesivo (t_a). São também abordadas alterações geométricas realizadas com o propósito específico de aumento de resistência, como por exemplo chanfros e filetes de adesivo. Por fim, são abordadas as temáticas das juntas com ressalto e juntas com curvatura, uma vez que correspondem ao objeto de estudo da presente dissertação.

2.3.1 Efeito dos parâmetros geométricos principais

Com o crescimento das ligações adesivas em toda a indústria, revela-se crucial o conhecimento do comportamento das mesmas. Assim, torna-se relevante o estudo da influência que alguns parâmetros geométricos produzem nas juntas. Desta forma, de seguida, são apresentados os efeitos dos parâmetros principais numa junta adesiva, nomeadamente: comprimento de sobreposição e espessura de adesivo e aderentes.

2.3.1.1 Comprimento de sobreposição

No que diz respeito às juntas de sobreposição simples, a concentração de tensões foca-se principalmente nas extremidades da junta. Esta distribuição de tensões não uniforme ao longo da camada adesiva faz com que a tensão nas extremidades seja superior à tensão média, o que leva à rotura da ligação adesiva para cargas inferiores à suportada pelo adesivo [84].

A resistência da junta aumenta de forma significativa com pequenos aumentos de L_o . Contudo, a relação entre a resistência da junta e L_o não segue uma lei de proporcionalidade direta, uma vez que tende a estabilizar num determinado valor de resistência, como é visível na Figura 19. Assim, a partir de um determinado valor de L_o (valor crítico), a resistência da junta não aumenta de forma relevante, pelo que é apenas adicionado peso desnecessário à ligação [85].

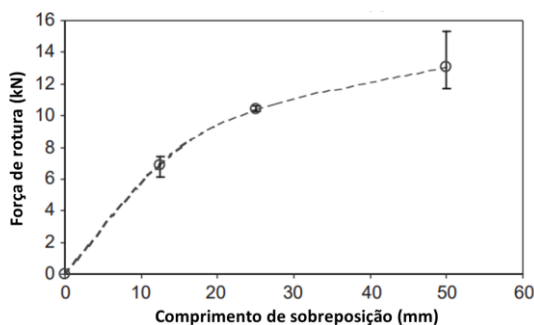


Figura 19 - Efeito de L_o na resistência de uma junta adesiva (adaptado de [86]).

Este fenómeno acontece já que, no caso de L_o inferior ao valor crítico, a carga aplicada é suportada por toda a camada de adesivo, o que confere à ligação uma eficiência mais elevada. Na condição de L_o superior ao valor crítico, a carga a que a ligação é sujeita já não é suportada por toda a camada adesiva. Por norma, nesta situação a camada central de adesivo não se encontra sob esforço numa grande porção de L_o [85].

O aumento da resistência da junta com a modificação do L_o depende também do tipo de adesivo, que pode ser frágil ou dúctil, e do tipo de aderente. Em juntas com adesivos dúcteis e aços de elevada resistência, a resistência da junta e o aumento de L_o é quase proporcional. Isto acontece, uma vez que os adesivos dúcteis podem deformar-se de forma plástica, o que permite uma redistribuição da tensão à medida que a carga aumenta. Neste caso, a resistência da junta é ditada pelas propriedades do adesivo. Para adesivos frágeis, a resistência da junta já não é proporcional ao L_o , pois os valores de resistência da junta estabilizam para L_o inferiores, em comparação com adesivos dúcteis. Esta diferença ocorre pois as tensões encontram-se ainda mais concentradas nas extremidades da ligação. Assim, um aumento da área de sobreposição não influencia a distribuição de tensões [87]. O efeito de L_o na resistência de uma ligação com adesivos dúcteis e frágeis é também descrito na Figura 20

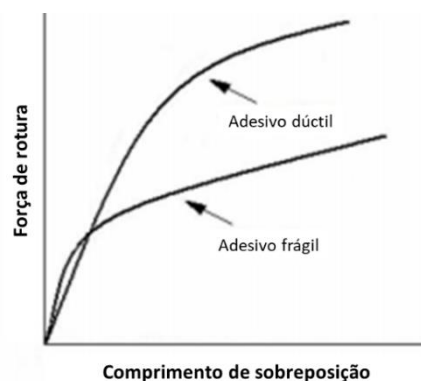


Figura 20 - Força de rotura de uma ligação adesiva em função de L_o , para adesivos dúcteis e frágeis (adaptado de [13]).

2.3.1.2 Espessura do adesivo e aderentes

Os parâmetros t_a e t_p são também parâmetros geométricos relevantes no que toca à resistência de juntas adesivas. Em relação a t_a , o aumento deste parâmetro resulta numa diminuição da resistência da junta. No entanto, esta diminuição é mais acentuada em adesivos frágeis, quando comparados com adesivos dúcteis [88]. Para explicar este efeito, surgiram diversas teorias. Algumas serão abordadas de seguida.

da Silva et al. [89] descobriram que a resistência da junta aumentava com o aumento da tenacidade do adesivo e com a diminuição da espessura do mesmo. Este efeito é explicado através das tensões de arrancamento e corte na interface adesivo-aderente, que aumentam com o aumento de t_a . Assim, se uma falha ocorrer perto desta zona,

naturalmente que juntas com maiores t_a estarão mais sujeitas à rotura da mesma. Adams e Peppiatt [26] atribuem a diminuição da resistência da junta com o aumento de t_a ao facto de uma camada de adesivo mais espessa conter mais defeitos, como micro-fendas e espaços vazios. Outros autores relacionam o efeito que t_a produz na resistência da junta com o momento fletor [90, 91]. Esta relação é também capaz de explicar a redução da resistência da junta com o aumento de t_p . Com o aumento de t_p e t_a ocorre também um aumento do momento fletor, uma vez que a força é aplicada a uma distância maior do eixo médio da junta. Isto, naturalmente, leva a uma diminuição da resistência da junta. Existem ainda algumas situações em que é vantajoso o aumento de t_p , como é o caso de juntas com substratos em aço macio, uma vez que este aumento produz um aumento da rigidez dos mesmos e torna-os menos suscetíveis a deformação plástica. O Aumento de t_p também tende a reduzir os picos de tensões, o que se reflete numa maior resistência da junta [92].

2.3.2 Efeito de alterações geométricas para aumento de resistência

De modo a retirar melhor rendimento das juntas adesivas, estas devem ser projetadas de forma que estejam sujeitas a carregamentos na direção em que oferecem mais resistência, embora nem sempre seja possível aplicar este princípio. Assim, surgem algumas alterações na geometria das juntas que visam aumentar a resistência das mesmas, e conseqüentemente o seu desempenho.

2.3.2.1 Utilização de chanfros

A alteração da geometria dos substratos é um fator que influencia o desempenho das juntas adesivas. Assim, a utilização de chanfros é uma boa opção para reduzir as concentrações de tensão, através da diminuição da rigidez das extremidades da superfície a ligar (Figura 21).

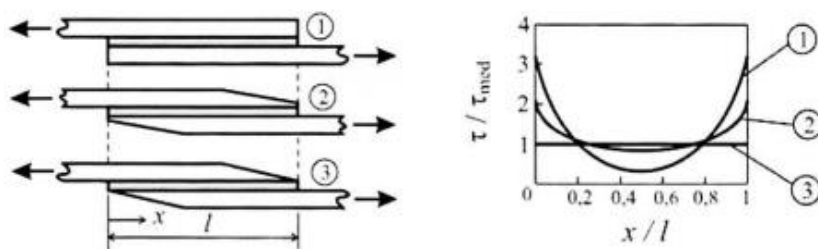


Figura 21 - Distribuição da tensão de corte em JSS (1) e em JSS com chanfro interior (2 e 3) (adaptado de [93]).

A alteração dos substratos dificulta a utilização de métodos analíticos para o estudo da resistência das juntas respetivas. No entanto, diversos autores, como Cherry e Harrison [94], Adams e Peppiatt [95] e Groth e Nordlund [93] desenvolveram equações e métodos numéricos para a otimização destas juntas que lhes permitiram diminuir a tensão de arrancamento e a concentração de tensões. Hart-Smith [96] focou-se na

diminuição dos esforços de arrancamento, de forma que estes não fossem um fator no cálculo da resistência de juntas. A proposta de otimização de junta apresentada no estudo realizado está apresentada na Figura 22.

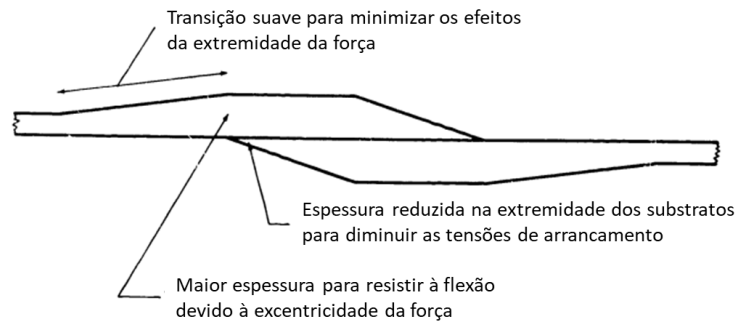
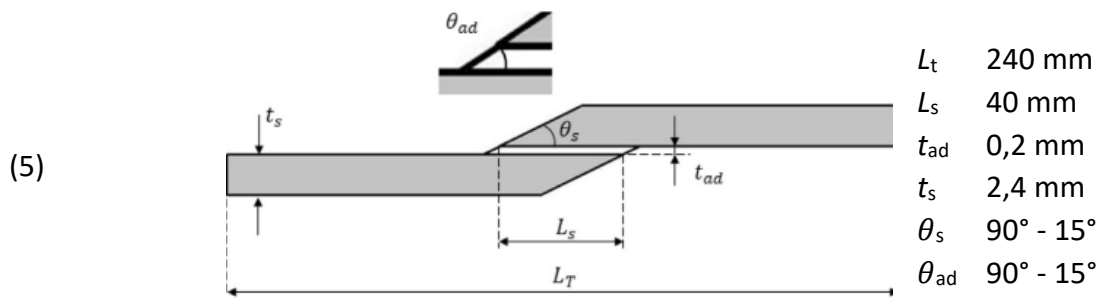


Figura 22 - Sugestão para melhoria da eficiência de um JSS por Hart-Smith (adaptado de [96]).

No trabalho de Moya-Sanz et al. [97] foram estudados os efeitos de diferentes alterações geométricas em JSS. Foram estudadas cinco diferentes configurações, sendo que são apenas três delas são referentes a alterações que envolvem chanfros. Estes modelos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Configurações das JSS estudadas (adaptado de [97]).

Configuração	Modelo numérico	Dimensões
(3)		L_t 240 mm L_s 40 mm t_{ad} 0,2 mm t_s 2,4 mm θ_s 90° - 15° θ_{ad} 90° - 15°
(4)		L_t 240 mm L_s 40 mm t_{ad} 0,2 mm t_s 2,4 mm θ_s 90° - 15° θ_{ad} 90° - 15°



Como se pode observar na Figura 23 (a), com o aumento do ângulo do chanfro há também um aumento da resistência da junta. Este aumento é mais acentuado quando o chanfro envolve o substrato e o adesivo. Na Figura 23 (b) é também visível uma diminuição considerável da tensão de arrancamento com o aumento do ângulo do chanfro. A diminuição da tensão, mais uma vez, é visivelmente mais drástica quando são realizados chanfros nos substratos e adesivo. Por fim, na Figura 23 (c) verificou-se que o deslocamento vertical dos aderentes diminuiu em relação à junta de referência, para qualquer uma das configurações. Observa-se também que, nas configurações onde são realizados chanfros nos aderentes a redução do deslocamento vertical é maior, o que seria expectável, uma vez que os chanfros são realizados com o objetivo de reduzir a excentricidade da carga.

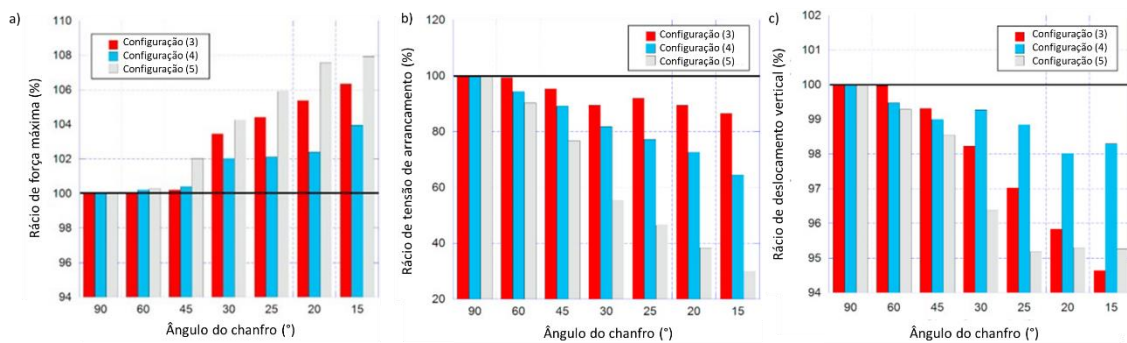


Figura 23 - Rácio de força máxima (a), tensão de arrancamento (b) e deslocamento vertical (c) para uma JSS com chanfro em função do ângulo do chanfro (adaptado de [97]).

2.3.2.2 Utilização de filetes de adesivos

Outra alteração possível à geometria das juntas consiste na adição de filetes de adesivo. Este excesso de adesivo é bastante eficaz na redução dos picos de tensão nas extremidades da zona a ligar, uma vez que a transferência da carga ocorre sobre uma área maior, o que resulta numa distribuição de tensões mais favorável à junta adesiva (Figura 24) [87]. Em estudos desenvolvidos com a intenção de estudar este efeito verificaram-se reduções dos picos de tensão de cerca de 54% [98].

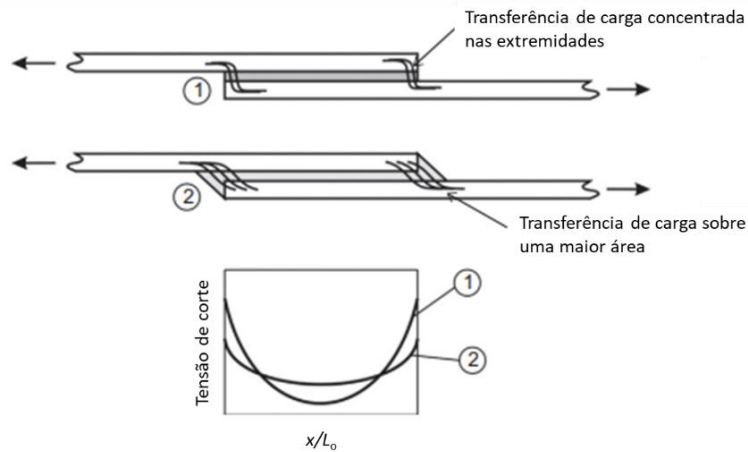


Figura 24 - Transferência de carga e distribuição de tensões em JSS com e sem filetes de adesivo (adaptado de [87]).

A adição de filetes de adesivo não só confere uma transferência da carga mais suave, como também altera os fatores de intensidade da tensão instalada. Como é possível observar na Figura 25, com a adição de um filete completo a 45° observa-se uma uniformização dos fatores de intensidade da tensão.

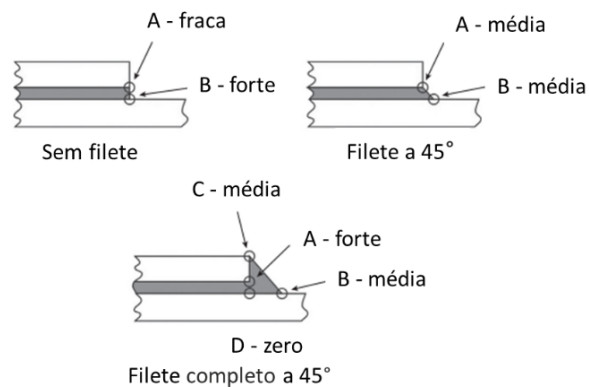


Figura 25 - Fator de intensidade da tensão em JSS com diferentes tipos de filetes de adesivo (adaptado de [87]).

2.3.3 Juntas com ressalto

As juntas com ressalto apresentam-se como uma solução para o problema de flexão nas JSS. Esta configuração de juntas consiste em dobrar os aderentes, como demonstrado na Figura 26. Desta forma, é possível o alinhamento dos aderentes, o que diminui a excentricidade das forças e problemas com flexão, atenuando assim os problemas de arrancamento [99].

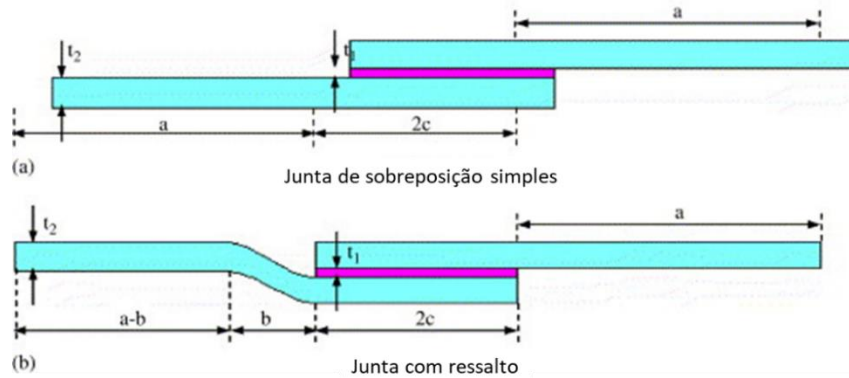


Figura 26 - Geometria de uma JSS e de uma junta com ressalto (adaptado de [99]).

No trabalho de Liu et al. [100] foram estudadas JSS convencionais e juntas com ressalto, ambas com aderentes em material compósito e adesivo Araldite® 2015, onde as juntas foram submetidas a esforços de tração de 1 kN. Este estudo foi realizado com recurso a MEF e MDC. A validação desta técnica foi realizada comparando curvas $P-\delta$ de JSS de modelos 2D com elementos *plane strain* e 3D com elementos sólidos, com dados experimentais já publicados [101]. Estes modelos foram capazes de prever a resistência da junta com um erro de 2%. Para a validação da técnica nas juntas com ressalto foram também comparados resultados de modelos 2D e 3D criados com dados experimentais de trabalhos anteriores, estes também relativos a juntas com ressalto [99]. Foi visível uma boa concordância entre os modelos, ainda que o modelo 3D tenha sobredimensionado a resistência da junta.

A Figura 27 mostra a distribuição das tensões de arrancamento (a) e corte (b) ao longo da camada de adesivo para as JSS e juntas com ressalto. É possível observar que as juntas com ressalto apresentam tensões máximas mais elevadas, nomeadamente na extremidade onde existe curvatura dos aderentes.

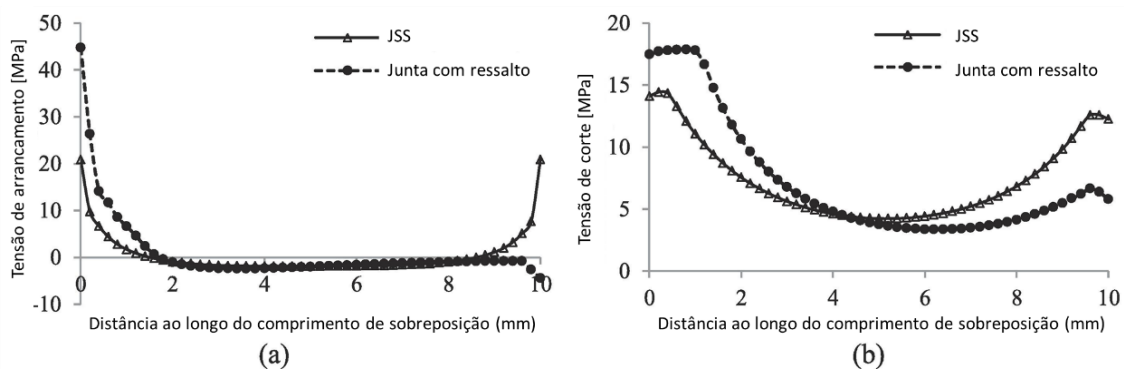


Figura 27 - Comparação da tensão de arrancamento (a) e tensão de corte (b) ao longo da camada de adesivo de uma JSS e uma junta com ressalto (adaptado de [100]).

A curvatura local dos aderentes desempenha um papel importante na distribuição das tensões. Assim, as tensões de corte e arrancamento são mais elevadas perto desta

zona devido à descontinuidade geométrica, e mais baixas na extremidade oposta da junta. Devido à curvatura dos aderentes, as elevadas tensões irão causar deflexão lateral na zona curva, o que representa uma possível região de iniciação de dano. Este efeito foi também estudado no trabalho realizado por Taib et al. [99]. Na Figura 28 são apresentadas as tensões uniaxiais (a), de arrancamento (b) e corte (c) de uma junta com ressalto, perto da zona onde ocorre a curvatura dos aderentes, e sujeita a um carregamento à tração de 1 kN. Pela análise da distribuição de tensões verifica-se que a interface inferior é uma região crítica e que representa uma zona de possível iniciação de falhas. Por outro lado, a interface superior apresenta tensões muito inferiores e não representa uma zona de iniciação de falhas muito provável.

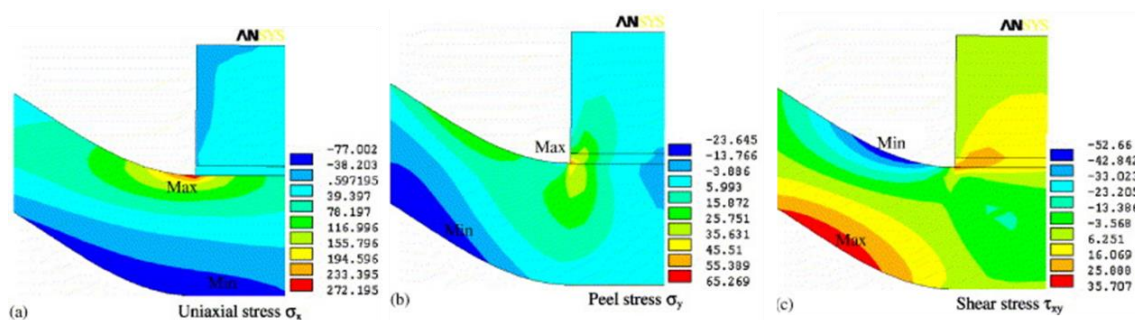


Figura 28 - Tensão uniaxial (a), tensão de arrancamento (b) e tensão de corte (c) numa junta com ressalto (adaptado de [99]).

2.3.4 Juntas com curvatura

Nesta secção irá ser abordada a temática das juntas com curvatura. Esta é considerada uma etapa essencial, uma vez que se trata do tema central da presente dissertação. O estudo deste tipo de juntas é ainda recente, pelo que existe pouca literatura disponível relativa a este tópico. Assim, este capítulo torna-se ainda mais importante, pois permite uma melhor compreensão das juntas com curvatura a diversos níveis, como possíveis aplicações e desafios na modelação numérica das mesmas. Por fim, é ainda realizado um estado-da-arte, onde é feita uma compilação de trabalhos recentes, considerados relevantes nesta área.

2.3.4.1 Considerações gerais

Juntas com curvatura são outra possível modificação das JSS. Ao contrário das juntas com ressalto, neste caso, os dois aderentes são curvados, de maneira que toda a junta possua uma determinada curvatura. A comparação entre uma JSS convencional e uma JSS com curvatura é feita na Figura 29.

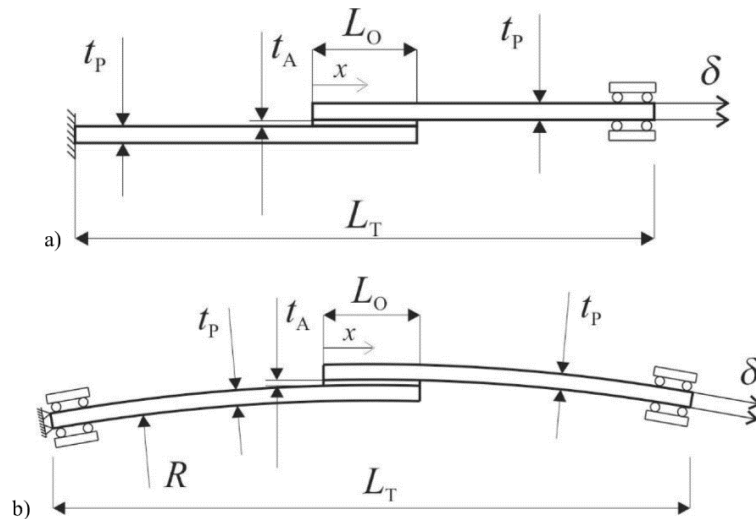


Figura 29 - Geometria de uma JSS sem curvatura (a) e com curvatura (b) [102].

O estudo de juntas adesivas com curvatura é ainda um tópico recente, pelo que a informação disponível a nível académico deste tipo de juntas é relativamente reduzido. No entanto, alguns trabalhos já realizados permitem conhecer algumas características associadas à curvatura de ligações adesivas. Ascione e Mancusi [103] realizaram um estudo numérico extenso para prever o comportamento de juntas adesivas com curvatura, sujeitas a dois carregamentos de tração, 15 kN (longe da rotura) e 33 kN (perto da rotura). Este modelo, criado com recurso ao MEF, prevê a influência do raio de curvatura (R), assim como a deformabilidade em corte, e os efeitos do acoplamento entre o comportamento axial e de corte. Este estudo foi realizado em juntas com aderentes de betão armado e plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), usados como suporte e reforço, respetivamente. A geometria da junta estudada encontra-se na Figura 30. Conclui-se que R tem uma influência cada vez menor, à medida que a carga aplicada aumenta. Na rotura da junta, R não mostrou qualquer influência no comportamento da mesma.

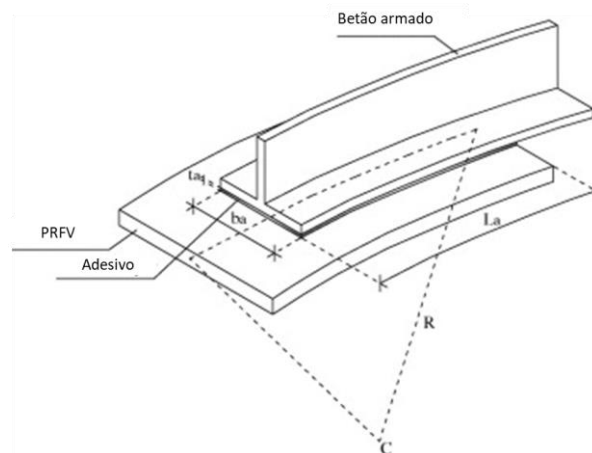


Figura 30 - Geometria da junta com curvatura (adaptado de [103]).

Ascione e Mancusi [104] publicaram um segundo trabalho em juntas com a mesma geometria da Figura 30, mas sujeitas a carregamentos de tração e de compressão de dois tipos, 15 kN (longe da rotura) e 30 kN (perto da rotura). Enquanto no carregamento de tração não se observou qualquer influência, o mesmo não se verificou no carregamento de compressão. Neste caso, observou-se que uma diminuição de R tem uma influência positiva no comportamento da junta. Este efeito deixa de ser visível na rotura da junta.

2.3.4.2 Aplicações possíveis

O uso de juntas adesivas com curvatura, está maioritariamente associado à indústria da construção civil e aeronáutica. Na construção civil, o uso de ligações adesivas estava principalmente associado ao reforço de estruturas pré-existentes de betão armado ou alvenaria, com PRF. No entanto, com a crescente utilização de materiais compósitos nesta indústria, nomeadamente em elementos estruturais como coberturas e pontes pedestres, torna-se assim importante o uso deste tipo de juntas, uma vez que todas estas estruturas apresentam elementos curvos [103]. Na Figura 31 é apresentado um exemplo do uso de materiais compósitos curvos na indústria da construção civil, neste caso uma ponte pedonal [105].



Figura 31 - Ponte construída com elementos compósitos curvos [106].

O uso de ligações adesivas com curvatura na indústria aeronáutica está também associado à crescente utilização de materiais compósitos como elementos estruturais. Normalmente, painéis curvos em plástico reforçado com fibras de carbono (PRFC) são unidos para produzir várias peças de fuselagem. O uso de ligações adesivas é aconselhável neste tipo de materiais, já que este tipo de ligação é de simples aplicação, o que resulta numa diminuição nos custos e tempo de fabrico das juntas [100]. Na Figura 32 é dado um exemplo de juntas com curvatura usadas no fabrico da fuselagem de um avião. Verifica-se assim que juntas curvas com ressalto são bastante utilizadas no fabrico destes componentes. Estes tipos de elementos são submetidos a condições de carga elevadas, e a escolha de juntas adesivas para o fabrico dos mesmo é indicativo da competência deste tipo de ligações [107].

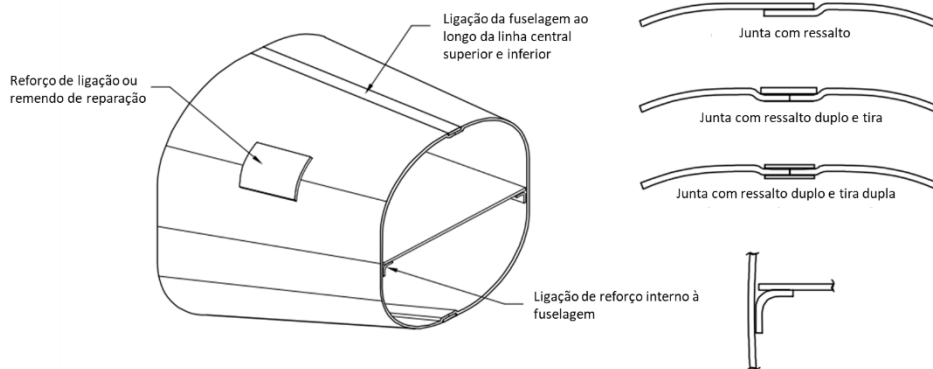


Figura 32 - Ligações adesivas típicas na fuselagem de pequenos aviões (adaptado de [107]).

O uso de juntas curvas está também presente na reparação de diversos tipos de condutas, como oleodutos e gasodutos. A reparação destas tubagens é normalmente feita através da troca de toda a tubagem ou do segmento afetado, no entanto este procedimento revela-se bastante moroso e dispendioso [108]. Assim, o uso de remendos para a reparação das zonas afetadas torna-se uma técnica apelativa. Neste caso, são usadas ligações adesivas ou soldadas para a aplicação destes remendos, no entanto, do processo de soldadura resultam tensões residuais ou distorções devido às mudanças bruscas de temperatura durante o processo de colagem ou possíveis explosões de produtos petrolíferos residuais [109]. Desta forma, o uso de adesivos para a reparação destas tubagens torna-se um método bastante vantajoso, uma vez que para além de não apresentar os problemas relacionados com a soldadura, permite ainda o uso de outros tipos de materiais na reparação. Então, o uso de ligações adesivas na reparação de tubagens tem vindo a tornar-se mais comum. Já foram realizados alguns estudos no sentido de melhor perceber o comportamento destes remendos quando sujeitos a pressões interiores, que revelaram que remendos de material compósito [110] ou aço galvanizado [109] são capazes de suportar pressões muito superiores às pressões a que este tipo de tubagem é normalmente submetida.

2.3.4.3 Modelação numérica

A modelação numérica de juntas com curvatura, devido às diferenças geométricas com as JSS convencionais, apresenta algumas dificuldades, especialmente no que diz respeito à simulação de condições de carregamento e, no caso específico da modelação de juntas em material compósito, a orientação das fibras. Enquanto na modelação de uma JSS sob um carregamento de tração, esta se encontra encastrada numa das extremidades da junta e, na extremidade oposta, sujeitas a uma restrição vertical e um determinado deslocamento (exemplo (a), Figura 33), estas condições não espelham um carregamento correto em juntas curvas. Desta forma, em juntas com curvatura, o objetivo passa por associar a curvatura das juntas às condições de carregamento. Ou seja, o deslocamento imposto deve ser tangente ao eixo de

curvatura do substrato (exemplo (b), Figura 33) [102]. Relativamente à orientação das fibras, na modelação de juntas com curvatura, a orientação destas deve também acompanhar a curvatura dos substratos, ao contrário de juntas convencionais, onde as fibras apresentam a mesma orientação ao longo de toda a junta.

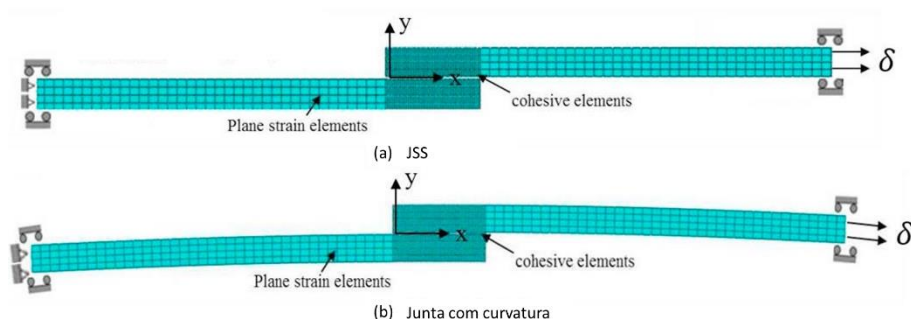


Figura 33 - Condições fronteira em JSS (a) e juntas com curvatura (b) (adaptado de [100]).

2.3.4.4 Estado-da-arte de juntas com curvatura

De seguida, são apresentados os dois únicos trabalhos realizados recentemente, e que envolvem o estudo de juntas com curvatura tal como são estudadas na presente dissertação. Em anos recentes foram também desenvolvidos alguns trabalhos que estudam o efeito da curvatura em juntas adesivas [111-113], no entanto é estudado um tipo de curvatura diferente, da qual é exemplo a Figura 34. Assim, estes estudos não foram incluídos no estado-da-arte apresentado na Tabela 4.

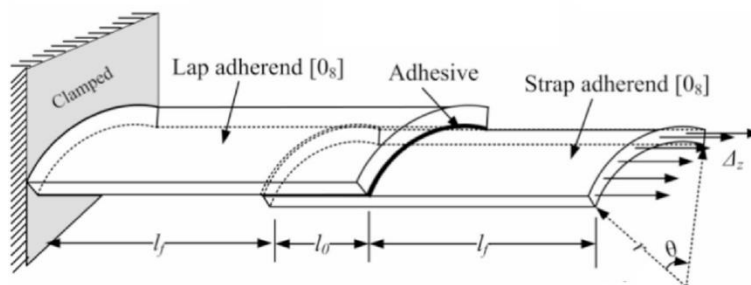


Figura 34 - Exemplo de geometria estudada em juntas com curvatura (adaptado de [111]).

Tabela 4 - Estado-da-arte - juntas com curvatura.

Artigo	Descrição
Liu et al. [100]	O presente artigo apresenta um estudo relativo aos efeitos provocados pela curvatura e extremidades livres na resistência de JSS em material compósito, que representam de forma mais realista a fuselagem de aviões. Esta análise foi feita através de MEF em conjunto com MDC e a validação da técnica foi feita com recurso a

JSS, mostrando resultados positivos. Verificou-se que o uso de arestas livres se apresenta como uma alternativa conservadora na análise numérica de juntas com arestas restringidas. Concluiu-se que para um R superior a 1000 mm o efeito produzido na carga máxima é reduzido, embora curvaturas maiores resultem em deslocamento sob tensão uniaxial maiores. Para R de 1000 mm verificou-se também que a tensão de arrancamento, na extremidade da zona de colagem passa de tração para compressão. Por fim, observou-se que juntas com ressalto apresentam tensões de arrancamento inferiores na extremidade direita de L_0 , no entanto apresenta tensões de arrancamento superiores na extremidade oposta, quando comparada com JSS. Conclui-se assim que a extremidade esquerda de L_0 em uma junta com ressalto é mais propícia a falhar, quando comparada com a mesma zona em JSS.

Correia et al. [102]

O presente artigo compara o desempenho dos seguintes adesivos: Araldite® AV138 (frágil), Araldite® 2015 (moderadamente dúctil) e Sikaforce® 7888 (dúctil) em JSS com curvatura, com substratos em PRFC. Aqui são considerados os efeitos dos seguintes parâmetros geométricos: L_0 , t_p e R . Este estudo foi realizado com recurso a MEF e MDC e focou-se na análise das tensões na camada adesiva, resistência da junta e energia dissipada na rotura. A validação da técnica numérica foi feita com recurso a JSS, mostrando resultados positivos. O estudo numérico das JSS curvadas revelou um aumento significativo na carga máxima suportada pela junta e da energia dissipada, quando aumentado o L_0 , para os dois adesivos dúcteis. Para estes adesivos um aumento de t_p resultou na diminuição da carga máxima. Por outro lado, no adesivo frágil estes parâmetros revelaram pouco influenciar o comportamento da junta. Concluiu-se também que, R menores (inferior a 2000 mm) tem uma influência negativa considerável na distribuição de tensões e capacidade de carga das juntas.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Abordagem numérica para modelação de juntas curvas
- 3.2 Modelação numérica de juntas curvas

3 DESENVOLVIMENTO

Após a realização de uma revisão bibliográfica, que abordou temas considerados fulcrais para um melhor entendimento desta dissertação, procede-se assim ao desenvolvimento da mesma.

O presente capítulo divide-se, essencialmente, em três partes. Uma primeira onde é descrita a metodologia utilizada para a realização dos estudos numéricos realizados no *software* Abaqus® (Abaqus 6,17, Dassault Systèmes. USA). Na segunda parte deste capítulo é realizada uma validação da técnica numérica utilizada. Para isto, recorre-se a dados numéricos e experimentais já existentes, relativos à resistência de JSS com os adesivos em análise (Sikaforce® 7752, Araldite® 2015 e Araldite® AV138). Assim, ao verificar-se a precisão dos valores obtidos numericamente, através do MEF, é possível aplicar este método ao estudo de juntas curvadas. Após a validação do método a utilizar, na terceira, e última parte deste capítulo é apresentado o estudo realizado com juntas de ressalto curvadas, e os efeitos que R , L_o e t_p produzem a nível de tensões, dano, modos de rotura, resistência e energia dissipada.

3.1 Abordagem numérica para modelação de juntas curvas

Em síntese, neste subcapítulo é focado na construção dos modelos numéricos para a realização do estudo em juntas curvas. Inicialmente é explicado o processo de criação da geometria das juntas no *software* Abaqus®, onde é explicado o porquê de algumas decisões tomadas na criação dos mesmos. Posto isto, é feita uma descrição detalhada das condições desta análise. Neste momento, o modelo é caracterizado em relação ao tipo de elementos atribuídos a cada parte do modelo, condições de carga e malha criada. De seguida, é feita uma descrição dos materiais usados neste estudo, bem como na validação do mesmo, apresentando também as suas propriedades mais relevantes sob a forma de tabela. Por fim, é feita uma breve análise sobre MDC, dando especial atenção as leis coesivas triangulares.

3.1.1 Geometrias analisadas

O primeiro fase deste processo passou pelo desenho da junta. Inicialmente construiu-se o exterior da junta, e de seguida foram criadas as partições necessárias à definição dos aderentes e do adesivo. Na Figura 35 é apresentado o desenho exterior do modelo criado, bem como as partições referidas anteriormente.

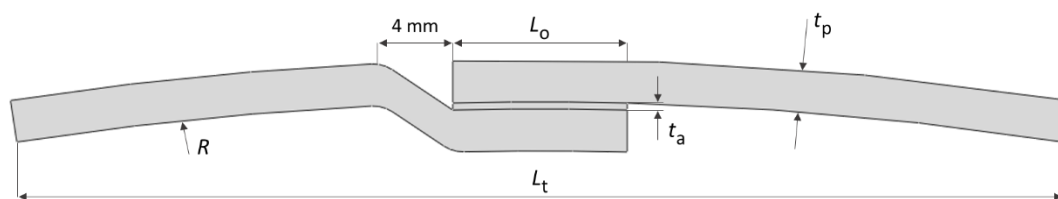


Figura 35 - Geometria de uma junta curva com ressalto genérica e respectivas dimensões.

Para este estudo foram criados diversos modelos. Os valores de espessura do adesivo (t_a) de 0,2 mm e comprimento total da junta (L_t) de 200 mm foram valores comuns a todas as juntas criadas. O valor atribuído ao comprimento do ressalto da junta (4 mm) foi também igual em todos os modelos, e foi escolhido tendo em conta trabalhos anteriores [99, 100] onde também foram estudadas juntas com ressalto. No que diz respeito às restantes dimensões, foram usados diferentes valores de t_p (1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm), L_o (10 mm até 80 mm, com incrementos de 10 mm) e R (1000 mm, 2000 mm e 3000 mm). Isto resultou num total de 72 modelos diferentes.

Também nos modelos criados, foi adicionada uma camada intralaminar a todo o comprimento dos aderentes, de espessura mínima (0,2 mm), de modo a simular a rotura intralaminar do compósito, que por vezes ocorre durante os ensaios deste tipo de juntas. A adição deste componente aos modelos obrigou a um esforço computacional maior, no entanto achou-se pertinente a adição do mesmo. A camada intralaminar adicionada é visível na Figura 36, destacada a vermelho.

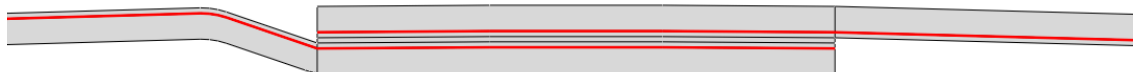


Figura 36 - Camada intralaminar criada nos modelos em estudo.

Foram ainda criadas duas partições nas extremidades da junta, que serão explicadas mais detalhadamente no subcapítulo 3.1.2, bem como algumas linhas verticais ao longo dos modelos, não com o intuito de definir aderentes ou adesivos, mas sim para que fosse possível obter-se uma malha mais uniforme. Estas linhas encontram-se destacadas a vermelho na Figura 37.

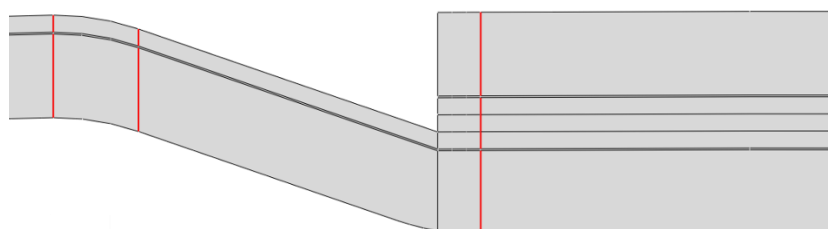


Figura 37 - Linhas adicionadas para a uniformização da malha.

O resultado da adição destas linhas é de facto notável e encontra-se destacado na Figura 38. Enquanto em (a) se observa uma malha bastante disforme, principalmente ao longo do comprimento de sobreposição e na zona em que se dá o ressalto da junta, em (b) o desalinhamento da malha é mínimo, e ocorre apenas no início do comprimento de sobreposição.

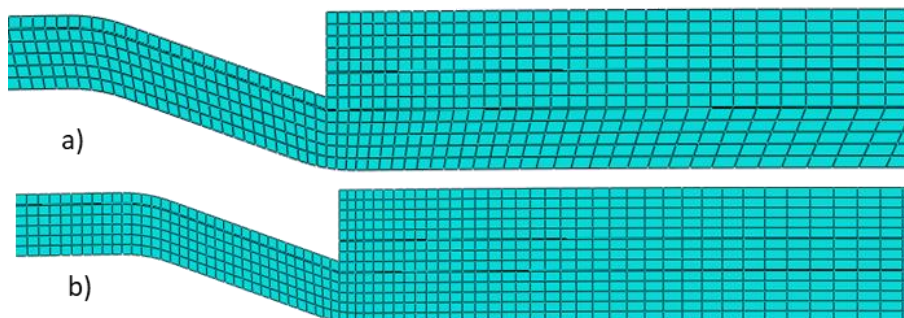


Figura 38 - Diferença entre a malha não uniformizada (a) e a malha uniformizada (b).

3.1.2 Condições da análise numérica

Inicialmente foi atribuída a cada partição criada, a sua secção correspondente. Para isso, foram criadas secções do tipo sólido e do tipo coesivo. Estas secções estão associadas às propriedades mecânicas dos materiais, por isso foram criadas três secções, que simulam os aderentes, a camada adesiva e a camada intralaminar, tal como é apresentado na Figura 39. As juntas foram modeladas em duas dimensões, considerando um estado plano de deformação, de forma a reduzir os custos computacionais. Os aderentes foram modelados com elementos sólidos homogéneos e a camada adesiva e camada intralaminar foram modeladas com elementos coesivos.

Name	Type
Aderente	Solid, Homogeneous
Adesivo	Cohesive
Camada intralaminar	Cohesive

Figura 39 - Caracterização do tipo de elementos usados na construção dos modelos.

Uma vez que o objetivo desta dissertação passa pelo estudo do comportamento de juntas com curvatura sujeitas a pressão interna, consideraram-se as condições fronteira que melhor descrevem este fenómeno. Primeiro foi criado uma extensão dos provetes, em cada extremidade, de comprimento desprezável (1 mm). De seguida, tendo em conta a geometria curva das juntas, foi criado um novo sistema de coordenadas em cada uma das extensões. Por fim, os deslocamentos dos extremos da junta foram restringidos na direção tangencial, permitindo a expansão a junta, causada

pela pressão interna, como indicado no pormenor (a) da Figura 40. Posteriormente, foi atribuída uma pressão de 1 MPa, capaz de causar rotura em todos os modelos estudados. Esta carga foi aplicada perpendicularmente a todas as faces internas da junta, incluindo a zona destacada no pormenor (b) da Figura 40.

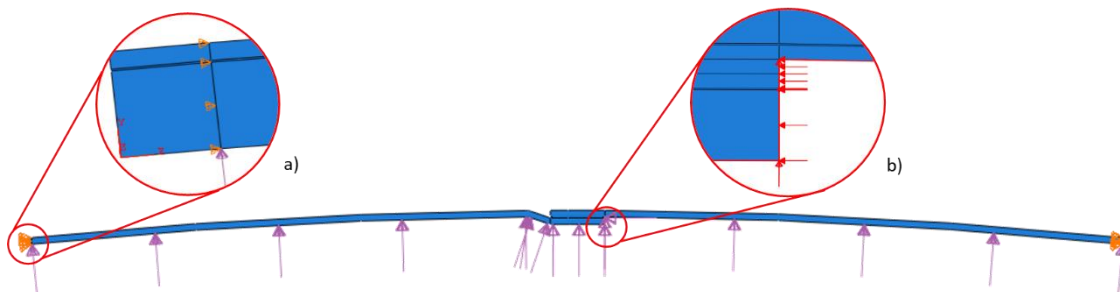


Figura 40 - Representação das condições de carga simuladas, com pormenor nos apoios do modelo (a) e na carga aplicada horizontalmente (b).

Definidas as condições de carga, procedeu-se à criação de uma malha em todo o modelo. O primeiro passo deste processo passa pela escolha do tipo de malha e forma dos elementos, através do *Mesh Control* do Abaqus®. Assim, definiu-se que todos os elementos da malha teriam a forma de quadriláteros. Na Figura 41 é possível ver o tipo de malha atribuída aos aderentes, neste caso do tipo *Structured* (estruturada).

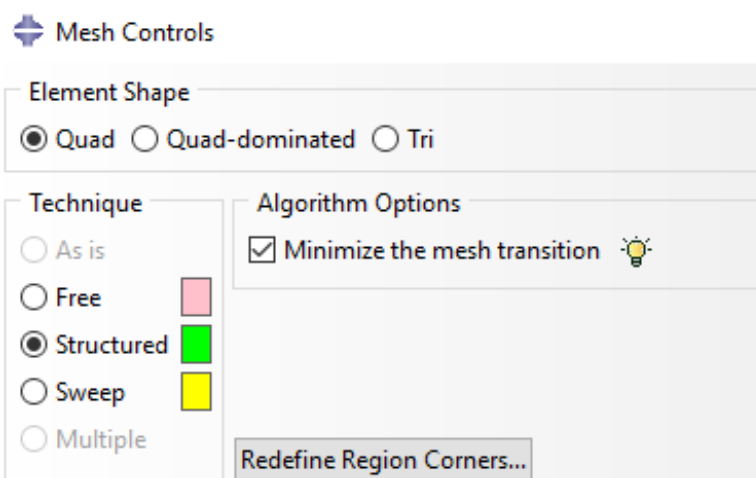


Figura 41 - Escolha do tipo de malha para os aderentes.

A malha do tipo *Sweep* é a malha a atribuir quando estão a ser usados elementos coesivos. Assim, esta foi atribuída à camada adesiva e à camada intralaminar dos aderentes. Adicionalmente, devido ao tipo de malha atribuído foi também necessário atribuir a orientação dos elementos, através do comando *Redefine Sweep Path*. Como é apresentado na Figura 42, a orientação deve ser sempre na direção vertical, ligando assim o nó da interface de baixo, ao nó da interface de cima, ou vice-versa.

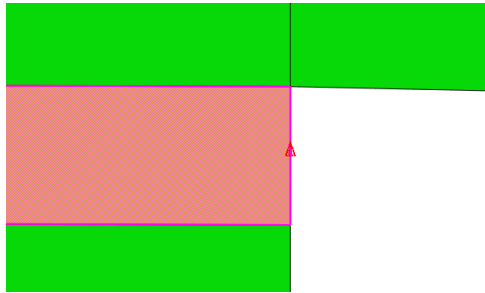


Figura 42 - Definição da orientação dos elementos coesivos.

O tipo de elemento foi atribuído através do comando *Assign Element Type*. A Figura 43 apresenta o menu onde foi definido o tipo de elemento dos aderentes, neste caso *Plane Strain* (estado plano de deformação). Para a obtenção de um modelo mais fiel, excluiu-se também a opção de redução integrada, que está selecionada, por defeito, neste tipo de elementos. Desta forma, foi produzido pelo *software*, um elemento com o código CPE4. Isto representa um elemento *Plane Strain* com quatro nós.

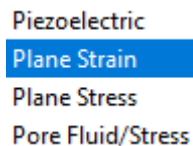


Figura 43 - Tipo de elemento atribuído às partições relativas aos aderentes.

Na Figura 44 é possível observar o tipo de elemento atribuído à camada de adesivo e à camada intralaminar dos aderentes. Neste caso, foi atribuído um elemento do tipo coesivo, que resultou no código COH2D4. Isto representa um elemento coesivo de duas dimensões e quatro nós.

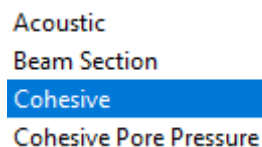


Figura 44 - Tipo de elemento atribuído à camada de adesivo e camada intralaminar dos aderentes.

Após a definição do tipo de elemento e da forma dos mesmos, passou-se então à criação da malha. Nesta etapa é importante conjugar de forma sensata o refinamento da malha e o esforço computacional criado pela mesma. Isto porque, uma malha demasiado refinada pode resultar num esforço computacional demasiado elevado, para o objetivo a atingir. A seleção inicial do tamanho de elementos foi baseada em trabalhos anteriores focados em JSS [102, 114], porém aplicáveis a este estudo. De notar, que quando comparadas as mesmas zonas, na sua maioria, a dimensão dos elementos não varia com o tipo de junta, exceto no que diz respeito a t_p . No entanto, esta diferença é indicada e explicada.

Na zona de sobreposição foi usada a funcionalidade *double bias* para criar elementos maiores no centro da sobreposição, e mais pequenos nas extremidades, variando entre 0,2 mm e 0,5 mm, este efeito é visível na Figura 45.

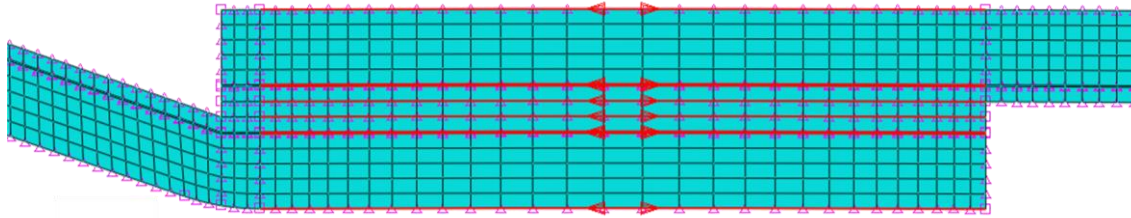


Figura 45 - Função *double bias*, utilizada na zona de sobreposição.

Em relação à espessura dos substratos, inicialmente foi usada a funcionalidade *single bias* para criar um refinamento crescente na direção do adesivo, com o tamanho dos elementos compreendido entre 0,2 mm e 0,7 mm para os modelos com t_p de 3,6 mm, e entre 0,2 mm e 0,5 mm, tanto nos aderentes t_p de 1,2 mm como de 2,4 mm. No entanto, este aspeto revelou-se problemático, uma vez que em alguns modelos de 1,2 mm ocorria uma distorção exagerada, o que interrompia a simulação. Assim, nos modelos com esta t_p , optou-se por criar um refinamento constante ao longo da espessura, com o tamanho dos elementos de 0,2 mm. A diferença entre os dois refinamentos está evidenciada na Figura 46.

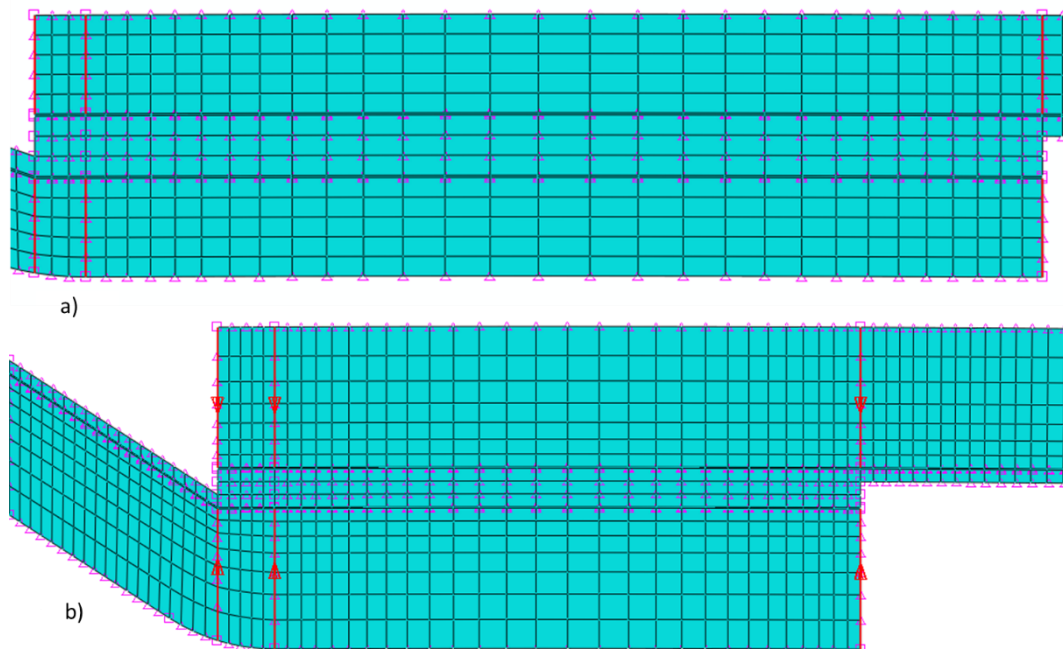


Figura 46 - Comparação entre o tamanho dos elementos em juntas com espessura de 1,2 mm (a) e espessura de 2,4 mm (b).

A malha definida para o comprimento dos aderentes foi criada através do comando *single bias*, e apresenta uma tendência crescente na direção do adesivo. O tamanho dos elementos está compreendido entre 0,2 mm e 2 mm, como visível na Figura 47.

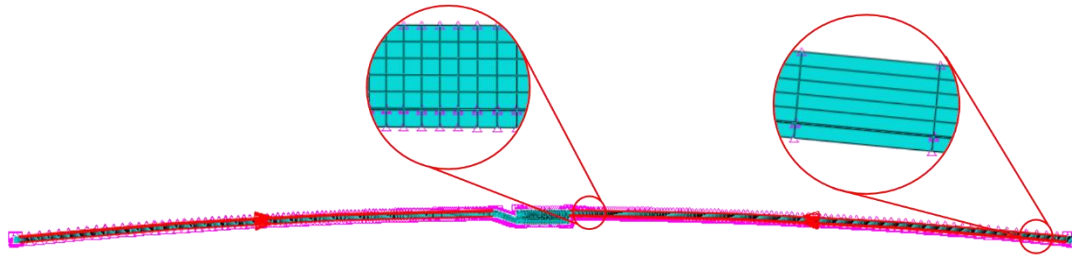


Figura 47 - Refinamento da malha ao comprimento dos aderentes.

Uma vez que a camada intralaminar, criada nos substratos, e a camada de adesivo são elementos coesivos, estes devem ser compostos por apenas um elemento, no que diz respeito à altura (Figura 48).

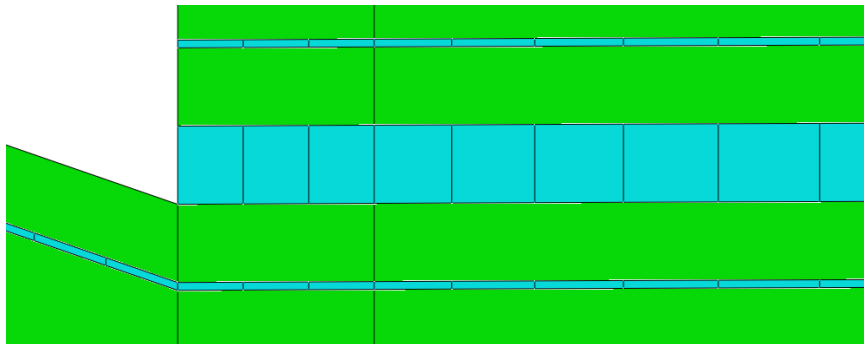


Figura 48 - Malha criada nos elementos coesivos.

Os elementos realçados na Figura 49 apresentam todos a mesma dimensão, neste caso, 0,2 mm. Foi escolhida esta dimensão, de forma a uniformizar a malha, uma vez que os elementos em contacto com estes apresentam a mesma dimensão. Nos modelos com t_p de 2,4 mm e 3,6 mm, os elementos nesta zona têm uma dimensão de 0,1 mm, uma vez que com dimensões maiores surgiram problemas de distorções excessivas durante as simulações.

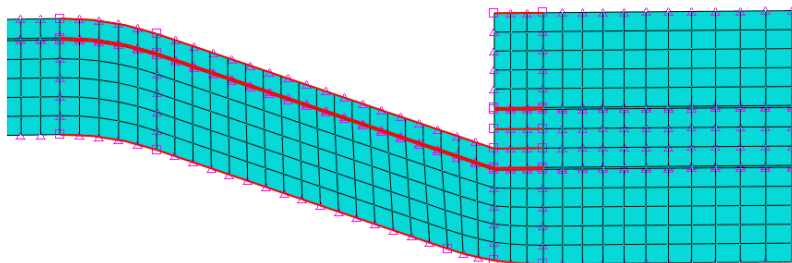


Figura 49 - Dimensão dos elementos com objetivo de uniformizar a malha.

Por fim, foi definido o tamanho dos elementos das extremidades criadas para a caracterizar as condições fronteira. Como estes estes elementos não são relevantes para a simulação, e para que não aumentassem o esforço computacional, foi definido que estes seriam constituídos por apenas um elemento ao longo do seu comprimento, como é visível na Figura 50.

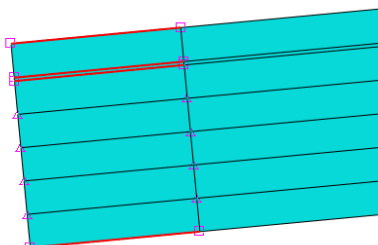


Figura 50 - Tamanho escolhido para os elementos das extremidades.

As malhas para os modelos de análise de tensões são extremamente refinadas, para que seja possível obter resultados precisos, tal precisão não é necessária para os modelos de análise de resistência, pelo que as malhas destes modelos são mais grosseiras. Assim, foram também criados modelos para a análise de tensões. Estes diferem nas propriedades dos materiais utilizadas, tipo de elementos e densidade da malha. Neste caso, toda a junta é modelada com elementos sólidos homogêneos, e os materiais são apenas modelados através do E e ν . No que diz respeito à densidade da malha, considerou-se que os elementos das malhas dos modelos de análise de tensões seriam 10 vezes mais pequenos que os modelos para análise de resistência.

3.1.3 Materiais

Para a realização deste estudo numérico e da sua validação foram usados três adesivos diferentes, são eles Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Para o material dos aderentes foi usada a liga de alumínio AW6082 T651 e PRFC. Enquanto os adesivos e o PRFC foram usados na validação e no estudo numérico, a liga de alumínio apenas foi usada na validação do estudo numérico.

3.1.3.1 Liga de alumínio AW6082 T651

A liga de alumínio AW6082 T651 apresenta boas propriedades mecânicas e é obtida através de envelhecimento artificial a 180°C [115]. Este material é usado em variadas aplicações estruturais, seja em forma de laminados ou formas extrudidas. Esta liga foi caracterizada em trabalhos anteriores [116] e as suas propriedades encontram-se na Tabela 5. Na Figura 51 são apresentadas as curvas σ - ϵ experimentais e uma aproximação numérica.

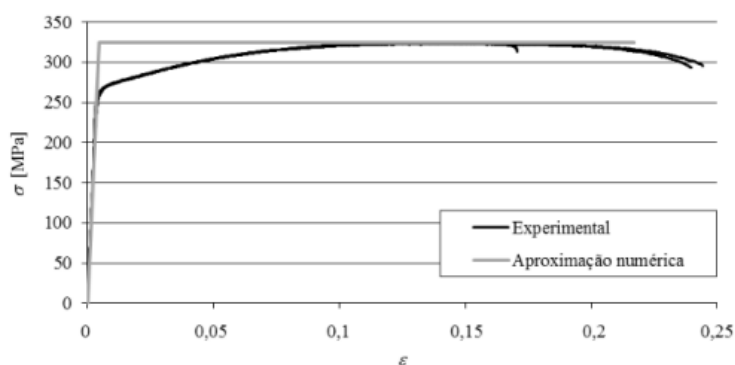


Figura 51 - Curvas σ - ϵ experimentais da liga de alumínio AW6082 T651 e respectiva aproximação numérica [116].

Tabela 5 - Propriedades da liga de alumínio AW6082 T651 [116].

σ_f [MPa]	E [GPa]	σ_y [MPa]	ϵ_f [%]	ν
$324 \pm 0,16$	$70,07 \pm 0,83$	$261,67 \pm 7,65$	$21,70 \pm 4,24$	$0,3^a$

^a Valor do fabricante

3.1.3.2 PRFC

O material usado para os aderentes corresponde a um TEXIPREG HS 160 RM. As suas propriedades mecânicas foram obtidas experimentalmente em estudos anteriores [117] e encontram-se descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades elásticas ortotrópicas do PRFC (adaptado de [117]).

E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E_3 [MPa]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	G_{13} [MPa]	G_{23} [MPa]
109000	8819	8819	0,342	0,342	0,38	4315	4315	3200

3.1.3.3 Adesivos

Para o estudo em questão foram comparados os seguintes adesivos: Araldite® 2015 (adesivo epóxico dúctil), Araldite® AV138 (adesivo epóxico frágil) e Sikaforce® 7752 (adesivo poliuretano estrutural, com resistência moderada e elevada ductilidade). Uma descrição mais detalhada de cada um dos adesivos, bem como as propriedades de cada um é apresentada de seguida.

3.1.3.3.1 Araldite® AV138

O Araldite® AV138 com o endurecedor HV 998 é um adesivo epóxico bi-componente, que apresenta uma excelente resistência química e mecânica, e é um adesivo frágil. A combinação dos componentes é feita numa razão de 100g/40g de resina e endurecedor, respetivamente. A aplicação deste adesivo é feita de forma manual

recorrendo a uma espátula. A caracterização deste adesivo foi feita em trabalhos anteriores, de forma experimental, usando ensaios de corte e tração, através dos quais foram obtidas as suas propriedades mecânicas [118]. As curvas σ - ε apresentadas na Figura 52 espelham o comportamento frágil deste adesivo. As suas propriedades mecânicas encontram-se descritas na Tabela 7.

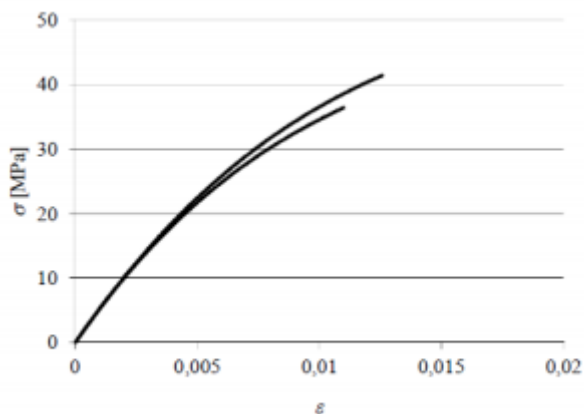


Figura 52 - Curvas σ - ε de provetes maciços do Araldite® AV138 [101].

Tabela 7 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [118].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	$4,89 \pm 0,81$
Coeficiente de Poisson, ν	$0,35^a$
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$36,49 \pm 2,47$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$39,45 \pm 3,18$
Deformação de rotura, ε_f [%]	$1,21 \pm 0,10$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$1,56 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$25,1 \pm 0,33$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$30,2 \pm 0,40$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$7,8 \pm 0,7$
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	$0,20^b$
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	$0,37^b$

^a Valor do fabricante.

^b Valor estimado na referência [118].

3.1.3.3.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 é um adesivo estrutural bi-componente, de ductilidade moderada. Por ser um adesivo dúctil, permite a redistribuição de tensões nas regiões de maior concentração de tensão (tipicamente nas extremidades da junta), que ocorrem devido à existência de assimetria da junta e a deformações distintas dos aderentes ao longo

do comprimento de sobreposição [101]. Este adesivo é fornecido em cartuchos, possui dois componentes e a sua cura é efetuada à temperatura ambiente. A sua razão de aplicação é de 50g/50g, e a mistura realizada através de um bico e apicada com uma pistola de aplicação [119]. O adesivo Araldite® 2015 foi caracterizado de forma experimental em trabalhos anteriores através de ensaios de tração e corte, dos quais as propriedades mecânicas foram obtidas [119]. O adesivo apresenta um comportamento dúctil, o qual pode ser observado nas curvas σ - ε apresentadas na Figura 53. Também as suas propriedades mecânicas se encontram listadas na Tabela 8.

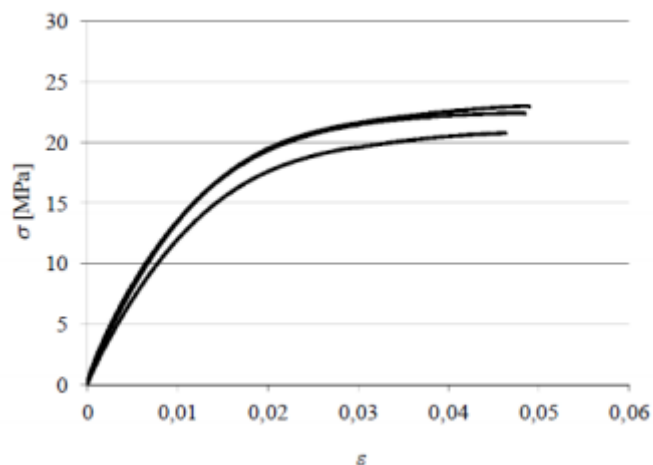


Figura 53 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [101].

Tabela 8 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [101].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coeficiente de Poisson, ν	$0,33^a$
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, 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]	$14,6 \pm 1,3$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$17,9 \pm 1,8$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$43,9 \pm 3,4$
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.

3.1.3.3.3 Sikaforce® 7752

O Sikaforce® 7752 é um adesivo à base de poliuretano, bi-componente, constituído por resina e um endurecedor (FRW L60). A razão de mistura é de 1g/5g de resina e endurecedor, respetivamente. Este apresenta uma menor resistência à tração e ao corte, no entanto apresenta uma maior ductilidade que os adesivos anteriormente descritos. A caracterização do adesivo Sikaforce 7752 foi feita de forma experimental em trabalhos anteriores, recorrendo a ensaios de tração e corte, através dos quais foram obtidas as suas propriedades mecânicas [120]. Na Figura 54 são apresentadas as curvas σ - ε , que demonstram o comportamento dúctil deste adesivo. As suas propriedades mecânicas encontram-se descritas na Tabela 9.

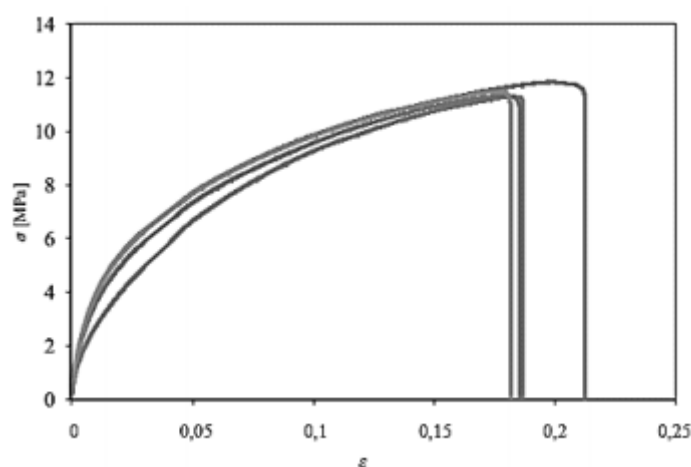


Figura 54 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Sikaforce® 7752 (adaptado de [120]).

Tabela 9 - Propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 [120].

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

^a Valor de fabricante.

3.1.4 Modelo de dano coesivo

Como abordado anteriormente, no subcapítulo 2.2.3, existem diversos MDC a serem aplicados em diferentes situações, consoante o comportamento dos materiais em questão, são exemplo leis triangulares, trapezoidais, lineares parabólicas, exponenciais e polinomiais. Entre estas, as leis triangulares, são as usadas com maior frequência, resultado da sua simplicidade, bem como por serem capazes de oferecerem resultados igualmente precisos em grande parte dos casos e ao mesmo tempo exigirem um menor número de parâmetros a serem determinados [121].

Na Figura 55 é apresentada uma lei coesiva triangular. No ponto O, o material ainda não está sob carga e não há separação. Ao longo da linha OA, o material é carregado, mas não ocorre qualquer dano, assim este carregamento é reversível (domínio elástico). O declive desta reta corresponde à rigidez coesiva inicial do material (K). No ponto A (com separação δ_0) a tração coesiva atinge um valor máximo (resistência coesiva, T_{max}). A partir do ponto A, ocorre dano no material e a rigidez coesiva diminui. Por exemplo, num genérico B (com separação δ), localizado entre os pontos A e C a trajetória do descarregamento ocorre e forma linear em direção ao ponto O. Deste modo, a rigidez coesiva desce do valor inicial K , para um valor K_δ e a tração admissível desce do valor inicial de T_{max} para o valor de T_δ [122].

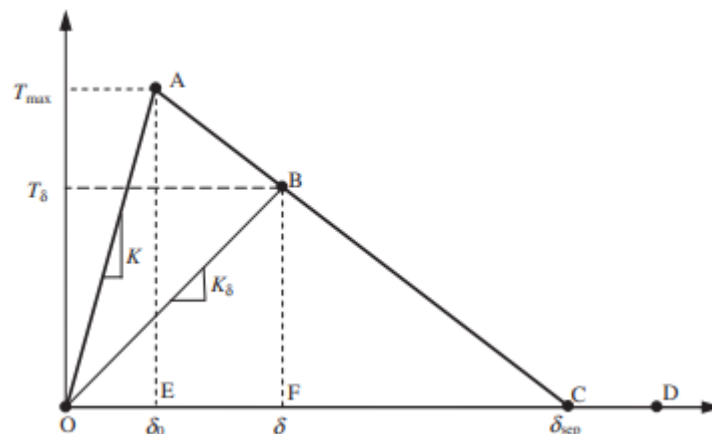


Figura 55 - Lei coesiva triangular [122].

Quando a tração admissível baixa até zero (ponto C, que corresponde à extremidade da fenda), a separação corresponde a δ_{sep} e ocorre a separação completa do material. Após isto, uma nova fenda é nucleada (quando a fenda ainda não existe) ou a ponta de uma fenda existente avança. Qualquer ponto além do ponto C (por exemplo ponto D) está localizado fora da zona coesiva e pertence à superfície da fenda localizada atrás da ponta da mesma [122].

A energia coesiva ou resistência à fratura (G_c), dada pela área do triângulo, está relacionada com os outros dois parâmetros através da relação da área:

$$G_c = T_{\max} \times \frac{\delta_{sep}}{2}. \quad (1)$$

Assim, quaisquer dois dos três parâmetros podem ser escolhidos como os parâmetros de entrada par a lei coesiva triangular. Além dos parâmetros T_{\max} e δ_{sep} , para descrever por completo a forma da lei triangular, deve ser definido um terceiro parâmetro. Este parâmetro pode ser K ou δ_0 correspondente à tração máxima. A relação entre estes parâmetros é dada por:

$$K = \frac{T_{\max}}{\delta_0}. \quad (2)$$

As leis coesivas triangulares podem ser aplicadas em 2D ou 3D. Este modelo de dano está dividido em modo puro e modo misto. Como apresentado na Figura 56, o modo puro divide-se ainda em modo I (em que a fenda é submetida a esforços de tração) e modo II (em que a fenda é submetida a esforços de corte). O modo puro é caracterizado pela propagação do dano ocorrer num conjunto de nós homólogos quando os valores de tensões no modo respetivo são anulados na respetiva lei coesiva. Já no modo misto, os modos puros I e II ocorrem em simultâneo e são usados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tensão e de corte [123].

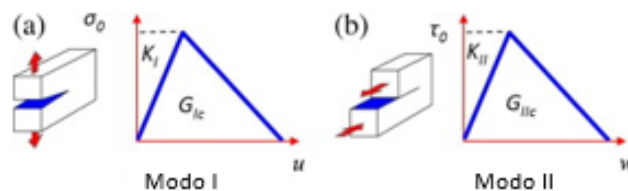


Figura 56 - Lei coesiva triangular modo I (a) e modo II (b) (adaptado de [124]).

Antes da existência de dano, a relação entre as tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} que é capaz de relacionar as tensões e deformação em tração e corte nos elementos coesivos. A matriz é definida pela seguinte equação:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = K_{COH} \cdot \varepsilon. \quad (3)$$

Para uma formulação local, usada em simulações de fratura de espessura nula, os parâmetros da matriz K_{COH} possuem valores extremamente elevados de modo que não existam deformações criadas pelos elementos coesivos [117]. Em formulações contínuas de camadas finas, em específico ligações adesivas, é possível uma aproximação razoável aos parâmetros de rigidez através das seguintes condições:

$$k_{nn} = E, \quad (4)$$

$$k_{ss} = G, \quad (5)$$

$$k_{sn} = 0. \quad (6)$$

Onde E corresponde ao módulo de elasticidade e G ao módulo de elasticidade ao corte. Desta forma, com a admissão destes parâmetros é possível produzir de forma fiável a deformação da camada de adesivo [123]. Em modo misto, a iniciação de dano pode ser definida por vários critérios, como por exemplo o critério quadrático de tensões, através da seguinte equação:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (7)$$

Onde, $\langle \rangle$ são os parenteses de Macaulay que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. Quando é atingida a resistência máxima em modo misto, a rigidez do material começa a degradar-se. A separação completa de um par de nós homólogos é prevista por um critério linear energético em função dos valores de G_I e G_{II} através da seguinte expressão:

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (8)$$

3.1.5 Leis coesivas para simulação dos modelos

Para que seja possível o estudo das juntas, primeiro é necessário conhecer os valores dos parâmetros que simulam os adesivos, bem como a camada intralaminar dos aderentes. Em relação aos adesivos, alguns estudos publicados afirmam que os resultados obtidos através de ensaios de tração e de corte de provetes maciços de adesivo permitem uma aproximação razoável destes valores [117, 125]. No entanto, as restrições às deformações na camada de adesivo, causado pelos substratos, bem como a propagação da fenda, que ocorre tipicamente em modo misto, invalidam este facto [126, 127]. Pelo que passa a existir uma diferença nas propriedades do adesivo como um material maciço ou como camada fina. Assim, é recomendado que os métodos usados na definição destes valores sejam capazes de simular de forma fiável as condições a que os adesivos vão estar sujeitos.

3.1.5.1 Araldite® AV138

À semelhança do adesivo Araldite® 2015, as leis coesivas do adesivo o Araldite® AV138 também foram obtidas pelo método inverso no trabalho desenvolvido por Campilho et al. [128]. No entanto, devido à inexistência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi um pouco diferente do indicado. Neste procedimento recorreu-se a ensaios com provetes maciços de adesivo e ensaios *Thick Adherend*

Shear Test (TAST) para a definição dos valores de t_n^0 e t_s^0 , respetivamente. Estes valores foram utilizados na construção de leis coesivas aproximadas. Inicialmente, foram usados valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis para tração e corte obtidas foram assim utilizadas no modelo numérico para uma geometria testada (a JSS com L_0 de 20 mm). As leis do adesivo foram estimadas através do ajuste de curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais até que fossem obtidos valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzissem os resultados experimentais. Os valores obtidos foram aplicados a todas as configurações testadas, apresentando resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente através de ensaios com provetes de adesivo maciço e TAST, respetivamente. Os parâmetros obtidos foram testados no trabalho de Campilho et al. [116] e foi concluído que estes são capazes de reproduzir de forma fiável o comportamento do adesivo Araldite® AV138. Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros coesivos utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138.

Tabela 10 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Araldite® AV138 [116].

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

3.1.5.2 Araldite® 2015

As leis coesivas do adesivo Araldite® 2015 foram determinadas através do método inverso num trabalho anterior realizado por Campilho et al. [128]. Neste procedimento recorreu-se a ensaios DCB e ENF para determinar os valores de G_{IC} e G_{IIC} , respetivamente, usando métodos ou teóricas apropriadas. Estes valores foram então utilizados para a construção de uma lei coesiva no modo puro apropriado. Inicialmente, foi usado um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , baseados nas propriedades do adesivo. A lei coesiva resultante deste processo foi utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte) com as mesmas dimensões do modelo a simular. O valor de t_n^0 ou t_s^0 foi obtido utilizando um procedimento de aproximação de curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do respetivo teste de caracterização à fratura, para que a lei coesiva reproduza de forma fiel o comportamento observado da camada de adesivo. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente através de ensaios com provetes maciços de adesivos [129] e ensaios TAST [130]. Na Tabela 11 são apresentados os parâmetros coesivos utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015.

Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Araldite® 2015 [128].

E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
1850	560	21,63	17,9	0,43	4,7

3.1.5.3 Sikaforce® 7752

As leis coesivas do adesivos Sikaforce® 7752 foram determinadas no trabalho desenvolvido por Faneco [120] e resultou de um processo similar ao utilizado no adesivo Araldite® 2015. Para a determinação da lei coesiva ao corte foi usado um método inverso idêntico, ou seja, para a determinação do valor de G_{IIC} recorrer-se ao ensaio ENF seguido do ajuste manual iterativo para a estimativa do valor de t_s^0 . Os valores utilizados correspondem a valores médios de G_{IIC} e t_s^0 e foram obtidos no trabalho desenvolvido por Azevedo [131]. Estes valores apresentam desvios padrão entre provetes reduzidos, o que mostra uma repetibilidade dos ensaios realizados.

Devido à inexistência de um processo inverso para a obtenção da lei coesiva em tração foi usado um processo diferente. O valor de G_{IC} foi obtido através do valor médio de uma série de ensaios de fratura DCB. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor de resistência médio à tração dos provetes maciços de adesivo. Como foi observado em trabalhos anteriores que, especificamente na sollicitação à tração, os valores de t_n^0 não têm uma influência significativa para variações inferiores a 25% do valor obtido pelo método inverso, considerou-se que não seria necessário tal procedimento [120]. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente através de ensaios com provetes maciços de adesivo e TAST, respetivamente [120]. Na Tabela 12 são apresentados os parâmetros coesivos utilizados para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 [120].

E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
490	190	11,49	10,17	2,36	5,46

3.1.5.4 Camada intralaminar

As leis coesivas para a simulação da camada intralaminar foram obtidas no trabalho de Campilho et al. [132], utilizando o método inverso. Neste procedimento recorreu-se a ensaios DCB e ENF para determinar os valores de G_{IC} e G_{IIC} , respetivamente. Estes parâmetros foram obtidos com auxílio de técnicas de redução de dados já desenvolvidas [133]. De seguida, G_{IC} e G_{IIC} foram usados para a construção de uma lei coesiva apropriada. Inicialmente, foram usados valores típicos de t_n^0 e t_s^0 .

A lei coesiva obtida foi então aplicada ao modelo numérico correspondente, utilizando as mesmas dimensões do modelo a simular. Os valores de t_n^0 ou t_s^0 foram obtidos através de um processo iterativo até fosse atingida uma boa aproximação entre as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para que a lei coesiva seja capaz de simular de forma fiável o comportamento desta camada. Uma vez que, neste trabalho o objetivo passava por simular uma interface de espessura nula, foi utilizada uma função de penalidade para a parte inicial da lei coesiva, que considera que E e G assumem valores

de 10^6 MPa. Por outro lado, na presente dissertação foram usados valores de rigidez típicos para a caracterização desta camada. Na Tabela 13 são apresentados os parâmetros coesivos utilizados para simular a camada intralaminar.

Tabela 13 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada intralaminar [132].

E [MPa] ^a	G [MPa] ^a	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
2000	770	42,6	39,3	0,54	0,93

^a Valores típicos de rigidez

3.1.6 Validação da técnica numérica

Para que seja possível a utilização da técnica numérica para a modelação numérica de juntas adesivas compósitas, é necessário verificar se o método numérico baseado em MDC é aplicável. Para o efeito, é apresentada, de seguida uma comparação entre dados numéricos e experimentais, já existentes, relativos à resistência das JSS. Para os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138, o estudo apresentado é referente a juntas fabricadas em PRFC, sendo analisados L_0 de 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm e 80 mm. No que diz respeito ao adesivo Sikaforce® 7752, por falta de estudos que utilizem juntas em PRFC, são apresentados dados referentes a juntas fabricadas em liga de alumínio, sendo analisados L_0 de 12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm. De notar que, apesar dos dados apresentados neste subcapítulo serem referentes a JSS e o trabalho realizado ser referente a juntas de ressalto, esta aproximação é viável, uma vez que em ambas as configurações das juntas, ainda que em rácios diferentes, o adesivo é solicitado em modo misto.

3.1.7 Fabrico das juntas

De seguida é apresentado o processo de fabrico das juntas usadas na componente experimental dos estudos usados para comprovar a viabilidade do MEF na simulação de juntas adesivas. Assim, é descrito o processo utilizado para o fabrico das juntas em PRFC e em liga de alumínio.

3.1.7.1 Juntas em PRFC

Os substratos das juntas adesivas foram obtidos através do corte de placas de pré-impregnado unidirecional de matriz epóxida e reforçada com fibra de carbono (Texipreg HS 160 RM). O empilhamento das 16 placas cortadas foi feito, tendo em atenção que a sequência de empilhamento de todas as camadas é 0° . É de extrema importância que se evite a formação de bolhas de ar no interior das camadas, pelo que este processo deve ser feito com o mais cuidado. De seguida, procedeu-se à cura das placas. Esta consiste em colocar as placas numa prensa de pratos quentes, para estas sejam submetidas a um ciclo térmico, de temperatura e pressão controlados. O ciclo

térmico realizado foi o recomendado pelo fabricante, como é evidenciado na Figura 57, a uma pressão de 4 bar, durante 1h e a uma temperatura constante de 130°C. O aquecimento e arrefecimento foram realizados a 4°C/min. Assim que a placa atingiu uma temperatura de 60°C, esta foi retirada da prensa e deixou-se arrefecer até à temperatura ambiente [134].

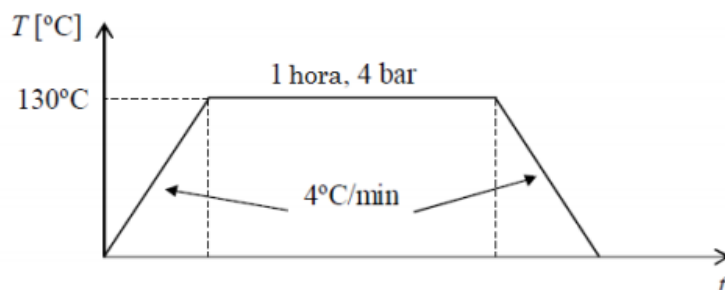


Figura 57 - Ciclo térmico para cura das placas de compósito [134].

Para o corte das placas em substratos para o fabrico de juntas foi utilizada uma máquina que possui um disco de corte com revestimento de diamante e refrigerada a água. Usou-se ainda um calço que serviu de apoio, para garantir que os provetes ficavam todos com a mesma espessura. Após o corte, os aderentes foram lixados para eliminar quaisquer eventuais fibras soltas que pudessem existir e limpos com acetona, para garantir uma adesão ótima entre os substratos e o adesivo [134].

Por fim procedeu-se à colagem dos provetes, com os adesivos em questão. A espessura dos adesivos foi assegurada por duas folhas de gramagem 80 g/m², que conferem uma espessura de 0,2 mm. Para manter os substratos unidos durante o processo de cura foram utilizadas molas. Este processo foi feito à temperatura ambiente e durou uma semana. Antes da realização dos ensaios de tração removeram-se ainda os excessos de adesivo que se encontravam no exterior da junta, com recurso a uma furadora equipada com uma mó abrasiva [134].

3.1.7.2 Juntas em liga de alumínio

OS aderentes das JSS foram obtidos já na sua forma final. Assim, o passo inicial passou por fazer um tratamento superficial (Figura 58), neste caso abrasão manual e de seguida uma limpeza com acetona. Este processo tem por objetivo o aumento da rugosidade da superfície dos substratos, bem como a remoção de possíveis óleos, gorduras, óxidos e outras camadas fracas. Desta forma, é possível maximizar a eficácia do processo de ligação [135].

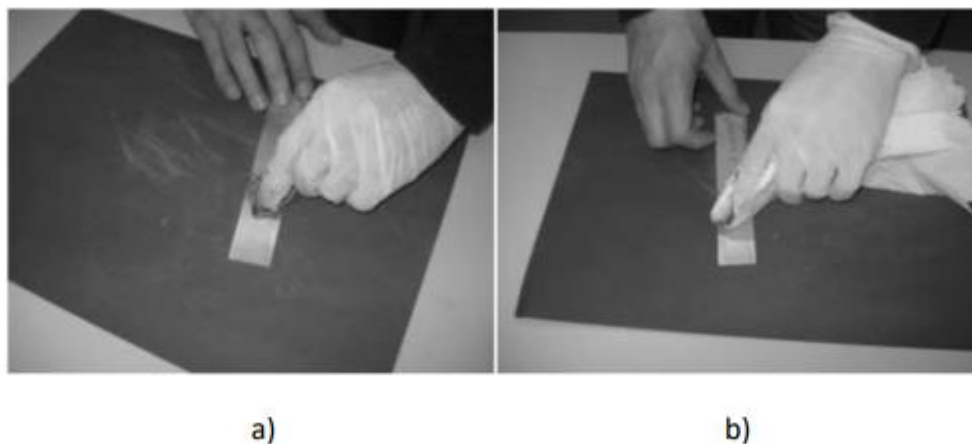


Figura 58 - Processo de abrasão manual (a) e limpeza com acetona (b) [135].

A etapa seguinte consistiu na preparação dos substratos para aplicar o adesivo e montagem das juntas. Com esta finalidade, os aderentes foram fixados num aparelho para garantir o alinhamento correto, utilizando uma linha de pesca calibrada com 0,2 mm de diâmetro, colocada sob a parte superior do aderente para assegurar que a espessura do adesivo se mantinha constante. A seguir, o adesivo foi aplicado sobre as superfícies de colagem. O processo de cura foi realizado utilizando garras de pressão para garantir o alinhamento dos aderentes. Foram colados calços nos bordos das amostras para garantir um alinhamento correto na máquina de ensaios.

A cura do adesivo foi feita à temperatura ambiente durante uma semana. Antes da realização dos ensaios foi ainda retirado qualquer excesso de adesivo presente nas juntas, para reproduzir a geometria teórica pretendida com cantos retos na extremidade do adesivo[135].

3.1.8 Ensaio das juntas

Com o objetivo de determinar a resistência das juntas adesivas, realizaram-se ensaios de tração. Para isso, recorreu-se a uma máquina servo-hidráulica (SHIMADZU), munida de uma célula de carga de 1000 kN. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, a uma velocidade de 1 mm/min e, para cada L_0 foram testados cinco provetes.

3.1.9 Resultados obtidos

Com a realização dos ensaios de tração para cada um dos adesivos em estudo, foi então possível obter a resistência das juntas adesivas. Desta forma, pode então proceder-se à comparação entre os dados obtidos de forma experimental com os dados obtidos numericamente através de MDC. Assim, é possível verificar se o método numérico representa de forma fidedigna os ensaios de tração. Caso esta premissa seja verdadeira, é pertinente afirmar-se que, se o MEF produz bons resultados na análise

de JSS, irá também produzir bons resultados para juntas com ressalto curvas, apesar das diferenças geométricas entre os dois tipos de juntas. Ao longo deste subcapítulo serão mostrados os resultados dos ensaios realizados, em relação a curvas $P-\delta$, modos de rotura e, por fim, resistência das juntas.

3.1.9.1 Curvas $P-\delta$

De seguida são apresentadas as curvas $P-\delta$ das juntas ensaiadas para cada um dos adesivos em estudo e respetivos L_0 , bem como os valores de força máxima.

3.1.9.1.1 Araldite® AV138

Como é visível na Figura 59, as juntas solicitadas à tração têm um comportamento quase linear até à rotura da ligação. Este comportamento é espelhado em todos os L_0 ensaiados, e por isso não se tornou relevante apresentar os gráficos de todos os provetes. Assim, serão apenas apresentadas as curvas $P-\delta$ para os L_0 de 20 mm (a) e 50 mm (b) da Figura 59, respetivamente.

Como já referido na subcapítulo 3.1.8, para cada L_0 foram testados cinco provetes, no entanto nem todos resultaram em ensaios válidos, por causa de roturas prematuras dos aderentes. Assim, são apresentadas apenas quatro curvas $P-\delta$ na Figura 59. De notar ainda que a informação relativa à quantidade de provetes validada se encontra discriminada na Tabela 14.

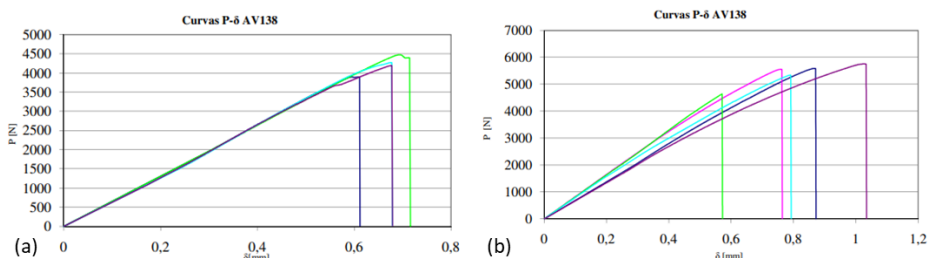


Figura 59 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo Araldite® AV138 e L_0 de 20 mm (a) e 50 mm (b) [134].

Analisando as curvas $P-\delta$ verifica-se um comportamento aproximadamente linear até à rotura, e no geral resultados concordantes. Nas curvas $P-\delta$ relativas ao L_0 de 50 mm é visível um ensaio onde ocorre rotura prematura do provete, apresentando assim um valor de P_{\max} mais baixo que os restantes, pelo que este não foi validado.

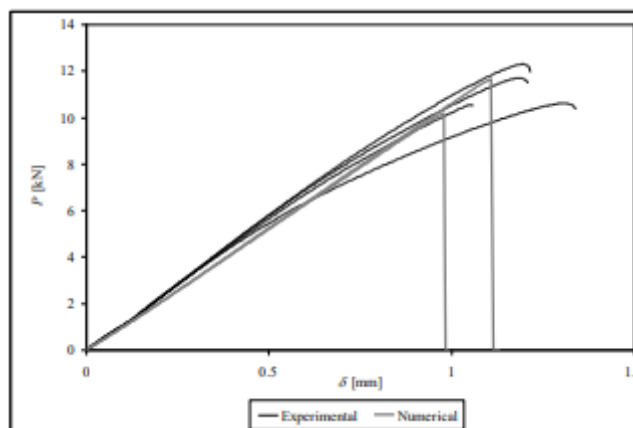
Na Tabela 14 é possível observar, para cada L_0 o número de provetes validados, o valor médio de P_{\max} e o respetivo desvio padrão. Em relação ao P_{\max} , este aumenta com o aumento do L_0 . No que diz respeito ao desvio padrão, verifica-se que este, em média, é tanto menor, quando maior o número de provetes validos (cerca de 6% para 5 provetes validados, cerca de 7% para 4 provetes validados e cerca de 8% para 3 provetes validados), o que só comprova a concordância dos valores obtidos para ensaios com os mesmos L_0 .

Tabela 14 - P_{\max} experimental de JSS para o adesivo Araldite® AV138 [134].

L_o [mm]	Nº de provetes ensaiados	Nº de provetes validados	Média do P_{\max} [N]	Desvio padrão [N]
10	5	4	2957	213
20		4	5389	358
30		5	7184	309
40		5	8705	650
50		4	11092	616
60		5	13180	1100
70		3	14355	105
80		3	16005	1655

3.1.9.1.2 Araldite® 2015

Na Figura 60 é apresentada uma comparação entre as curvas P - δ obtidas de forma experimental e numericamente para um L_o de 50 mm. Em relação às curvas numéricas, estas foram obtidas através do método coesivo de modo puro (maior valor de P_{\max}) e método coesivo de modo misto (menor valor de P_{\max}). Pela análise da Figura 59 e Figura 60 verifica-se que o adesivo Araldite® 2015 é mais resistente que o Araldite® AV138, uma vez que aguenta maiores carga, para deformações semelhantes. Analisando apenas a Figura 60, verifica-se uma boa concordância em termos de P_{\max} , entre os dados das curvas experimentais e numéricas, o que é uma boa indicação para a validação da técnica numérica realizada no capítulo 3.1.9.3.

Figura 60 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para o adesivo Araldite® 2015 e L_o de 50 mm [136].

Na Tabela 15 são apresentados os valores médios de P_{\max} para cada um dos L_o , bem como o respetivo desvio padrão e número de provetes validado. Através da análise do P_{\max} , como já seria expectável, este aumenta com o aumento do L_o . É também possível verificar-se que os desvios padrão apresentam valores relativamente baixos (cerca de 7%) para L_o com 3 ou 4 provetes validados, o que demonstra uma concordância nos

valores obtidos para cada condição geométrica. Para L_0 em que apenas foram validados 2 provetes o desvio padrão é mais elevado, o que pode comprometer a veracidade dos valores obtidos.

Tabela 15 - P_{\max} experimental de JSS para o adesivo Araldite® 2015 [136].

L_0 [mm]	Nº de provetes ensaiados	Nº de provetes validados	Média do P_{\max} [N]	Desvio padrão [N]
10	5	4	2500	68
20		2	4683	102
30		3	6919	303
40		4	9302	441
50		3	11843	389
60		2	14439	476
70		3	16900	656
80		2	19098	1441

3.1.9.1.3 Sikaforce 7752

Na Figura 61 são apresentadas as curvas P - δ criadas através do ensaio de tração, para L_0 de 37,5 mm e 50 mm. Estas curvas apresentam um comportamento quase linear até à rotura, onde é atingido o P_{\max} . É possível observar alguns desvios em relação à rigidez antes da falha. No entanto, no geral verificou-se uma boa reprodutibilidade dos resultados em relação à rigidez e P_{\max} .

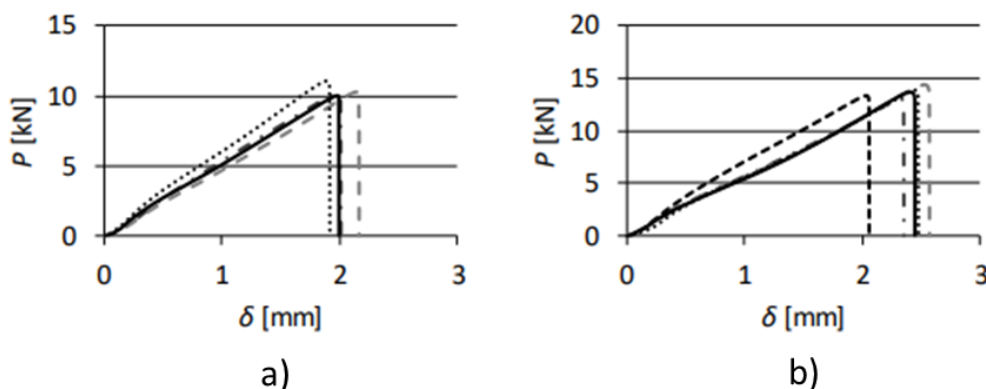


Figura 61 - Curvas P - δ para o adesivo Sikaforce® 7752 e L_0 de 37,5 mm (a) e 50 mm (b) [135].

Na Tabela 16 são apresentados os valores médios de P_{\max} , bem como o desvio padrão e número de provetes validados, para cada um dos L_0 testados. Mais uma vez, é possível verificar que P_{\max} aumenta com o aumento do L_0 . Através da análise do desvio padrão, é possível verificar que estes são bastante reduzidos (em média, cerca de 6%) e que foram sempre validados 4 ou mais provetes. Estes dois fatores demonstram uma elevada concordância entre os valores obtidos.

Tabela 16 - P_{\max} experimental de JSS para o adesivo Sikaforce® 7752 [135].

L_0 [mm]	Nº de provetes ensaiados	Nº de provetes validados	Média do P_{\max} [N]	Desvio padrão [N]
12,5	5	4	3763	311
25		5	6941	536
37,5		4	10371	491
50		5	13699	567

3.1.9.2 Modos de rotura

De seguida são apresentados os modos de rotura que ocorreram nas juntas testadas, para cada um dos três adesivos em análise.

3.1.9.2.1 Araldite® AV138

No caso das juntas testadas com o adesivo Araldite® AV138, o modo de rotura já não foi tão linear quanto o adesivo Araldite 2015. De facto, para o L_0 de 10 mm e 20 mm o modo de rotura foi coesivo. Este facto é apoiado pela Figura 62 onde se observa adesivo na face de ligação dos dois aderentes. Para os provetes com L_0 compreendidos entre 30 mm e 80 mm deu-se uma rotura intralaminar. Na Figura 63 observa-se que a rotura ocorre inicialmente no adesivo e, de seguida, propaga-se para os aderentes.

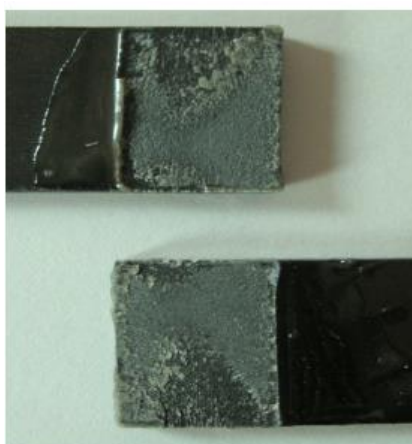


Figura 62 - Rotura coesiva em juntas com adesivo Araldite® AV138 e L_0 de 10 mm [134].

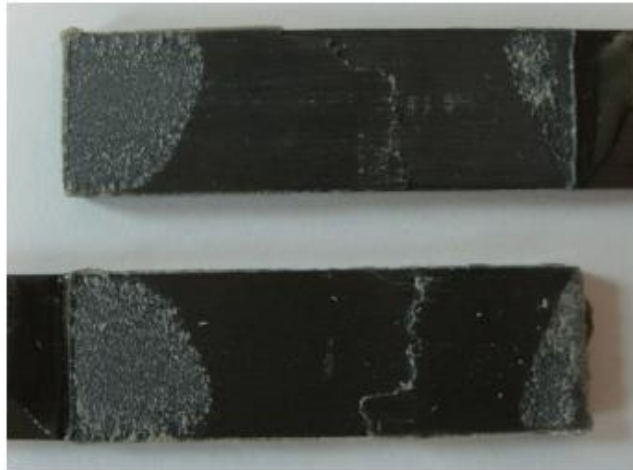


Figura 63 - Rotura intralaminar em juntas com adesivo Araldite® AV138 e L_0 de 40 mm [134].

3.1.9.2.2 Araldite® 2015

Em todas as juntas testadas com o adesivo Araldite® 2015, a rotura deu-se pelo adesivo, ocorrendo assim uma rotura coesiva. Na Figura 64 é possível verificar a existência de adesivo nas faces dos dois substratos, o que corrobora o facto de a rotura ser coesiva.

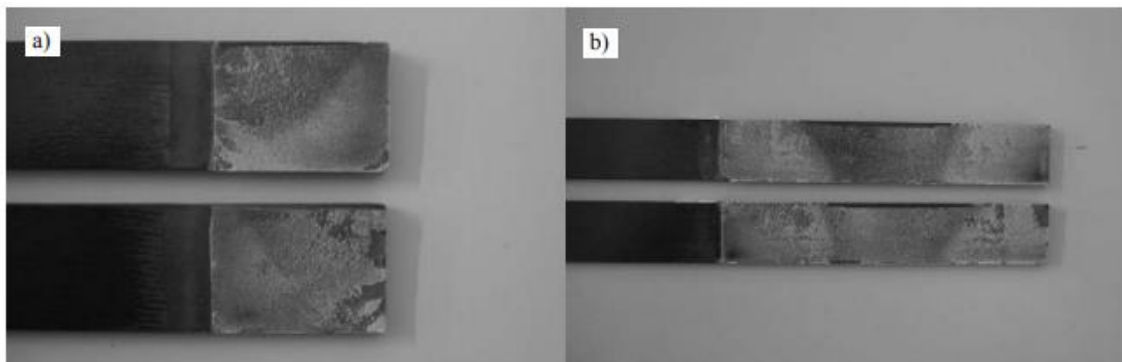


Figura 64 - Rotura coesiva em juntas com adesivo Araldite® 2015 e L_0 de 20 mm (a) e 80 mm (b) [136].

3.1.9.2.3 Sikaforce 7752

No caso do adesivo Sikaforce® 7752, o modo de rotura foi o mesmo para todas as juntas, neste caso rotura coesiva. Este facto é comprovado pela análise da Figura 65, onde é possível observar-se uma camada de adesivo na face dos dois aderentes.



Figura 65 - Rotura coesiva em juntas com adesivo Sikaforce® 7752 e Lo de 12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm [135].

3.1.9.3 Resistência das juntas e validação da técnica numérica

As curvas de P_{\max} e respetivo desvio padrão em função do L_o obtidas de forma experimental e as curvas P_{\max} obtidas numericamente são apresentadas na Figura 66, Figura 67 e Figura 68, e representam os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

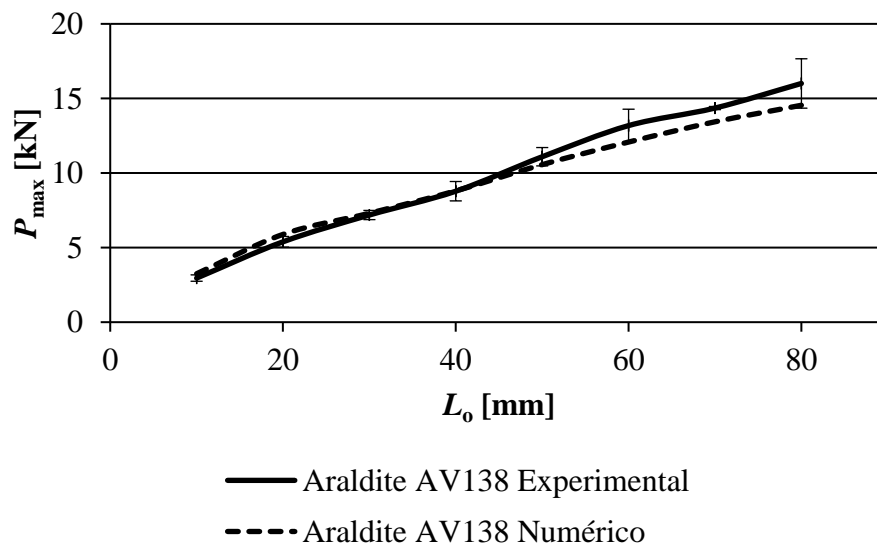


Figura 66 - P_{\max} experimental e numérico do adesivo Araldite® AV138.

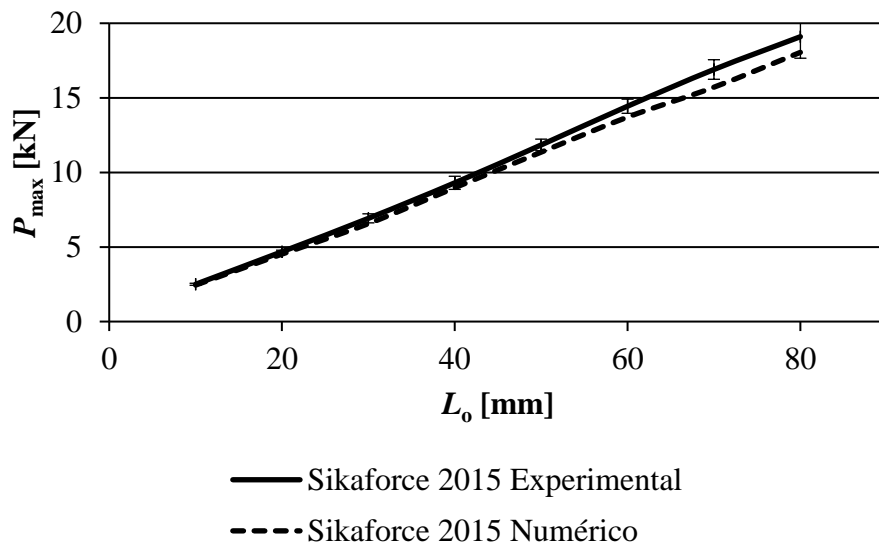


Figura 67 - P_{max} experimental e numérico do adesivo Araldite® 2015.

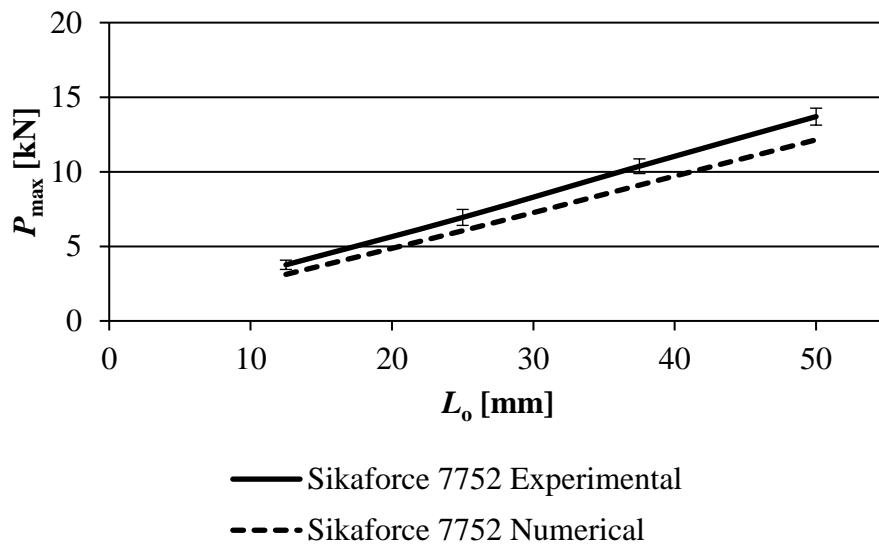


Figura 68 - P_{max} experimental e numérico do adesivo Sikaforce® 7752.

A análise dos dados obtidos mostra um aumento de P_{max} com o aumento de L_0 , ainda que em diferentes proporções, em função do adesivo. Para uma comparação mais equitativa, a evolução de P_{max} será analisada entre L_0 de 10 mm e 50 mm para os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138, e entre L_0 de 12,5 mm e 50 mm para o adesivo Sikaforce® 7752. Entre estes valores de L_0 , regista-se um aumento de P_{max} de 8,1 kN, 9,3 kN e 9,9 kN para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Esta diferença está relacionada com a maior ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752. Por isso, este adesivo não atinge a rotura de

forma prematura nas extremidades do adesivo na proximidade do seu limite elástico, continuando a deformar-se plasticamente, o que conduz a valores de P_{\max} mais elevados. Já o adesivo Araldite® AV138, por ter um comportamento frágil, entra rotura assim que atinge o limite elástico, apresentando assim valores de P_{\max} menores. Em relação ao adesivo Araldite® 2015, este não é tao frágil como o Araldite® AV138, nem tão dúctil como o Sikaforce® 7752. Por isso, apresenta um comportamento intermédio relativamente aos outros adesivos.

Analisando agora os gráficos com o objetivo de verificar a fiabilidade dos modelos numéricos na simulação de situações reais, é possível observar que, para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, os modelos numéricos foram capazes de fazer esta simulação com erros relativamente baixos (em média 4% e 6%, respetivamente). Nota-se, no entanto, uma diferença um pouco mais significativa para L_0 maiores. Ao analisar o gráfico do Sikaforce® 7752 verificam-se diferenças maiores entre os valores numéricos e experimentais. De facto, a resistência da junta é subestimada em 1,5 kN no L_0 de 50 mm. Isto deve-se à elevada ductilidade do adesivo, que não é modelada com tanta precisão por leis coesivas triangulares. Neste caso o uso de uma lei coesiva trapezoidal seria mais indicado [101].

3.2 Modelação numérica de juntas curvas

Com o resultado do estudo de validação realizado, apesar das condições geométrica ligeiramente diferentes das consideradas no estudo numérico desta tese, considera-se que os MDC são capazes de prever o comportamento das juntas em estudo. Neste subcapítulo são expostos e analisados os resultados do estudo das juntas curvas com ressalto, com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015e Sikaforce® 7752. São também analisados os efeitos da variação de L_0 (10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm e 80 mm), R (1000 mm, 2000 mm e 3000 mm) e t_p (1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm). Estas alterações serão comparadas a nível modos de rotura, tensões na junta, evolução da variável de dano, previsão de resistência da junta e previsão da energia dissipada (U).

A variável de dano e U foram calculadas para o incremento correspondente à resistência da junta (neste caso, P_{\max}). Este incremento foi definido através das curvas $P-\delta$ de cada ensaio, pela análise da sua rigidez (Figura 55). Determinou-se assim, que o incremento correspondente à resistência da junta seria aquele imediatamente antes de ocorrer uma queda drástica na rigidez coesiva. A decisão de seguir o procedimento descrito deve-se ao comportamento das juntas quando a rotura ocorre na camada intralaminar. De facto, apesar de ocorrer a rotura da camada referida, esta não se separa completamente do restante substrato, como evidenciado na Figura 69. Desta forma, ocorre um aumento da força aplicada que não corresponde à realidade. Assim,

pela análise da rigidez é possível chegar a valores de P_{\max} que não são influenciados por este fenómeno, e detetam o instante de rotura intralaminar.

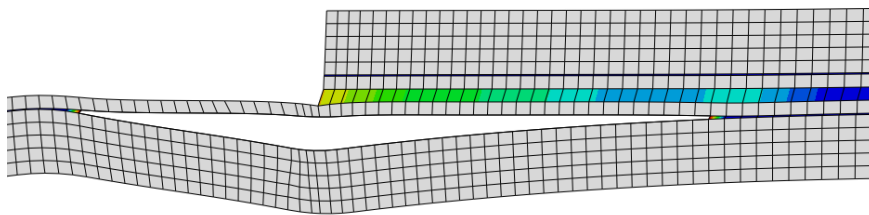


Figura 69 - Substrato após a rotura da camada intralaminar.

3.2.1 Comprimento de sobreposição

De seguida, é feita uma análise dos resultados obtidos. Nesta fase é dado ênfase ao efeito provocado pela alteração do L_o nos diferentes parâmetros analisados.

3.2.1.1 Análise dos modos de rotura

Nas Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19 é apresentada a variação do modo de rotura das juntas estudadas, para cada um dos adesivos, onde C corresponde a um modo de rotura coesivo e I a um modo de rotura intralaminar. Estas tabelas correspondem a juntas com t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm, respetivamente, e mantendo sempre o mesmo R , neste caso 1000 mm.

Tabela 17 - Modos de rotura em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

Adesivo	L_o [mm]							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Araldite® AV138	C	C	C	C	C	C	C	C
Araldite® 2015	C	C	C	C	C	C	C	C
Sikaforce® 7752	C	C	C	I	I	I	I	I

Tabela 18 - Modos de rotura em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, t_p de 2,4 mm e R de 1000 mm.

Adesivo	L_o [mm]							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Araldite® AV138	C	C	C	C	C	C	C	C
Araldite® 2015	I	I	I	I	I	I	I	I
Sikaforce® 7752	C	C	I	I	I	I	I	I

Tabela 19 - Modos de rotura em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, t_p de 3,6 mm e R de 1000 mm.

Adesivo	L_0 [mm]							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Araldite® AV138	I	I	I	I	I	I	I	I
Araldite® 2015	I	I	I	I	I	I	I	I
Sikaforce® 7752	C	I	I	I	I	I	I	I

Através da análise dos dados acima apresentados verifica-se que, em alguns casos, o aumento do L_0 em nada influencia o modo de rotura, nomeadamente em juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. A influência do L_0 apenas é visível nas juntas com adesivo Sikaforce® 7752. Neste caso, verifica-se que um aumento de L_0 leva sempre a uma alteração do modo de rotura, neste caso, de rotura coesiva (Figura 70) para intralaminar (Figura 71). Analisando os resultados obtidos é também possível verificar uma alteração do modo de rotura quando é aumentado t_p . No entanto, este aspeto será analisado em mais detalhe no subcapítulo 3.2.3.1.

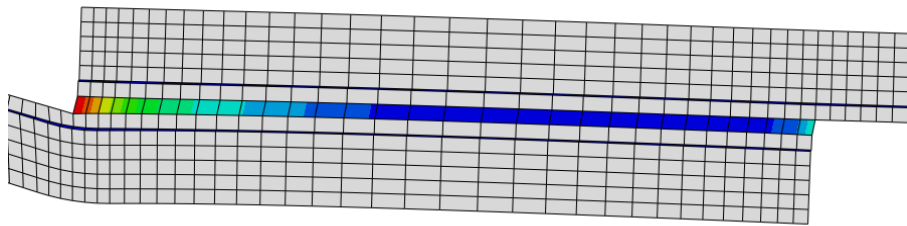


Figura 70 - Exemplo de rotura coesiva numa junta com adesivo Sikaforce 7752, L_0 de 10 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

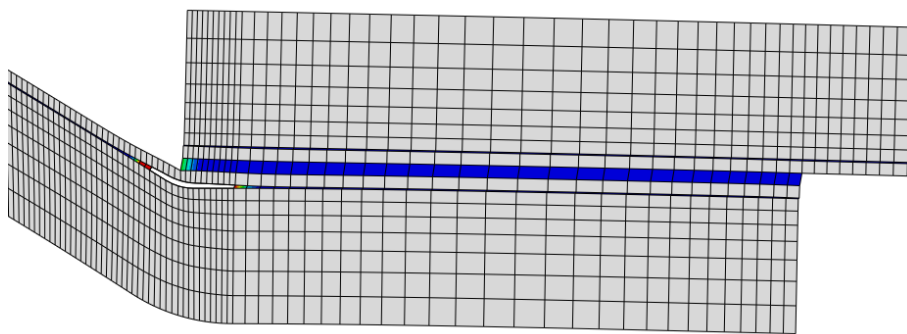


Figura 71 - Exemplo de rotura intralaminar numa junta com adesivo Araldite® 2015, L_0 de 10 mm, t_p de 2,4 mm e R de 1000 mm.

3.2.1.2 Análise de tensões na junta

A Figura 72 representa, a distribuição da tensão de corte (τ_{xy}) a meio da espessura do adesivo, normalizada pela tensão de corte média (τ_{avg}) ao longo da sobreposição da junta, para todos os L_o estudados. Para esta comparação foram usadas juntas com adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

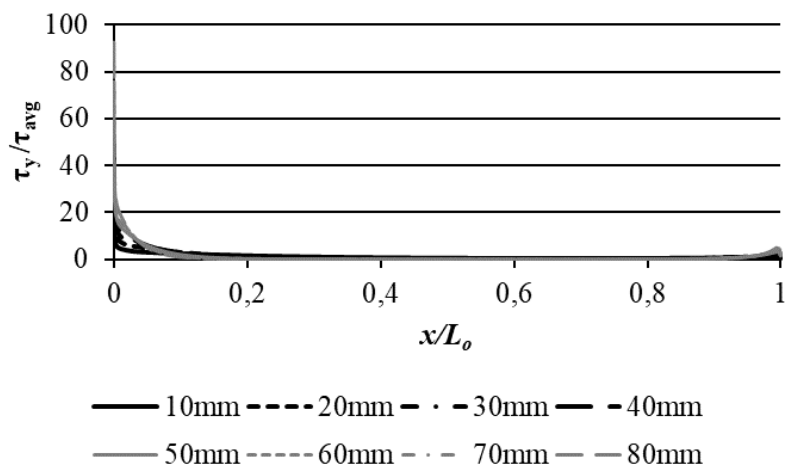


Figura 72 - Distribuição da tensão de corte ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

Através da análise da Figura 72 é possível verificar uma diferença clara entre os picos de tensão, onde a tensão de corte na extremidade esquerda de L_o é muito superior à extremidade direita. Assim, verifica-se que a tensão de corte máxima ocorre sempre na extremidade esquerda da ligação ($x/L_o = 0$). Este resultado já seria expectável e deve-se à própria geometria da junta, que indica que a extremidade esquerda de L_o seria uma zona propícia a concentração de tensões. Esta premissa é também suportada pelo facto de a rotura da ligação ocorrer sempre nesta zona, quer esta seja coesiva ou intralaminar.

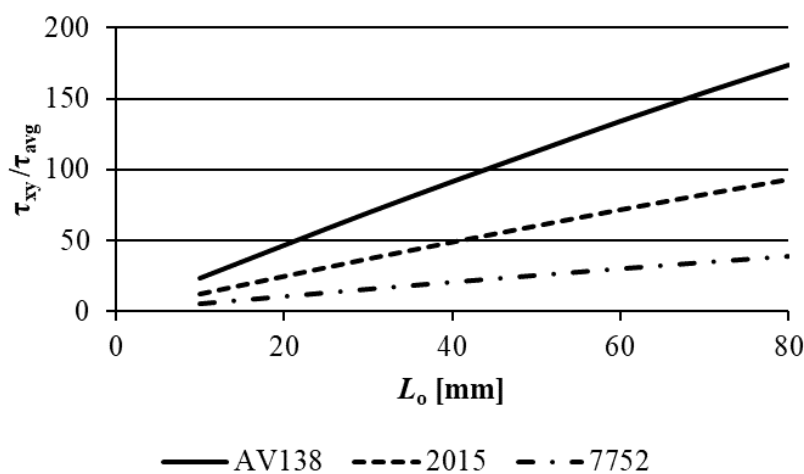


Figura 73 -Evolução da tensão de corte máxima em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

A Figura 73 representa a evolução da tensão de corte máxima em função do L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite 2015 e Sikaforce® 7752. No que diz respeito à influência do L_0 na tensão de corte máxima, verifica-se através da Figura 73 que à medida que este aumenta, ocorre também um aumento da tensão de corte máxima, ainda que a rácios diferentes. No entanto, este acontecimento só é válido para a extremidade esquerda da zona de sobreposição. Ou seja, apenas os primeiros 10% de L_0 têm influência direta na tensão de corte do adesivo.

A Figura 74 representa a distribuição da tensão de arrancamento (σ_y) a meio da espessura do adesivo, normalizada pela tensão de corte média (τ_{avg}), ao longo de L_0 da junta, para os 8 L_0 estudados e com o adesivo Araldite® 2015.

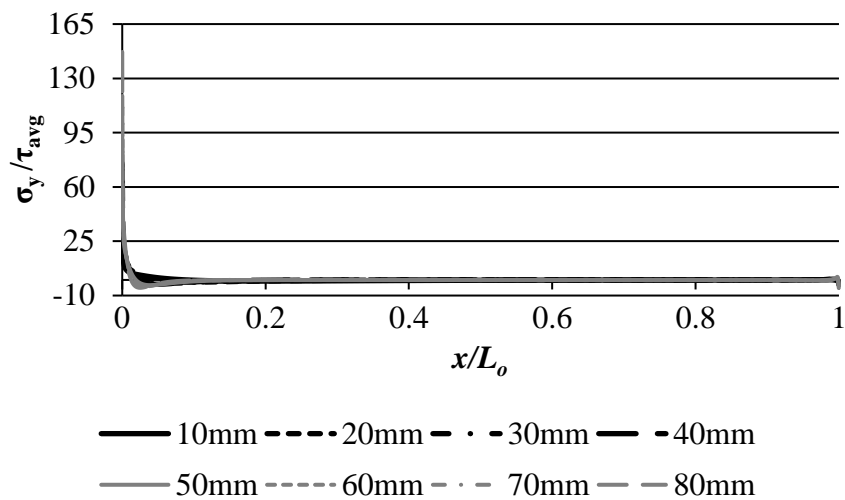


Figura 74 - Distribuição da tensão de arrancamento ao longo de L_0 para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

Analisando o comportamento e evolução da tensão de arrancamento, é possível observar algumas semelhanças com a tensão de corte. Os picos de tensão também se encontram na extremidade esquerda de L_0 e a tensão de arrancamento é maior em L_0 mais elevados. Verifica-se também que apenas os primeiros 10% de L_0 têm influência na tensão de arrancamento máximo. É também de notar que, imediatamente antes dos picos de tensão existe uma zona em que o adesivo está sujeito a compressão. Este efeito é tanto maior quanto maior o L_0 . Este fenómeno é evidenciado na Figura 75.

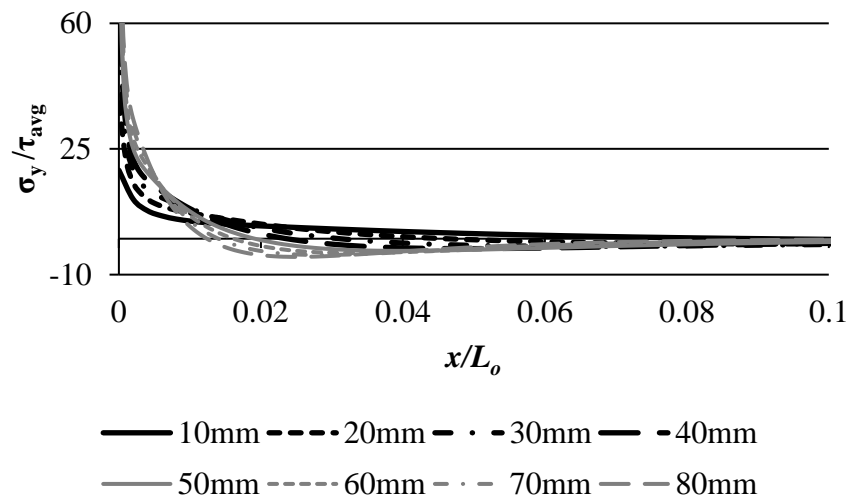


Figura 75 - Distribuição da tensão de arrancamento ao longo de L_o , até 0,1 de comprimento normalizado, para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

A Figura 76 representa a evolução da tensão de arrancamento máxima em função de L_o para os três adesivos estudados. Os dados destas figuras são relativos a juntas com t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm. Verifica-se que, para qualquer um dos adesivos, um aumento de L_o resulta sempre num aumento da tensão de arrancamento máxima. De ressaltar ainda, que os valores apresentados são referentes à tensão presente na extremidade esquerda da superfície de ligação.

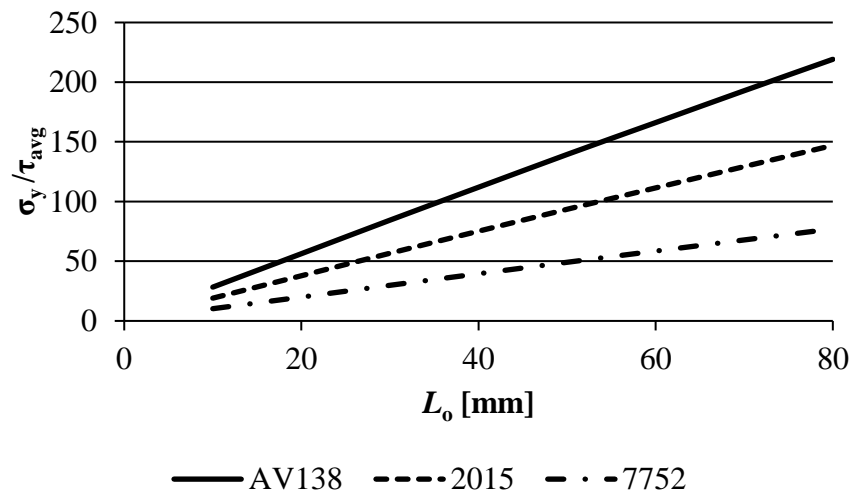


Figura 76 - Evolução da tensão de arrancamento máxima em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

3.2.1.3 Estudo da variável de dano

A variável *Stiffness Degradation* (SDEG) é medida ao longo de L_0 e dá informações relativas à degradação da rigidez da lei coesiva em modo misto. Esta pode variar entre os valores de 0 e 1, que correspondem à ausência de dano e à rotura completa do elemento, respetivamente.

A variação da variável SDEG em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 encontra-se apresentada na Figura 77, Figura 78 e Figura 79, respetivamente. Os dados apresentados são, todos eles relativos a juntas com t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

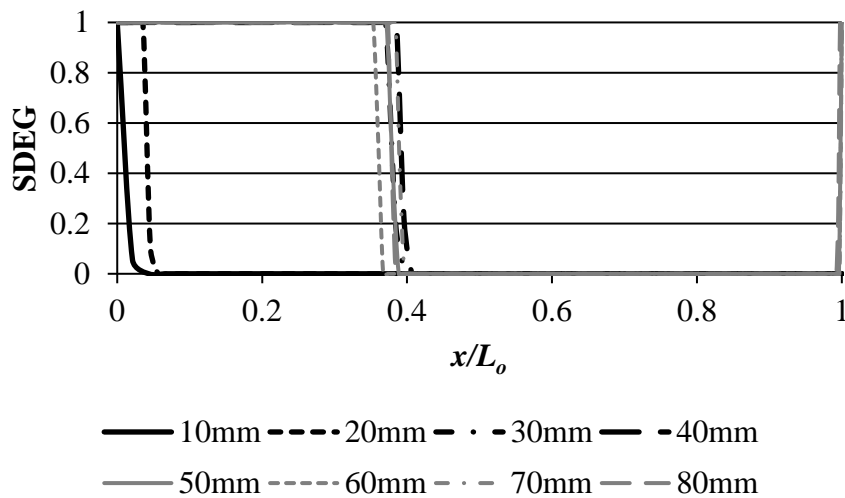


Figura 77 - Variação da variável SDEG em função de L_0 para o adesivo Araldite® AV138, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

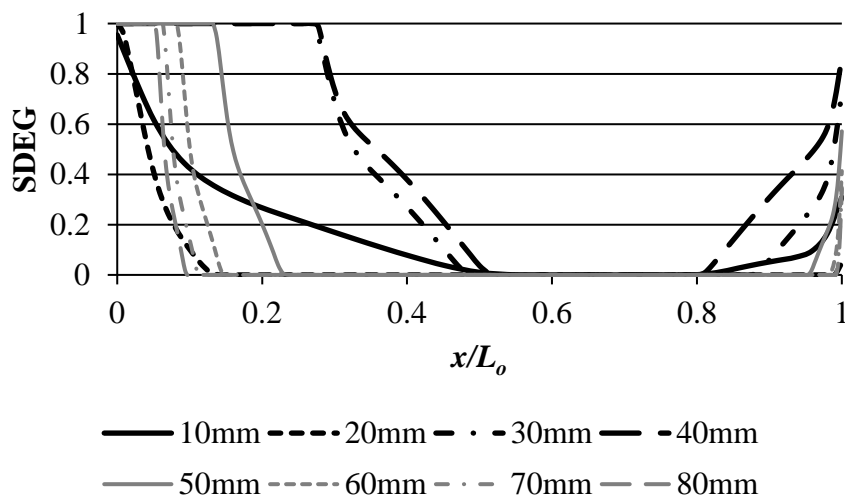


Figura 78 - Variação da variável SDEG em função de L_0 para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

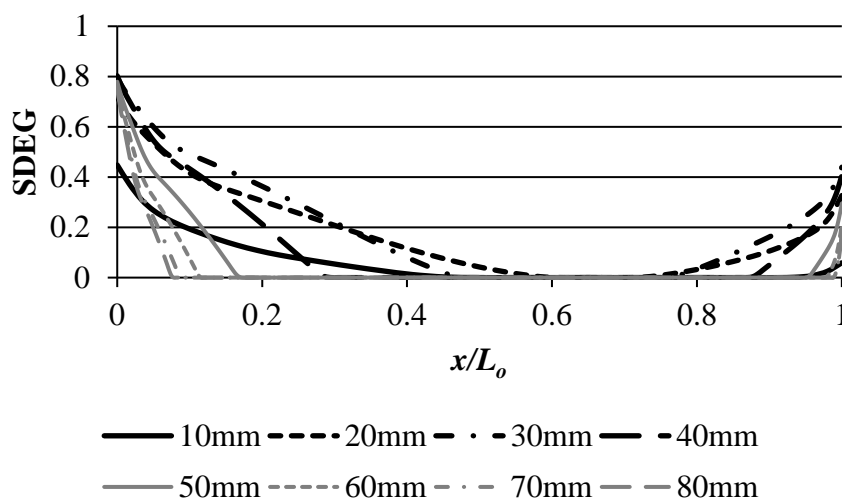


Figura 79 - Variação da variável SDEG em função de L_0 para o adesivo Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

Apesar das diferenças visuais entre as figuras relativas a cada um dos adesivos, é possível observar-se algumas semelhanças. Em todas as curvas SDEG existe uma maior quantidade de dano na extremidade esquerda da sobreposição, dado esse que já seria esperado devido à assimetria das distribuições de tensão. Verifica-se também que, independentemente do adesivo, para L_0 superiores a 10 mm, existe sempre uma zona de L_0 em que não ocorre qualquer dano. Tipicamente, esta zona atinge o valor mínimo em L_0 de 30 mm ou 40 mm, aumentando novamente de forma progressiva até ao L_0 de 80 mm. Este comportamento pode ser explicado pela influência de L_0 no modo de rotura. Como observado na Tabela 17, para o adesivo Sikaforce® 7752, a partir do L_0 de 40 mm, o modo de rotura passa de coesivo para intralaminar, o que explica a diminuição do dano ao longo da camada adesivo para L_0 superiores. Nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, embora o modo de rotura não se altere, também a partir do L_0 de 40 mm, começa a observar-se algum dano na camada intralaminar. Assim, naturalmente para L_0 superiores o dano na camada adesiva será menor. O único adesivo que não atinge um valor de SDEG máximo é o Sikaforce® 7752, o que pode ser justificado pela sua elevada ductilidade. O adesivo Araldite® AV138 apresenta um comportamento relativamente diferente dos restantes. Observa-se nas curvas SDEG uma queda drástica na quantidade de dano de elementos coesivos contíguos da camada adesiva. Isto é explicado pelo facto de este adesivo apresentar um comportamento frágil. Como tal, assim que é atingido o seu limite elástico, ocorre a rotura da camada de adesivo.

3.2.1.4 Previsão da resistência

A Figura 80, Figura 81 e Figura 82 representam a evolução da resistência dos três adesivos estudados em função de L_o para R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm, respetivamente.

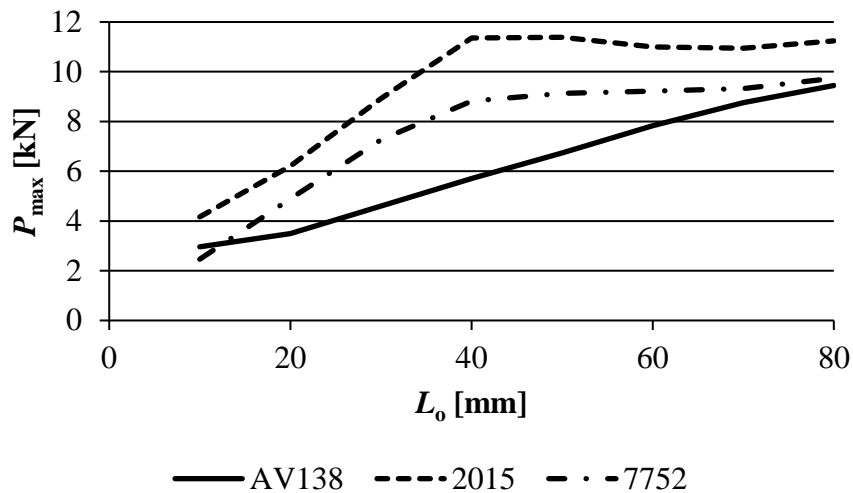


Figura 80 - Variação do P_{max} em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

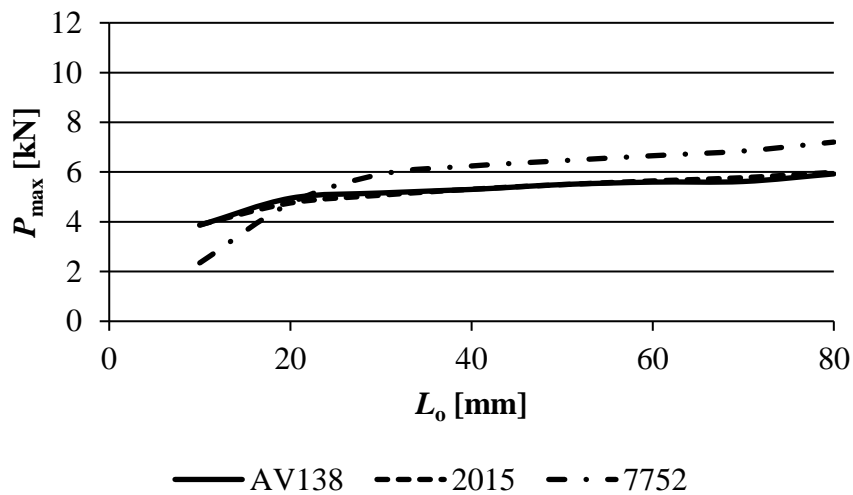


Figura 81 - Variação do P_{max} em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 2,4 mm e R de 1000 mm.

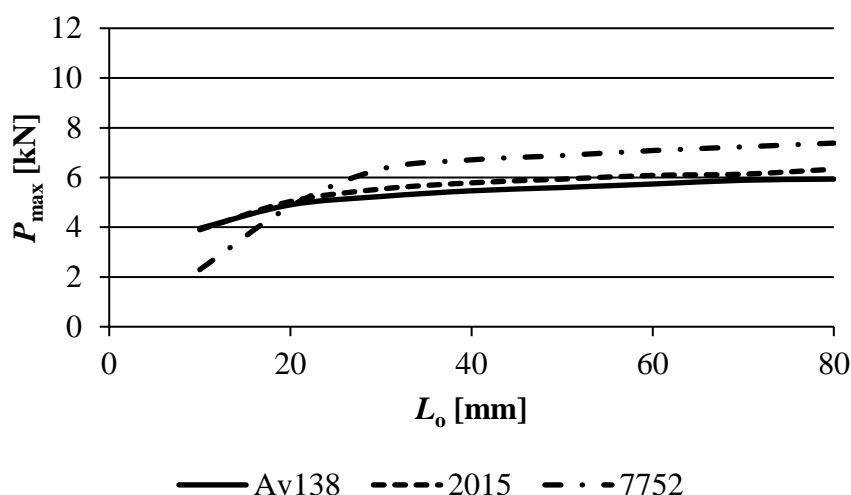


Figura 82 - Variação do P_{max} em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 3,6 mm e R de 1000 mm.

A análise dos dados apresentados mostra que a resistência do adesivo aumenta com o aumento de L_o , no entanto tende a estabilizar assim que é atingido um determinado valor. Isto indica que o aumento de L_o , apesar de aumentar a resistência da junta tem uma influência cada vez menor. A reduzida variação na resistência dos adesivos na Figura 81 deve-se ao facto do modo de rotura nas juntas com t_p de 2,4 mm ser predominantemente intralaminar para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, pelo que estes adesivos acabam por não estarem sujeitos a carregamentos muito elevados. Relativamente à forma da curva do adesivo Araldite® 2015, para t_p de 1,2 mm (Figura 80), o pico na resistência do adesivo no L_o de 40 mm deve-se ao facto do comportamento da junta se alterar. Pois até esse L_o a carga máxima é atingida pela rotura do adesivo, e o mesmo não se verifica em L_o superiores, onde ocorre por rotura intralaminar. A diferença na resistência dos adesivos, verificada entre as duas figuras, é explicada em mais detalhe no subcapítulo 3.2.3.4, uma vez que este fenómeno está relacionado com a espessura dos aderentes. Focando apenas nos dados relativos a juntas com t_p de 1,2 mm (Figura 80), observa-se que o ganho em resistência é semelhante nos três adesivos, 6,5 kN, 7,1 kN e 7,3 kN, que correspondem a ganhos percentuais de cerca de 69%, 63% e 75%, para o Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, respetivamente. No entanto, para um L_o de 40 mm, comparando o adesivo com maior resistência (Araldite® 2015) com os restantes, verificam-se diferenças de cerca de 5,6 kN e 2,5 kN, que correspondem a diferenças percentuais de 50% e 22%, para os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. Na verdade, os adesivos mais dúcteis (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) apresentam um comportamento bastante semelhante, em todos os L_o . Por outro lado, o adesivo Araldite® AV138 apresenta diferenças consideráveis, principalmente para os L_o entre 20 mm e 60 mm. Estas diferenças podem ser explicadas pelo comportamento frágil, característico deste adesivo.

3.2.1.5 Previsão da energia dissipada

A Figura 83 e Figura 84 e Figura 85 apresentam a variação de U quando é atingido P_{\max} em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Estes dados são também referentes juntas com R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm, respetivamente.

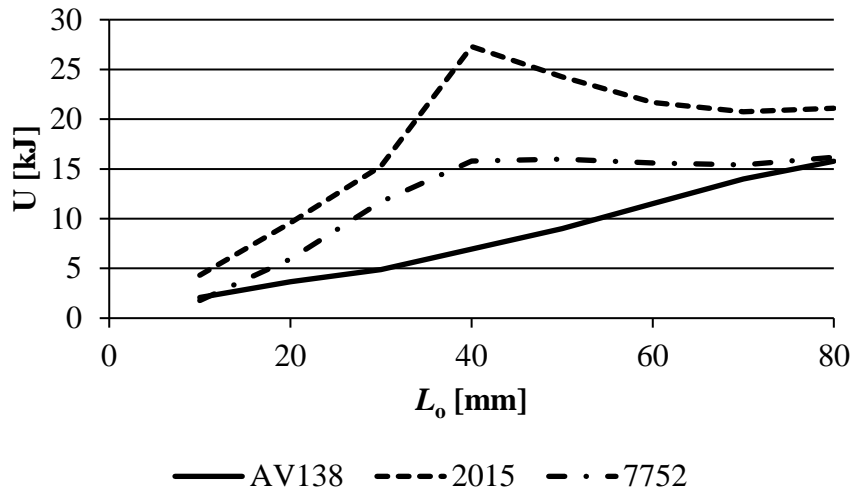


Figura 83 - Variação de U em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm.

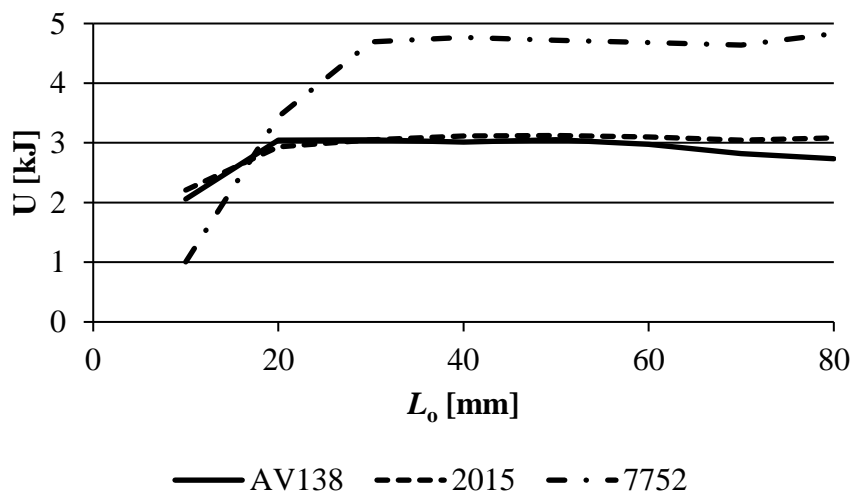


Figura 84 - Variação de U em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, t_p de 2,4 mm e R de 1000 mm.

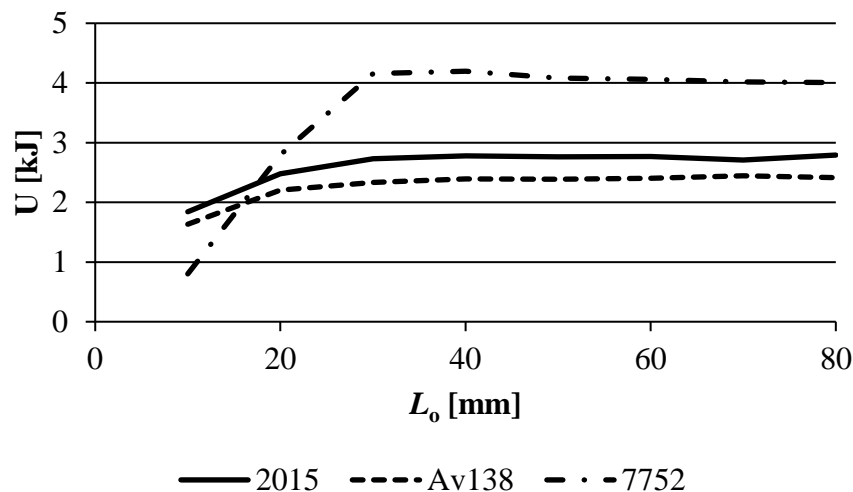


Figura 85 - Variação de U em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, com t_p de 3,6 mm e R de 1000 mm.

À semelhança do observado no estudo da resistência do adesivo, U no momento em que é atingido P_{max} , apesar de aumentar com o aumento de L_0 , tende a estabilizar num determinado valor. Isto sugere que o aumento do L_0 tem uma influência cada vez menor no ganho de U . A forma da curva de U do adesivo Araldite® 2015, para t_p de 1,2 mm (Figura 83), à semelhança da curva relativa à resistência do adesivo (Figura 80), é explicada por uma mudança no comportamento da junta. Aqui também a variação de U para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, para t_p de 2,4 mm é praticamente desprezável. Isto acontece porque a rotura intralaminar é predominante neste tipo de juntas. A diferença entre as curvas de U para t_p de 1,2 mm e 2,4 mm será explicada no subcapítulo 3.2.3.5. Focando nos valores de U relativos a juntas com t_p de 1,2 mm (Figura 83), verificam-se diferenças consideráveis ao longo dos L_0 estudados. Comparando o adesivo com melhor desempenho (Araldite® 2015), observam-se diferenças que, em média, atingem valores de 9,5 kJ e 5,7 kJ, que correspondem a valores percentuais de 53% e 34%, para os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Estas diferenças atingem valores máximos no L_0 de 40 mm, onde se observam diferenças de cerca de 20,4 kJ e 11,5 kJ, que correspondem a percentagens de 75% e 42%, para os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

3.2.2 Raio de curvatura dos aderentes

Nesta instância é feita uma análise dos resultados obtidos, em que é dado ênfase ao efeito que a variação de R representa nos parâmetros analisados.

3.2.2.1 Análise dos modos de rotura

Na Tabela 20 é apresentado modo de rotura dos três adesivos em estudo, em função de R . Estes dados são referentes a juntas com L_o de 10 mm e t_p de 1,2 mm. Através da análise dos resultados obtidos, verifica-se que a variação de R não tem qualquer efeito no modo de rotura das juntas. Esta conclusão mantém-se verdadeira independentemente do adesivo, L_o ou t_p analisado.

Tabela 20 - Modos de rotura em função de R para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, L_o de 10 mm e t_p de 1,2 mm.

Adesivo	R [mm]		
	1000	2000	3000
Araldite® AV138	C	C	C
Araldite® 2015	C	C	C
Sikaforce® 7752	C	C	C

3.2.2.2 Análise de tensões na junta

Na Figura 86 são apresentados os dados relativos à tensão de corte (τ_{xy}/τ_{avg}), para R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm. Para estas comparações foram usadas juntas com o adesivo Araldite® 2015, L_o de 10 mm e t_p de 1,2 mm.

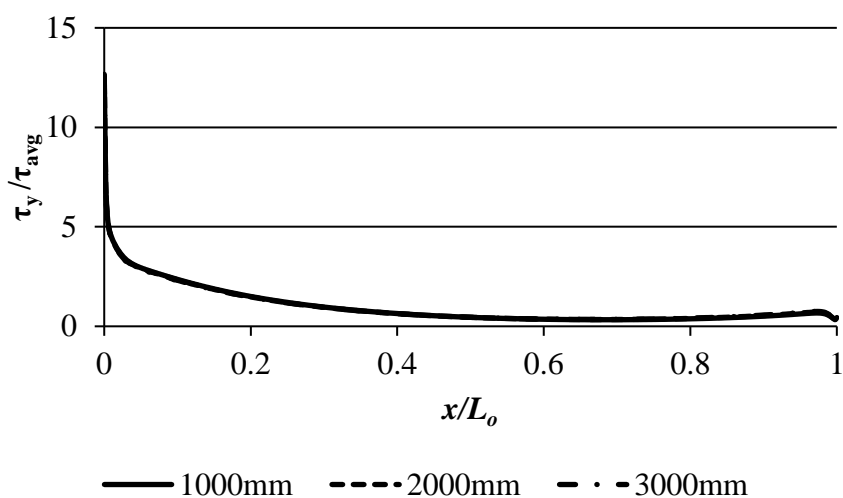


Figura 86 - Distribuição da tensão de corte ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, com L_o de 10 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

Analisando os dados relativos às tensões de corte, através da Figura 86 não é possível tirar nenhuma conclusão relativamente à influência de R no comportamento das mesmas. De facto, existem variações, mas estas não são perceptíveis em forma de gráficos sobrepostos. Na verdade, existem algumas variações relativas a picos de tensão que por serem relativamente baixas, não são visíveis nos gráficos. Assim, os

dados dos picos de tensões em cada uma das extremidades de L_o da junta são apresentados na Tabela 22.

Tabela 21 - Picos de tensão de corte para R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm, com o adesivo Araldite® 2015, L_o de 10 mm e t_p de 1,2 mm.

Picos de tensão	Raio de curvatura		
	1000 mm	2000 mm	3000 mm
Extremidade esquerda	12,66	12,59	12,48
Extremidade direita	0,67	0,72	0,75

A análise da Tabela 21 mostra que, ainda que as variações relativas à tensão de corte sejam baixas, já são visíveis. Verifica-se assim que, com o aumento de R , a tensão de corte máxima diminui. Por outro lado, os picos de tensão na extremidade direita de L_o aumentam. Estes dois factos indicam que um aumento de R leva a uma uniformização das tensões ao longo de L_o . Este fenómeno acontece, pois com R maiores a geometria da junta aproxima-se de uma junta com ressalto convencional, na qual a distribuição de tensões é mais uniforme.

Na Figura 87 é apresentada uma comparação entre a distribuição da tensão de arrancamento (σ_y/τ_{avg}) ao longo de L_o , para um R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm. Para esta comparação foram usadas juntas com adesivo Araldite® 2015, L_o de 10 mm e t_p de 1,2 mm.

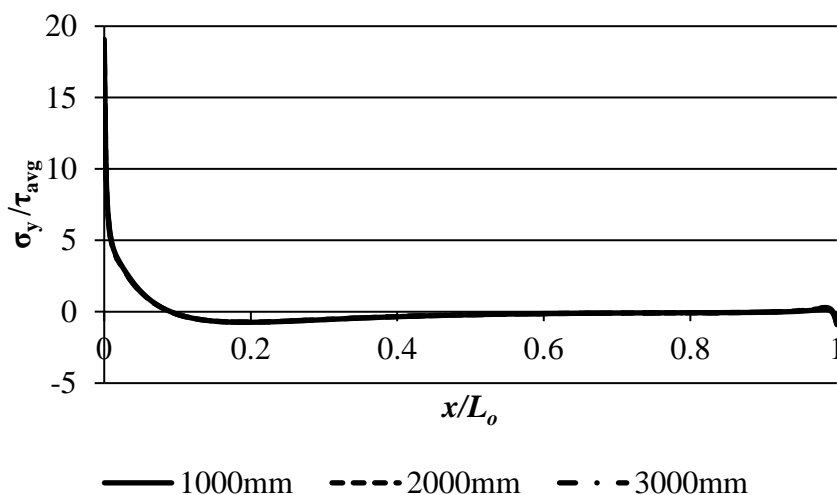


Figura 87 - Distribuição da tensão de arrancamento ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, L_o de 10 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

À semelhança do observado no estudo das tensões de corte, não é possível tirar qualquer conclusão acerca da influência de R no comportamento das tensões de arrancamento, através de gráficos sobrepostos. Efetivamente existem algumas variações relativas aos picos de tensão, no entanto são demasiado baixas. Assim, estes dados são apresentados na Tabela 22 para que seja possível a análise dos mesmos.

Tabela 22 - Picos de tensão de arrancamento para R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm, com o adesivo Araldite® 2015, L_o 10 mm e t_p 1,2 mm.

Stress peaks	R [mm]		
	1000	2000	3000
Left end	19,08	18,82	18,64
Right end	-0,90	-0,87	-0,85

A análise da Tabela 22 revela que, os picos de tensão na extremidade esquerda (tensão de arrancamento máxima) diminuem, com o aumento de R . Contrariamente aos dados observados na tensão de corte, na tensão de arrancamento, os picos de tensão da extremidade direita diminuem com o aumento de R . No entanto, estes picos apresentam valores negativos, o que representa um esforço de compressão. Ou seja, neste caso, a diminuição dos picos de tensão está também associada à uniformização de tensões ao longo de L_o . Assim, os comportamentos gerais das tensões de arrancamento e de corte encontram-se em conformidade.

3.2.2.3 Estudo da variável de dano

Na Figura 88, Figura 89 e Figura 90 é apresentada, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente, a comparação da variação da variável SDEG ao longo de L_o , entre um R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm. Neste caso, foram usadas juntas com L_o de 40 mm e t_p de 1,2 mm.

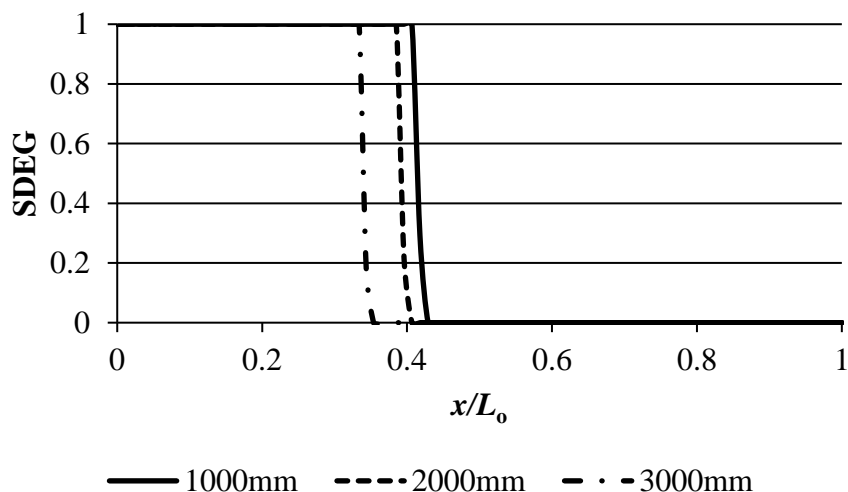


Figura 88 - Variação da variável SDEG ao longo de L_o para o adesivo Araldite® AV138, L_o de 40 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

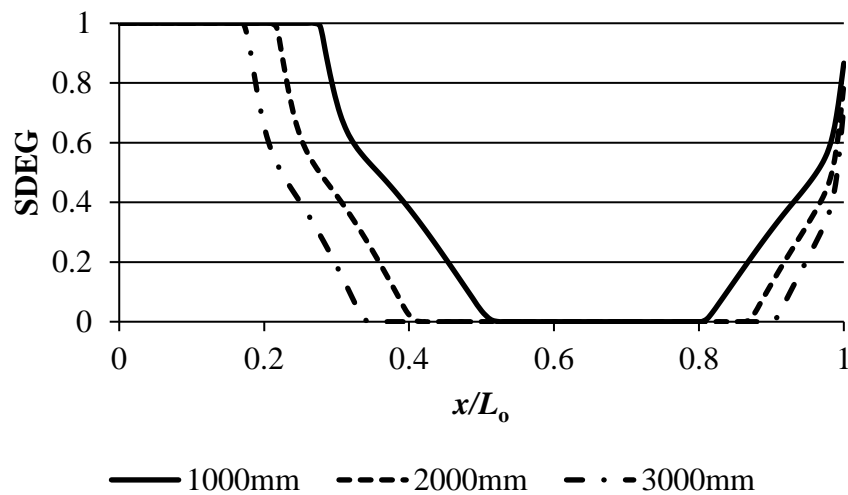


Figura 89 - Variação da variável SDEG ao longo de L_0 para o adesivo Araldite® 2015, L_0 de 40 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

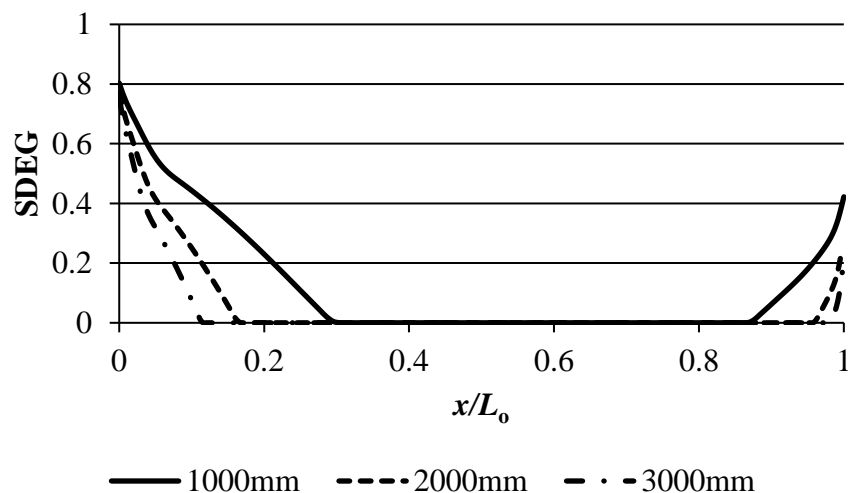


Figura 90 - Variação da variável SDEG ao longo de L_0 para o adesivo Sikaforce® 7752, L_0 de 40 mm, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

Ao contrário do observado no estudo das tensões, a influência de R na variável SDEG é bastante visível. Verifica-se que, independentemente do adesivo, com o aumento de R , o dano ao longo de L_0 tende a diminuir, pelo que existe uma zona maior sem dano. Verifica-se também que existe uma diminuição do dano nas duas extremidades de L_0 , ainda que seja mais evidente nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Este comportamento vai de encontro ao analisado anteriormente, no comportamento das tensões, onde estas tendem a uniformizar-se com o aumento de R . Este fenómeno reflete-se assim na variável SDEG, que também sofre uma uniformização com o aumento de R . A ductilidade dos adesivos revela-se também um fator relevante na análise dos dados obtidos. Verifica-se que, em adesivos dúcteis, como é o caso do

Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, não só a diminuição do dano ao longo da camada adesiva é menos acentuada, como também a zona sem dano é maior. De facto, comparando as juntas com R de 1000 mm e 3000 mm, a zona sem dano deixa de se iniciar a 0,54 de x/L_0 para se iniciar a 0,34, no adesivo Araldite® 2015. No adesivo Sikaforce® 752 o início da zona sem dano passa de 0,29 de x/L_0 para 0,11. Já no adesivo Araldite® AV138, a zona sem dano passa de 0,42 de x/L_0 para apenas 0,35. Assim, verifica-se que adesivos mais dúcteis apresentam um aumento maior da zona sem dano, à medida que R é aumentado.

3.2.2.4 Previsão da resistência

Na Figura 91, Figura 92 e Figura 93 é apresentada a variação da resistência das juntas em função de L_0 , para um R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm. Estas figuras correspondem aos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, respetivamente. Para esta comparação foram usadas juntas com t_p de 1,2 mm.

A análise dos dados obtidos indica que, R tem uma influência diminuta na resistência da junta, uma vez que as curvas da variação de P_{max} são quase indistinguíveis, para qualquer um dos adesivos em estudo. Ao contrário do que sucedeu na análise das tensões, aqui não serão apresentados os dados sob a forma de tabela, uma vez que, a diferença de resistência para diferentes valores de R é quase nula, sendo que em média é inferior a 1%.

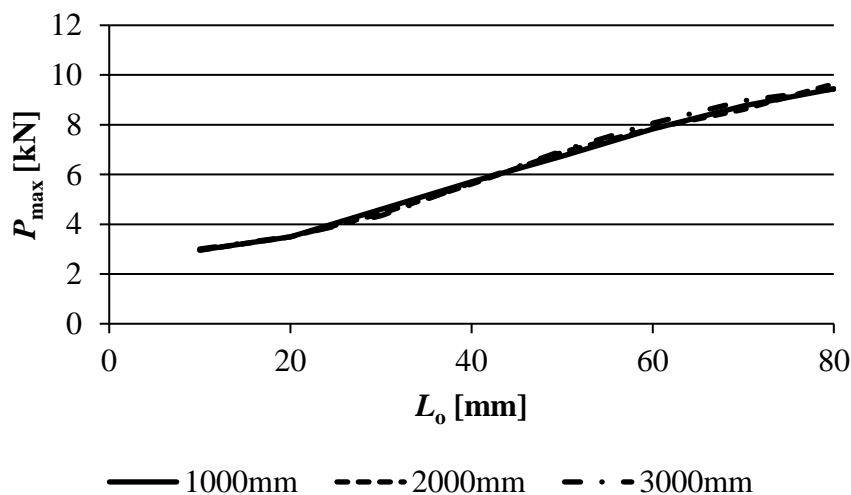


Figura 91 - Variação de P_{max} em função de L_0 para o adesivo Araldite® AV138, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

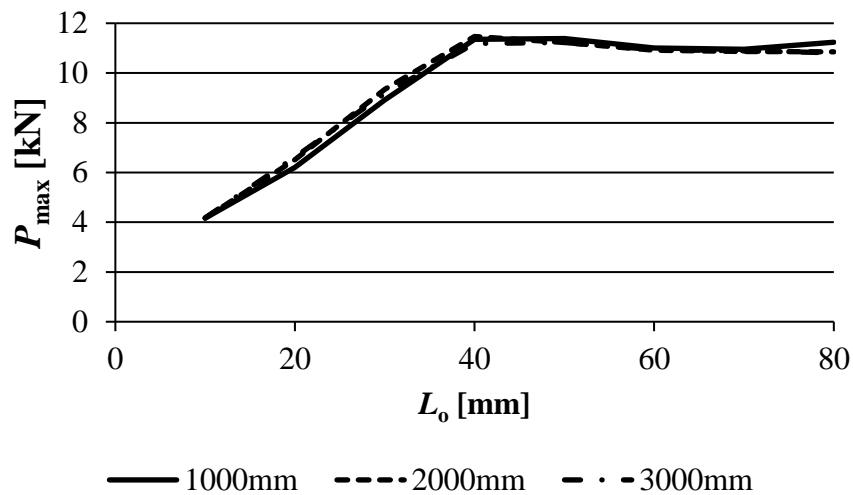


Figura 92 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

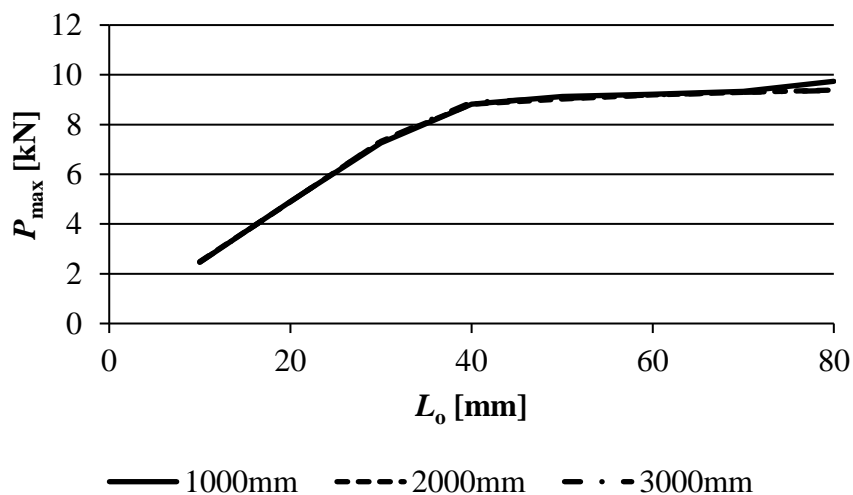


Figura 93 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

3.2.2.5 Previsão da energia dissipada

Na Figura 94, Figura 95 e Figura 96, que correspondem, respetivamente, aos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, é feita a comparação entre U em função de L_o para diferentes R , neste caso 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm. Para esta análise foram usadas juntas com t_p de 1,2 mm.

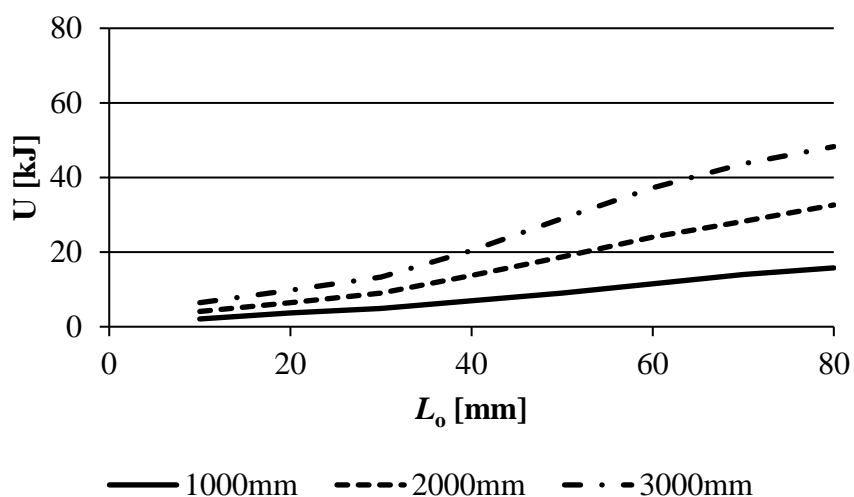


Figura 94 - Variação de U em função de L_o para o adesivo Araldite® AV138, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

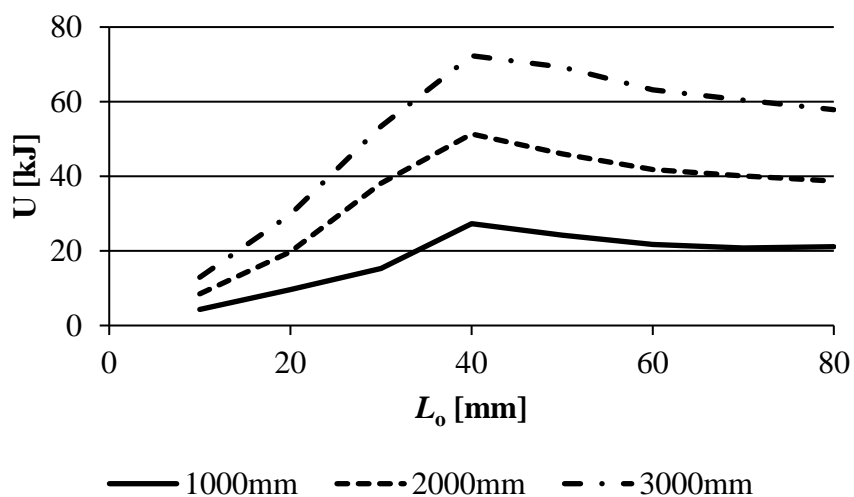


Figura 95 - Variação de U em função de L_o para o adesivo Araldite® 2015, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

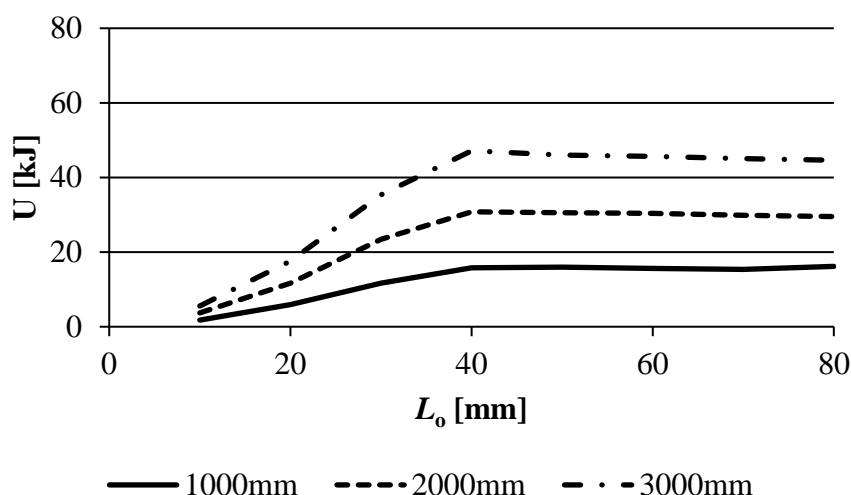


Figura 96 - Variação de U em função de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, t_p de 1,2 mm e R de 1000 mm, 2000 mm e 3000 mm.

Observando os valores de U para cada R , verifica-se que esta é tanto maior quanto maior o R . Numericamente, a diferença entre U é também tanto maior quando maior o L_o . Por exemplo, para uma junta com adesivo Araldite® 2015 e L_o de 10 mm, a diferença entre U numa junta com R de 1000 mm e 3000 mm, é de cerca de 8,6 kJ. Já para uma junta com o mesmo adesivo, mas L_o de 80 mm, a diferença entre valores de U é de cerca de 36,8 kJ. No entanto, percentualmente estes ganhos são bastante semelhantes, correspondendo a 67% e 64% para o L_o de 10 mm e 80 mm, respetivamente. O aumento de U com o aumento de R encontra-se de acordo com o comportamento das tensões e variável de dano, no sentido em que um junta com maior R apresenta um desempenho melhor. Neste caso, maiores valores de U significa um maior aproveitamento da capacidade do adesivo se deformar, que é uma das principais metas a atingir no dimensionamento de uma junta adesiva. Isto, mais uma vez, acontece porque as juntas com R de 3000 mm apresentam uma geometria mais próxima às juntas com ressalto tradicionais, onde efeitos da curvatura dos substratos não existe.

3.2.3 Espessura dos aderentes

Por fim, os dados obtidos são analisados dando especial atenção aos efeitos produzidos pela espessura dos aderentes em todos os parâmetros analisados.

3.2.3.1 Análise dos modos de rotura

Na Tabela 23 é apresentada a variação do modo de rotura das juntas com os três adesivos em estudo, em função de t_p . Para esta comparação foram usadas juntas com L_o de 30 mm e R de 1000 mm. Através da análise dos dados obtidos, constata-se que

um aumento de t_p resulta sempre numa mudança do modo de rotura, neste caso, de coesiva para intralaminar.

Tabela 23 - Modos de rotura em função de t_p para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce 7752, L_o de 30 mm e R de 1000 mm.

Adesivo	t_p [mm]		
	1,2	2,4	3,6
Araldite® AV138	C	C	I
Araldite® 2015	C	I	I
Sikaforce® 7752	C	I	I

3.2.3.2 Análise de tensões na junta

Na Figura 97 é feita a comparação da evolução da tensão de corte (τ_{xy}/τ_{avg}) ao longo do comprimento de sobreposição. Para isso, são apresentadas três curvas, relativas aos t_p estudados (1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm). Para esta comparação foram utilizadas juntas com adesivo Araldite® 2015, L_o de 10 mm e R de 1000 mm.

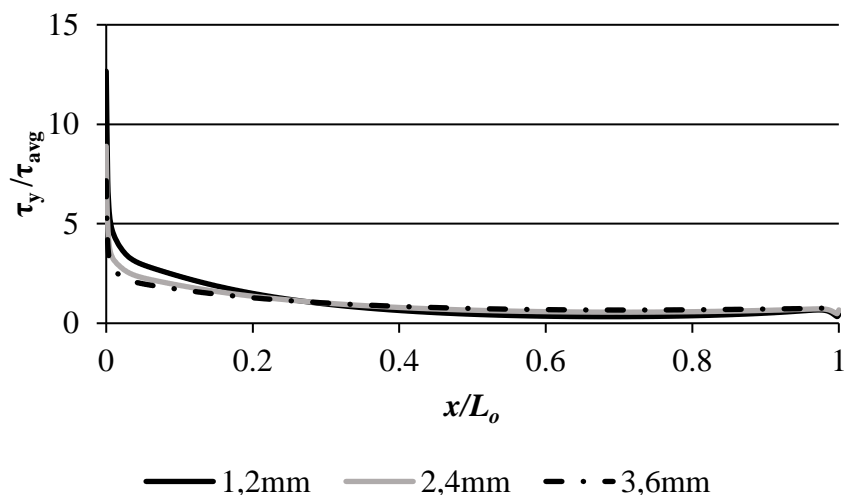


Figura 97 - Distribuição da tensão de corte ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, R de 1000 mm, L_o de 10 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

Pela análise da tensão de corte, verifica-se que com o aumento de t_p , dá-se uma diminuição considerável da tensão máxima (extremidade esquerda de L_o). Por outro lado, ainda que relativamente baixo, ocorre um aumento do pico de tensão na extremidade direita de L_o . Assim, no que diz respeito à tensão de corte, o aumento de t_p é um fator benéfico para as juntas, uma vez que promove a uniformização das tensões ao longo de L_o .

Na Figura 98 é apresentado a evolução da tensão de arrancamento (σ_y/τ_{avg}) ao longo de L_o , para cada um dos t_p estudados. Para esta comparação foram usadas juntas com adesivo Sikaforce® 7752, com L_o de 10 mm e R de 1000 mm.

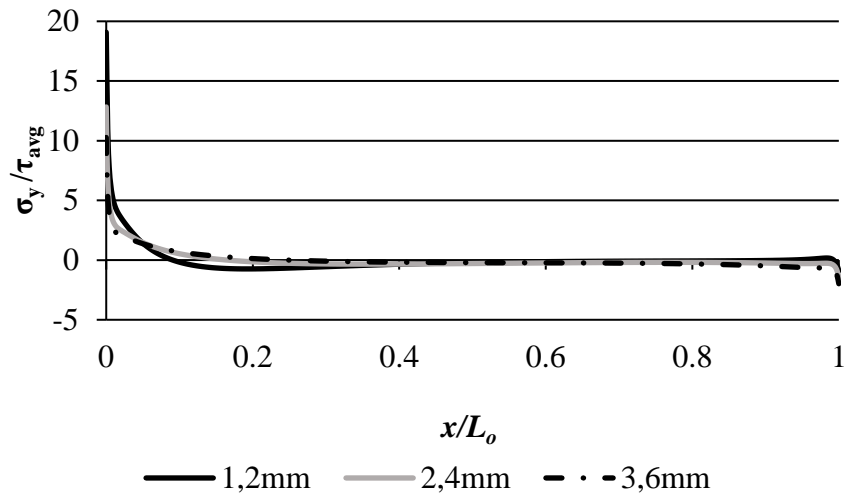


Figura 98 - Distribuição da tensão de arrancamento ao longo de L_o para o adesivo Araldite® 2015, R de 1000 mm, L_o de 10 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

Analisando a tensão de arrancamento, à semelhança da tensão de corte, um aumento de t_p promove uma redução na tensão de arrancamento máxima, observada na extremidade esquerda da ligação. Já no que diz respeito à extremidade direita de L_o , o aumento de t_p promove um aumento do pico de tensões. No entanto, esta tensão tem um valor negativo, pelo que nesta zona o adesivo se encontra à compressão, que é tipo de carregamento mais vantajoso em ligações adesivas. Assim, mais uma vez, é possível afirmar que, em termos de tensões, um aumento de t_p é benéfico para o desempenho da junta.

3.2.3.3 Estudo da variável de dano

Na Figura 99, Figura 100 e Figura 101 é apresentada uma comparação da variável SDEG ao longo de L_o , para t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm e R de 1000 mm. Para esta análise foram usadas juntas com adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Os dados relativos ao adesivo Araldite® AV138 foram obtidos a partir de juntas com L_o de 40 mm. Os dados dos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 foram obtidos a partir de juntas com L_o de 10 mm.

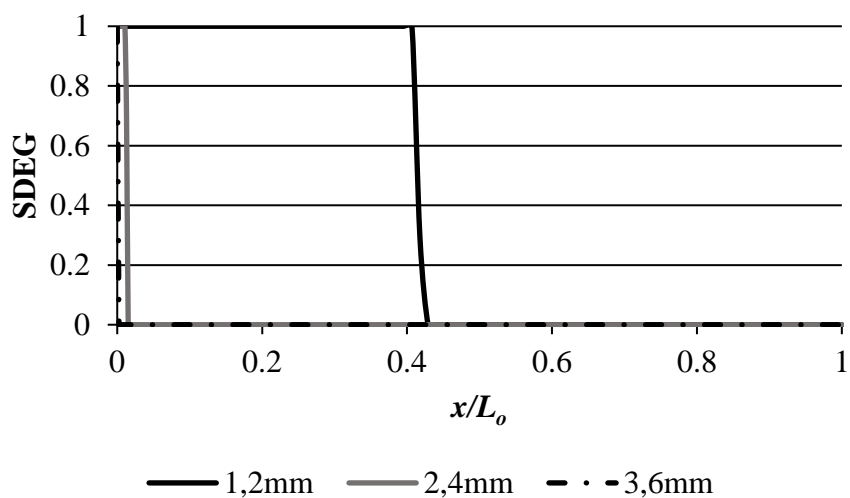


Figura 99 - Variação da variável SDEG ao longo de L_0 para o adesivo Araldite® AV138, L_0 de 40 mm, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

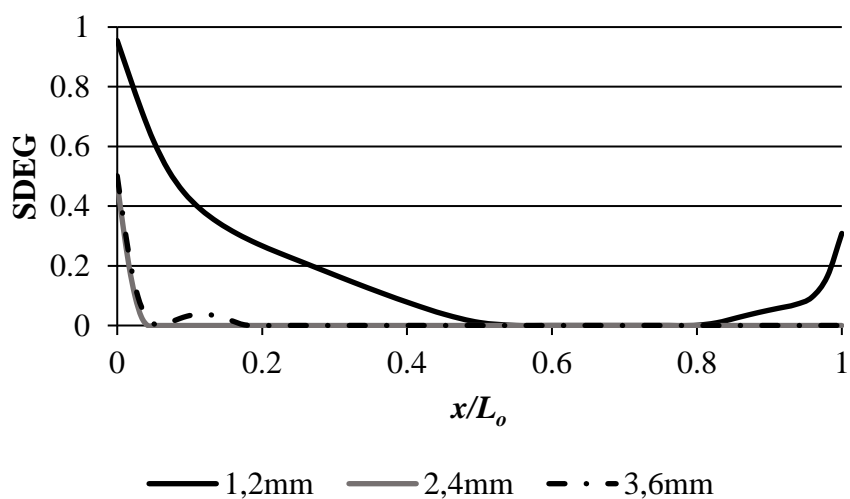


Figura 100 - Variação da variável SDEG ao longo de L_0 para o adesivo Araldite® 2015, L_0 de 10 mm, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

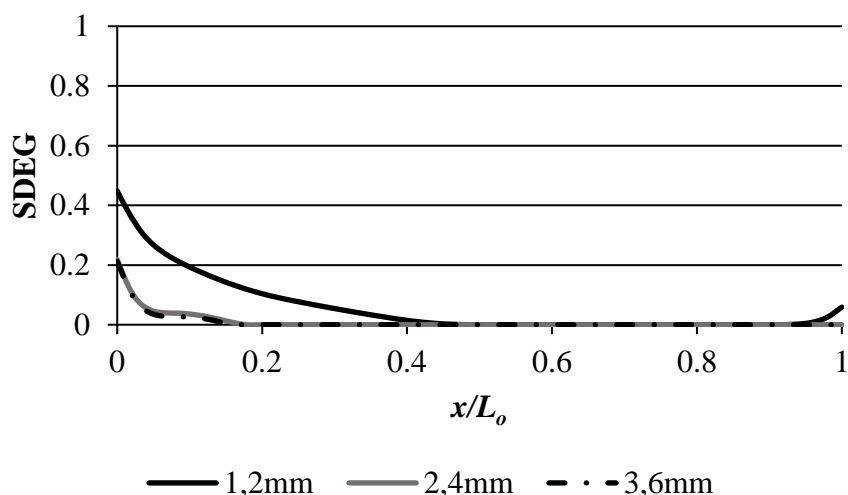


Figura 101 - Variação da variável SDEG ao longo de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, L_o de 10 mm, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

Avaliando o comportamento da variável SDEG verifica-se que, o com o aumento de t_p , existe uma redução global do dano ao longo de L_o . Na verdade, na extremidade direita de L_o , para t_p maiores, o adesivo não sofre qualquer dano. Esta diferença é bastante elevada entre t_p de 1,2 mm e 2,4 mm, no entanto entre t_p de 2,4 mm e 3,6 mm já não há variação visível nas juntas. A redução do dano nas extremidades de L_o está de acordo com o comportamento das tensões, ou seja, uma vez que existe uma redução dos picos de tensão, com o aumento de t_p é expectável que o dano nessas zonas também diminua. As alterações na variável de dano verificadas com o aumento de t_p podem também ser explicadas pela alteração do modo de rotura. Como se pode verificar na Tabela 23, com o aumento de t_p , o modo de rotura nos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 passa de coesivo (t_p de 1,2 mm) para intralaminar (t_p de 2,4 mm e 3,6 mm). Assim, seria expectável que a variável SDEG fosse semelhante em juntas com t_p de 2,4 mm e 3,6 mm, uma vez que a rotura não se dá pelo adesivo, em nenhum dos casos. Já no adesivo Araldite® AV138 esta mudança no modo de rotura só ocorre em t_p de 3,6 mm.

3.2.3.4 Previsão da resistência

De seguida, na Figura 102, Figura 103 e Figura 104 é apresentada a variação da resistência das juntas com ressalto em função do L_o , para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Uma vez que o objetivo é comparar o efeito de t_p , em cada uma das figuras são apresentadas três curvas, referentes a cada t_p estudado (1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm). Para esta comparação foram usadas juntas com R de 1000 mm.

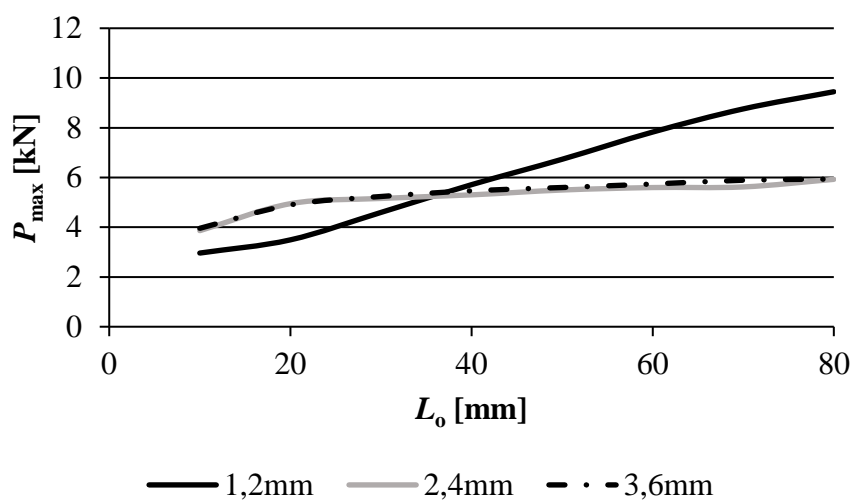


Figura 102 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Araldite® AV138, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

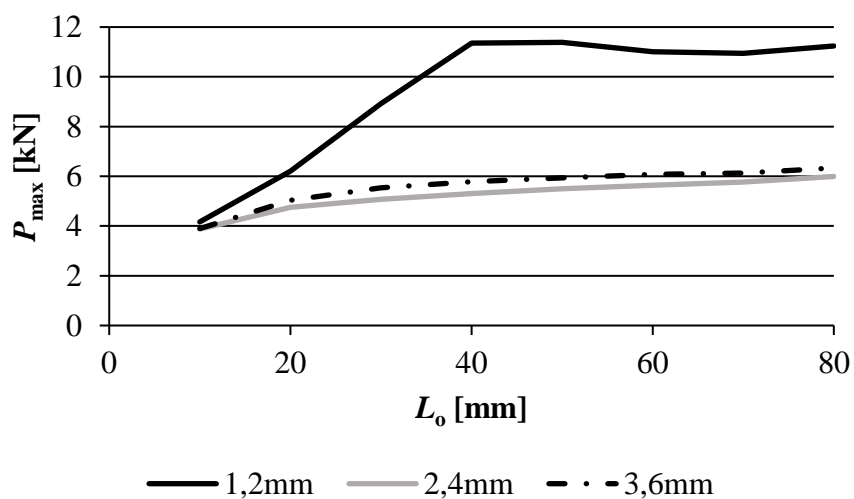


Figura 103 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Araldite® 2015, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

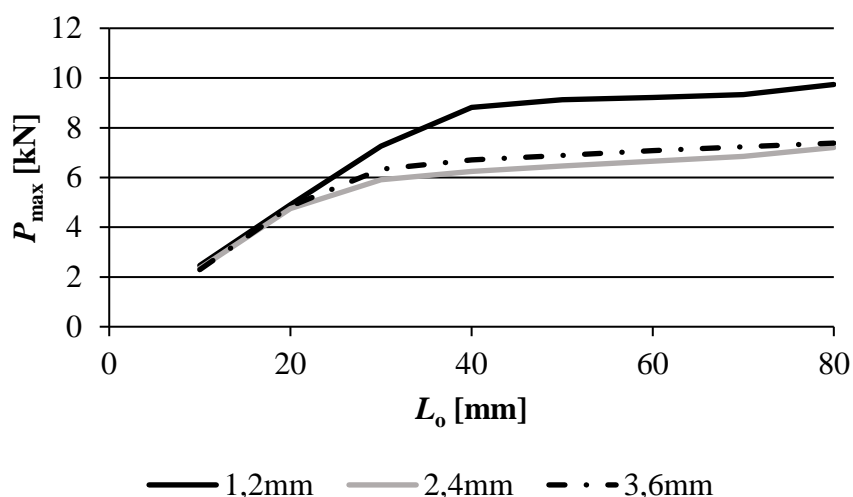


Figura 104 - Variação de P_{max} em função de L_o para o adesivo Sikaforce® 7752, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

Analisando os dados relativos à resistência da junta é possível observar que a t_p com melhor desempenho global é de 1,2 mm. Este facto é ainda mais visível para valores maiores de L_o , onde a diferença de resistência chega a ser de 5 kN, que representa uma diferença percentual de 49%. Para t_p de 1,2 mm todos os adesivos apresentam um crescimento acentuado, mas que aparenta tender para um valor constante. Já nas espessuras de 2,4 mm e 3,6 mm observam-se dois comportamentos diferentes. Nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 o ganho em termos de resistência entre L_o de 10 mm e 80 mm é de apenas, cerca de 2 kN. Isto acontece por dois motivos. O primeiro relaciona-se com o modo de rotura, e explica o comportamento de Araldite® 2015. Uma vez que o modo de rotura nestas juntas é exclusivamente intralaminar, não é tirado proveito de todas as capacidades deste adesivo. O segundo motivo relaciona-se com as propriedades intrínsecas do adesivo. Sendo o Araldite® AV138 um adesivo bastante frágil, assim que é atingido o limite elástico ocorre rotura do adesivo, o que pode explicar o ganho tão reduzido em termos de resistência. Por fim, e analisando ainda a resistência da junta para t_p de 2,4 mm e 3,6 mm, o adesivo Sikaforce® 7752 destaca-se pela positiva. Neste caso, houve um ganho na resistência entre L_o de 10 mm e 80 mm de cerca de 5 kN. Este ganho é bastante superior aos restantes adesivos e pode ser explicado pela ductilidade deste adesivo. Assim, mesmo após ser atingido o limite elástico, este ainda é capaz de se deformar, suportando assim carregamentos mais elevados.

3.2.3.5 Previsão da energia dissipada

Por fim, é apresentada na Figura 105, Figura 106 e Figura 107 uma comparação entre U quando é atingido o P_{\max} em função de L_o , para t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm. Estas figuras são referentes aos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Para esta análise foram usadas juntas com R de 1000 mm.

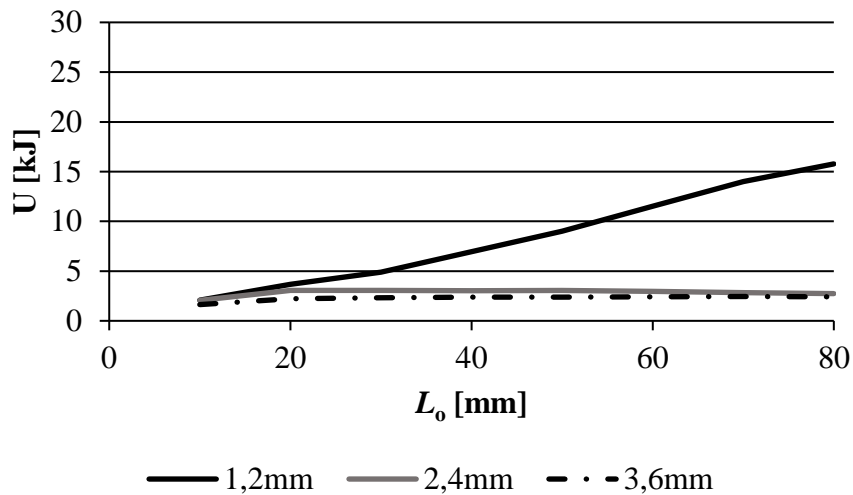


Figura 105 - Variação de U em função de L_o pra o adesivo Araldite® AV138, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

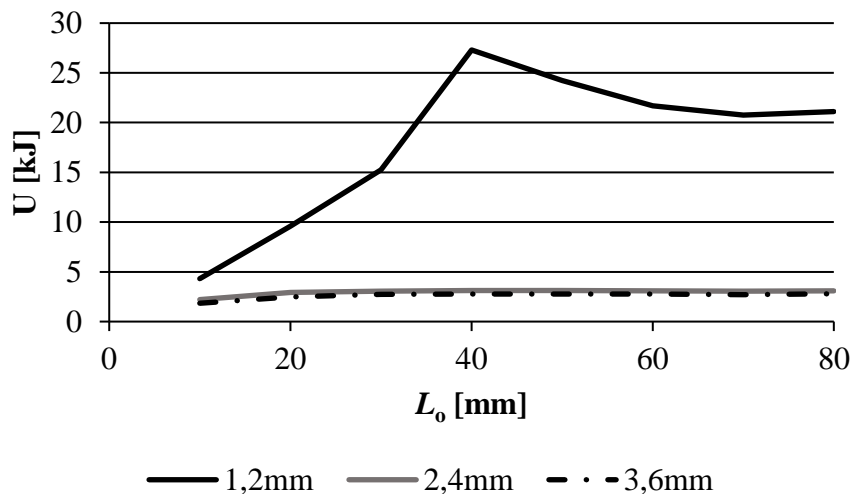


Figura 106 - Variação de U em função de L_o pra o adesivo Araldite® 2015, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

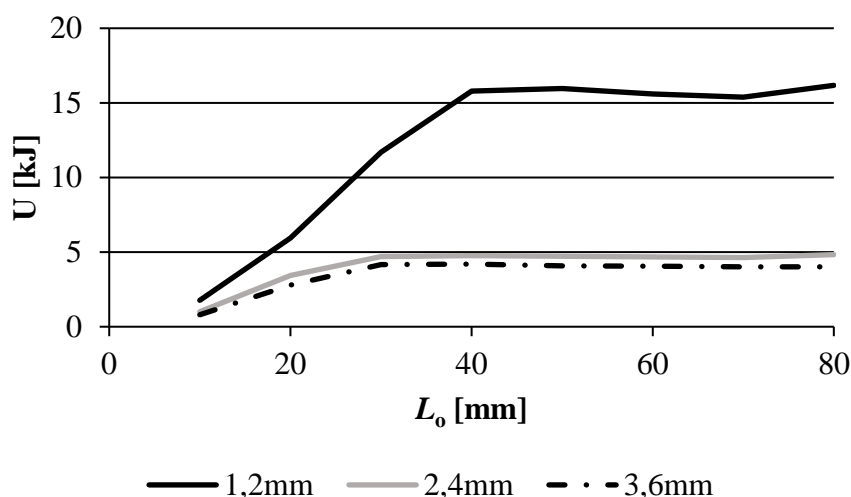


Figura 107 - Variação de U em função de L_o pra o adesivo Sikaforce® 7752, R de 1000 mm e t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

Na análise de U , novamente, é visível uma diferença drástica comparando t_p de 1,2 mm com 2,4 mm e 3,6 mm. Mais uma vez, é possível observar que a variação de U nas espessuras de 2,4 e 3,6 mm é quase nula, apresentando sempre valores muito baixos, para os três adesivos. Por comparação, a espessura de 1,2 mm apresenta um ganho em U de cerca de 14 kJ e uma diferença de cerca de 11 kJ para t_p de 2,4 mm e 3,6 mm. Este facto pode também ser explicado pelo facto de a rotura da ligação se dar exclusivamente pelo adesivo, para t_p de 1,2 mm, o que não se verifica nas restantes espessuras. Assim, espelhando a previsão de resistência, em termos de U quando é atingido P_{max} , t_p de 1,2 mm é a mais vantajosa, pois tira maior proveito da capacidade de deformação do adesivo.

3.2.4 Discussão dos resultados obtidos

Com a alteração dos parâmetros geométricos L_o , R e t_p , verificaram-se diversas alterações ao nível dos modos de rotura, tensões de corte e arrancamento, dano ao longo de L_o , resistência da junta e U quando é atingido P_{max} . No que diz respeito ao L_o , um aumento deste parâmetro resultou num aumento global de todas as variáveis em estudo. Verificou-se que um aumento de L_o resultou na alteração do modo de rotura, de coesivo para intralaminar, no adesivo Sikaforce® 7752. Nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, L_o não influenciou o modo de rotura. A nível de tensões (corte ou arrancamento), este aumento é constante em todos os adesivos, sendo que o Araldite® AV138 apresenta um gradiente de tensões mais elevado. Na variável SDEG, notou-se que existe sempre uma zona de L_o onde não ocorre qualquer dano, esta zona atinge um valor mínimo para L_o de 30 mm ou 40 mm e tende a aumentar novamente até atingir o L_o máximo. O dano nas extremidades de L_o tem um comportamento idêntico ao descrito. O adesivo Sikaforce® 7752 é o único cujo dano

não atinge valores de 100%. A resistência da junta e U apresentam comportamentos idênticos, na medida em que, um aumento de L_0 promove o aumento das duas variáveis, no entanto este aumento tende a estabilizar em determinados valores.

O parâmetro R foi o que causou um efeito menor nas variáveis estudadas. Em relação ao modo de rotura este parâmetro não mostrou qualquer influência, mantendo-se constante para os três R estudados. No que diz respeito à tensão de corte, um aumento de R leva a uma diminuição da tensão máxima (extremidade esquerda de L_0), e a um aumento do pico de tensão na extremidade direita. Na tensão de arrancamento, o comportamento foi idêntico, aumentando na extremidade esquerda e diminuindo na extremidade direita. Ainda que todas as variações sejam relativamente baixas, tudo indica que um aumento de R , leva a uma uniformização das tensões. Isto porque a curvatura dos aderentes tem um efeito cada vez menor na junta, uma vez que esta está cada vez mais próxima de juntas de ressalto convencionais. Os dados da variável SDEG estão de acordo com a análise de tensões, ou seja, o dano ao longo de L_0 tende a diminuir, para R maiores. Assim, ocorre também uma uniformização do dano com o aumento deste parâmetro. A influência do parâmetro R não surtiu qualquer efeito na variação da resistência da junta, apresentando diferenças entre valores de resistência inferiores a 1%. Os valores de U voltam a estar em concordância com o comportamento das tensões e variável SDEG, pois o aumento de R tem um resultado positivo neste parâmetro. Na verdade, o ganho em U chega a ser de quase 70% entre R de 1000 mm e 3000 mm, onde o R maior apresenta o maior valor de U .

Relativamente à influência de t_p , este foi o parâmetro que produziu efeitos maiores no desempenho das juntas. Um aumento de t_p de 1,2 mm para 2,4 mm resultou sempre na alteração do modo de rotura, de coesivo para intralaminar. Em relação às tensões de corte e arrancamento, no geral, para maiores t_p há uma diminuição da tensão máxima, que ocorre na extremidade esquerda de L_0 . Em relação à extremidade direita, verificam-se comportamentos diferentes para a tensão de corte e arrancamento, mas que produzem o mesmo efeito. Na tensão de corte, há uma diminuição no valor deste pico de tensão, o que é benéfico para o desempenho da junta. Já na tensão de arrancamento, este pico de tensão aumenta. No entanto, sendo esta tensão negativa, significa que o adesivo se encontra a compressão, o que também é benéfico para o desempenho da junta. Os resultados relativos ao dano ao longo da camada de adesivo encontram-se de acordo com o comportamento das tensões. Assim, uma vez que para maiores t_p ocorre uma diminuição dos picos de tensão, ocorre também uma redução do dano ao longo de L_0 . Na verdade, para t_p de 2,4 mm e 3,6 mm o dano na extremidade direita é quase inexistente. Por fim, analisando a resistência da junta e U , verifica-se que estas duas variáveis não se encontram em concordância com as demais. Isto advém do facto de que U e a resistência da ligação estarem diretamente relacionadas com o modo de rotura da junta, fator esse que foi bastante influenciado pelo aumento de t_p . Assim, enquanto em t_p de 1,2 mm a rotura se deu

maioritariamente pelo adesivo, em t_p de 2,4 mm, e especialmente de 3,6 mm, a rotura deu-se quase exclusivamente pela camada intralaminar, o que afetou fortemente estes dados. As juntas com t_p de 1,2 mm apresentaram sempre melhor desempenho face às demais, independentemente do adesivo. As diferenças entre os valores de resistência são bastante elevadas, chegando a atingir 5 kN, o que corresponde a uma diferença percentual de 47%. As ligações com t_p de 2,4 mm e 3,6 mm apresentaram sempre valores de resistência bastante idênticos, sendo que as juntas com t_p de 3,6 mm exibiram valores ligeiramente superiores.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

No presente capítulo é feito um resumo do trabalho desenvolvido no capítulo anterior, e são tecidas algumas conclusões relativas ao comportamento deste tipo de juntas. Por fim, são realizadas algumas propostas de trabalhos futuros no âmbito de juntas com curvatura.

4.1 Conclusões

Após a validação da aplicação do método numérico no estudo da previsão de resistência de JSS, procedeu-se ao estudo de juntas curvas com ressalto, através do *software* Abaqus®. Os dados fornecidos pelo *software* apresentam-se sob a forma de curvas P - δ para o estudo da resistência da junta (neste caso, P_{max}), modos de rutura, curvas de dano, que traduzem degradação da camada adesiva ao longo de L_o , e curvas alusivas à distribuição das tensões de corte (τ_{xy}/τ_{avg}) e arrancamento (σ_y/τ_{avg}) ao longo de L_o . Os dados relativos a U foram obtidos através das curvas P - δ .

No que diz respeito aos modos de rutura verificou-se que, independentemente do parâmetro variável, apenas se verificaram dois tipos de rutura, coesiva e intralaminar. Verificou-se também que, com o aumento de determinados parâmetros, o modo de rutura passava de coesivo para intralaminar, no entanto o contrário nunca se verificou. O parâmetro que se revelou mais influente, no que diz respeito ao modo de rutura, foi o t_p . Um aumento deste parâmetro resultou sempre numa mudança de modo de rutura. Já um aumento de L_o apenas teve efeito nos modos de rutura do adesivo Sikaforce® 7752. O parâmetro geométrico R não produziu qualquer efeito no modo de rutura, independentemente do adesivo, L_o ou t_p utilizado na comparação.

O estudo das tensões de corte e arrancamento mostrou que, o formato destas se mantem idênticos ao longo de todo o estudo. Apresentando sempre um primeiro pico de tensão na extremidade esquerda de L_o e um segundo pico de tensão, ainda que com valores muito baixos, localizado na extremidade direita de L_o , que mantem valores positivos na tensão de corte e atinge valores negativos na tensão de arrancamento. Entre estes picos, normalmente a tensão instalada apresenta alores quase nulos. As tensões máximas, independentemente do tipo de adesivo ou dos valores dos parâmetros de controlo estiveram sempre localizadas na extremidade esquerda de L_o . Aliás, a rutura de todas as juntas ocorreu sempre nessa zona. A concentração de tensões nesta zona já seria espectável, uma vez que mesmo em

juntas com ressalto convencionais esta é a zona mais vulnerável da ligação. A curvatura das juntas veio amplificar ainda mais este efeito. Em relação aos parâmetros de controlo, L_0 foi o que surtiu maior efeito, no que diz respeito às tensões. Um aumento deste resultou, em todos os casos, no aumento das tensões internas do adesivo. A influência de R , ainda que bastante pequena, foi também observada. Notou-se que, com o aumento de R , as tensões tendem a uniformizar-se ao longo da camada de adesivo. Isto porque, quanto maior o valor de R , mais a junta se assemelha a uma junta convencional, onde não há qualquer efeito causado pela curvatura. A influência de t_p foi um pouco mais visível, um aumento desta promove um aumento no desempenho da junta, uma vez que ocorre uma diminuição da tensão máxima. Em relação aos adesivos, o Araldite® AV138 apresentou o maior gradiente de tensões, fruto da sua elevada rigidez e baixa ductilidade, e por isso possui também tensões máximas maiores, quando comparado com os restantes.

O comportamento da variável SDEG esteve sempre de acordo com as tensões de corte e arrancamento, apresentando dois picos de dano, um em cada extremidade de L_0 , sendo o pico da extremidade esquerda aquele com dano máximo ao longo da camada de adesivo, e o pico da extremidade direita relativamente mais baixo, sendo por vezes inexistente. Verificou-se também a existência de uma zona central de L_0 onde nunca ocorre qualquer dano. Com a variação do parâmetro L_0 observou-se que o dano é máximo e a zona de L_0 sem qualquer dano mínima para um L_0 de 40 mm. Este fenómeno está relacionado com o modo de rotura das juntas, uma vez que para L_0 inferiores a 40 mm, o modo de rotura é exclusivamente coesivo, no entanto para L_0 superiores a 40 mm observam-se duas situações, o modo de rotura passa a ser intralaminar, ou continua a ser coesivo com algum dano também presente na camada intralaminar. Através da variação do R foi também possível observar-se uma redução do dano nas extremidades de L_0 , bem como uma uniformização do dano ao longo da junta. Com o aumento de t_p verificou-se uma redução drástica do dano máximo e um aumento da zona em que não ocorre qualquer dano na camada adesiva. No entanto, o modo de rotura foi um fator determinante para que tal ocorresse, uma vez que este se altera quando a t_p é aumentada. No que diz respeito aos adesivos, o Sikaforce® 7752, fruto da alta ductilidade, apresentou, em geral, uma melhor distribuição do dano ao longo da camada de adesivo, seguido de perto pelo Araldite® 2015. Já o Araldite® AV138, uma vez que é um adesivo frágil, mostrou-se pouco capaz de uma distribuição do dano uniforme, apresentando quedas fortes no dano entre elementos de adesivo consecutivos.

Uma vez que U é obtida em função da resistência da junta, e que, à exceção da variação do parâmetro geométrico R , ambas apresentaram resultados semelhantes, estas são analisadas em conjunto. Um aumento do L_0 resultou sempre num aumento da resistência da junta e U , ainda que a diferentes níveis dependendo do adesivo. Este aumento apresentou, em todos os casos, uma tendência para que fosse atingido um

valor constante, que indica que o aumento de L_0 produz cada vez menos efeito no aumento de U e resistência da junta. Relativamente ao efeito causado pela variação de R , os dados não estão em concordância. Enquanto a resistência da junta se mantém praticamente a mesma, com variações inferiores a 1%, o mesmo não se verifica em termos de U . Na verdade, um aumento de R causa um aumento considerável de U , aumentando assim o desempenho destas juntas. Isto acontece, uma vez que um aumento de R reduz os efeitos da curvatura nas juntas, o que permite que estas sejam capazes de aproveitar mais a capacidade de deformação do adesivo. O parâmetro geométrico t_p destacou-se como sendo o que surtiu um efeito mais acentuado nestas variáveis. Um aumento deste parâmetro resulta numa redução, tanto de U , como da resistência da junta. Isto deve-se ao facto de t_p influenciar também o modo de rotura das juntas. Assim, enquanto para t_p de 1,2 mm a rotura tem lugar maioritariamente pelo adesivo, para t_p de 2,4 mm e 3,6 mm, a rotura dá-se, quase exclusivamente, pela camada intralaminar. Por esta razão, o ganho em U e resistência da junta são muito baixos para espessuras maiores, especialmente em adesivos com baixa ductilidade. Relativamente aos adesivos, o Sikaforce® 7752 foi capaz de apresentar melhor desempenho nas juntas com t_p de 2,4 mm e 3,6 mm. No entanto, no geral, o Araldite® 2015 apresentou um melhor desempenho em termos de U e resistência máxima. O adesivo Araldite® AV138 apresentou sempre resultados relativamente mais baixos, em qualquer uma das espessuras.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

O estudo de juntas curvas continua a ser um tópico de investigação recente, e por isso, o conhecimento acerca do seu comportamento ainda é um pouco escasso. Assim, de seguida, são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros, consideradas relevantes para um melhor entendimento deste tipo de juntas

- Ensaio experimentais para a caracterizar juntas curvas;
- Simulação numérica de outras geometrias com curvatura dos substratos;
- Simulação numérica de juntas curvas com alteração do material dos substratos para alumínio;
- Utilização de diferentes métodos numéricos, como por exemplo MDC trapezoidal, na simulação de juntas curvas.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos (Tese de doutoramento)*, 2007. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
2. Messler, R.W., *Principles of welding : processes, physics, chemistry, and metallurgy*. 1999, Hoboken, USA: John Wiley & Sons.
3. Al-Ramahi, N.J., *Numerical stress analysis in hybrid adhesive joint with non-linear materials (Licentiate thesis)*, 2018. Luleå University of Technology: Luleå, Sweden.
4. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
5. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, New York, USA: Springer.
6. Quini, J.G. e G. Marinucci, *Polyurethane structural adhesives applied in automotive composite joints*. *Materials Research*, 2012. **15**(3): p. 434-439.
7. SUNSTAR. *Supporting global automotive innovation with adhesive technology*. 2020 Acedido em: Dezembro, 2020]; Available from: <https://www.sunstar.com/healthy-thinking/weld-bonding/>.
8. Machalická, K.V., M. Vokáč, P. Pokorný, e M. Pavlíková, *Effect of various artificial ageing procedures on adhesive joints for civil engineering applications*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020. **97**(5): p. 102476.
9. Sousa, J.M., J.R. Correia, e S. Cabral-Fonseca, *Durability of an epoxy adhesive used in civil structural applications*. *Construction and Building Materials*, 2018. **161**: p. 618-633.
10. Romano, M.G., M. Guida, F. Marulo, M. Giugliano Auricchio, e S. Russo, *Characterization of adhesives bonding in aircraft structures*. *Materials*, 2020. **13**(21): p. 4816.
11. Pantelakis, S. e T. Konstantinos, *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*. 2020, New York, USA: Springer.
12. Petrie, E.M., *Adhesives in the marine industry*. *Metal Finishing*, 2013. **111**(6): p. 47-49.
13. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
14. Toolkit, A. *Design Guidance - Joint Types*. 2006 Acedido em: Dezembro, 2020]; Available from: <http://www.adhesivestoolkit.com/Toolkits/DesignGuidance/JointTypes.xtp>.
15. Plastic decorating. *Structural Bonding Alternatives for Plastics*. 2014 Acedido em: Dezembro, 2020]; Available from: <https://plasticsdecorating.com/articles/2014/structural-bonding-alternatives-for-plastics/>.

16. Adams, R.D., R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, e W. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997, New York, USA: Springer.
17. *ASTM D5573-99(2019), Standard practice for classifying failure modes in fiber-reinforced-plastic (FRP) joints*. 2019, ASTM International: West Conshohocken, Pensilvânia.
18. V. Natu, A., A. R. Sharma, e N. R. Anekar, *Variation of adhesive strength in single lap joint (SLJ) with surface irregularities*. American Journal of Mechanical Engineering, 2019. **7**(2): p. 61-67.
19. Budhe, S., M.D. Banea, S. de Barros, e L.F.M. da Silva, *An updated review of adhesively bonded joints in composite materials*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **72**: p. 30-42.
20. Katsivalis, I., *Strength analysis and failure prediction of glass adhesive joints (Doctoral thesis)*, 2019. University of Southampton: Southampton, UK.
21. Norström, E., D. Demircan, L. Fogelström, F. Khabbaz, e E. Malmström, *Applied Adhesive Bonding in Science and Technology*. 2018, London, UK: IntechOpen.
22. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto (Tese de mestrado)*, 2016. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
23. *Strength prediction of adhesively-bonded joints*, ed. R.D.S.G. Campilho. 2017, Boca Raton, USA: CRC Press.
24. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
25. Goland, M. e E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944. **17**: p. 66.
26. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
27. Harris, J. e 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.
28. Sosa, J.C., N. Karapurath, e Technology, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Journal of Composites Science, 2012. **72**(7): p. 788-791.
29. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012, New York, USA: Springer. 1-93.
30. Zhao, X., R. Adams, e 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.
31. Wu, C., C. Chen, L. He, e W. Yan, *Comparison on damage tolerance of scarf and stepped-lap bonded composite joints under quasi-static loading*. Composites Part B: Engineering, 2018. **155**: p. 19-30.
32. 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.
33. Chaves, F.J., L. Da Silva, M. De Moura, D. Dillard, e V. Esteves, *Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: a literature review*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(12): p. 955-992.

34. Arnold, G.A., *VI. The phenomena of rupture and flow in solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
35. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
36. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
37. Abrate, S., J.-F. Ferrero, e P. Navarro, *Cohesive zone models and impact damage predictions for composite structures*. Meccanica, 2015. **50**(10): p. 2587-2620.
38. Maymon, G., *Stochastic Crack Propagation: Essential Practical Aspects*. 2018, Cambridge, USA: Academic Press.
39. 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.
40. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
41. Ramalho, L., R. Campilho, J. Belinha, e L. da Silva, *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **96**: p. 102451.
42. Katsivalis, I., O.T. Thomsen, S. Feih, e M. Achintha, *Development of cohesive zone models for the prediction of damage and failure of glass/steel adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **97**: p. 102479.
43. Neto, R.C., E. Sampaio, e J. Assis, *Numerical and experimental analysis of bonded joints with combined loading*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019. **90**: p. 61-70.
44. Ji, Y.M. e K. Han, *Fracture mechanics approach for failure of adhesive joints in wind turbine blades*. Renewable Energy, 2014. **65**: p. 23-28.
45. Cen, B., Y. Liu, Z. Zeng, J. Wang, X. Lu, e X. Zhu, *Mechanical behavior of novel GFRP foam sandwich adhesive joints*. Composites Part B: Engineering, 2017. **130**: p. 1-10.
46. Marques, E., L.F. da Silva, e M. Flaviani, *Testing and simulation of mixed adhesive joints for aerospace applications*. Composites Part B: Engineering, 2015. **74**: p. 123-130.
47. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: Mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
48. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
49. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
50. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.

51. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2016. **15**(5): p. 429-442.
52. Benyahia, F., A. Albedah, e B.B. Bouiadjra, *Analysis of the adhesive damage for different patch shapes in bonded composite repair of aircraft structures*. Materials and Design, 2014. **54**: p. 18-24.
53. Azevedo, J., R. Campilho, F. Da Silva, T. Faneco, e R. Lopes, *Cohesive law estimation of adhesive joints in mode II condition*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015. **80**: p. 143-154.
54. Carvalho, U. e R. Campilho, *Application of the direct method for cohesive law estimation applied to the strength prediction of double-lap joints*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016. **85**: p. 140-148.
55. Fernandes, R. e R. Campilho, *Testing different cohesive law shapes to predict damage growth in bonded joints loaded in pure tension*. The Journal of Adhesion, 2017. **93**(1-2): p. 57-76.
56. Carvalho, U. e R. Campilho, *Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**: p. 41-50.
57. Campilho, R., F. Viana, R. Rocha, D. Silva, R. Araújo, e J. Ribeiro, *Fracture modelling of adhesively-bonded joints by an inverse method*. Frattura ed Integrità Strutturale, 2019. **13**(48): p. 286-303.
58. Leitão, A., R. Campilho, e D. Moura, *Shear characterization of adhesive layers by advanced optical techniques*. Experimental Mechanics, 2016. **56**(3): p. 493-506.
59. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
60. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements*. 2002, New York, USA: Springer.
61. Ferreira, J.A.M., R.D.S.G. Campilho, M.G. Cardoso, e F.J.G. Silva, *Numerical simulation of adhesively-bonded T-stiffeners by cohesive zone models*. Procedia Manufacturing, 2020. **51**: p. 870-877.
62. Ferreira, J., R. Campilho, M. Cardoso, e F. Silva, *Numerical simulation of adhesively-bonded T-stiffeners by cohesive zone models*. Procedia Manufacturing, 2020. **51**: p. 870-877.
63. Santos, T. e R. Campilho, *Numerical modelling of adhesively-bonded double-lap joints by the eXtended Finite Element Method*. Finite Elements in Analysis and Design, 2017. **133**: p. 1-9.
64. Heidari-Rarani, M. e M. Sayedain, *Finite element modeling strategies for 2D and 3D delamination propagation in composite DCB specimens using VCCT, CZM and XFEM approaches*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019. **103**: p. 102246.
65. Gwinner, J., E.J.T. Stephan, e d.o.b. Contact Problems, *Advanced Boundary Element Methods—Treatment of Boundary Value*. 2017.
66. Belinha, J., R.M. Natal Jorge, e L.M.J.S. Dinis, *Bone tissue remodelling analysis considering a radial point interpolator meshless method*. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2012. **36**(11): p. 1660-1670.
67. Wang, H. e Q.-H. Qin, *Methods of fundamental solutions in solid mechanics*. 2019, Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

68. Lucy, L.B., *A numerical approach to the testing of the fission hypothesis*. The Astronomical Journal, 1977. **82**: p. 1013-1024.
69. Gingold, R.A. e J. Monaghan, *Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977. **181**(3): p. 375-389.
70. Belytschko, T., Y.Y. Lu, e L. Gu, *Element-free Galerkin methods*. International journal for numerical methods in engineering, 1994. **37**(2): p. 229-256.
71. Chen, J.-S., C. Pan, C.-T. Wu, e W.K. Liu, *Reproducing kernel particle methods for large deformation analysis of non-linear structures*. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 1996. **139**(1-4): p. 195-227.
72. Liu, W.K., S. Jun, e Y.F. Zhang, *Reproducing kernel particle methods*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1995. **20**(8-9): p. 1081-1106.
73. Wang, J. e G. Liu, *A point interpolation meshless method based on radial basis functions*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002. **54**(11): p. 1623-1648.
74. Wang, J., G. Liu, e Y. Wu, *A point interpolation method for simulating dissipation process of consolidation*. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 2001. **190**(45): p. 5907-5922.
75. Liu, G., *A point assembly method for stress analysis for two-dimensional solids*. International journal of solids and structures, 2002. **39**(1): p. 261-276.
76. Tsai, C., Y. Guan, D. Ohanehi, J. Dillard, D. Dillard, e R. Batra, *Analysis of cohesive failure in adhesively bonded joints with the SSPH meshless method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **51**: p. 67-80.
77. Bodjona, K. e L. Lessard, *Nonlinear static analysis of a composite bonded/bolted single-lap joint using the meshfree radial point interpolation method*. Composite Structures, 2015. **134**: p. 1024-1035.
78. Monsef, S.A., M. Pérez-Galmés, J. Renart, A. Turon, e P. Maimí, *The influence of mode II test configuration on the cohesive law of bonded joints*. Composite Structures, 2020. **234**: p. 111689.
79. Sánchez-Arce, I., L. Ramalho, R. Campilho, e J. Belinha, *Material non-linearity in the numerical analysis of SLJ bonded with ductile adhesives: A meshless approach*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021. **104**: p. 102716.
80. Zhang, Q., X. Cheng, Y. Cheng, W. Li, e R. Hu, *Investigation of tensile behavior and influence factors of composite-to-metal 2D-scarf bonded joint*. Engineering Structures, 2019. **180**: p. 284-294.
81. Sánchez-Arce, I., L. Ramalho, R. Campilho, e J. Belinha, *Analyzing single-lap joints bonded with a brittle adhesive by an elastic meshless method*. Procedia Structural Integrity, 2020. **28**: p. 1084-1093.
82. Machado, R., R. Campilho, e R. Rocha, *Extended finite element modelling of aluminium stepped-adhesive joints*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(5-7): p. 450-473.
83. Mbacké, M.A., R. Bensaada, J. Raujol, B. Lascoup, e A. Filiot, *Numerical implementation of a fatigue cohesive zone model and simulation of mode I crack propagation of adhesively bonded composites*. Procedia Structural Integrity, 2020. **28**: p. 1431-1437.

84. Özel, A., M. Aydin, e Ş. Temiz, *The effects of overlap length and adherend thickness on the strength of adhesively bonded joints subjected to bending moment*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(3): p. 313-325.
85. Bamberg, P.A.M.G.P., U. Reisgen, A. Schiebahn, J.D.V. Barbosa, B. Marx, e R.S. Coelho, *Digital image correlation analysis of the effects of the overlap length, adhesive thickness and adherends yield strength over similar and dissimilar joints of high strength steel and aluminum alloys*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **83**: p. 69-75.
86. da Silva, L.F.M., R.D. Adams, e M. Gibbs, *Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004. **24**(1): p. 69-83.
87. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Design of adhesively-bonded composite joints*, in *Fatigue and Fracture of Adhesively-Bonded Composite Joints*, A.P. Vassilopoulos, Editor. 2015, Woodhead Publishing: Sawston, UK. p. 43-71.
88. Fernández-Cañadas, L.M., I. Ivañez, S. Sanchez-Saez, e E.J. Barbero, *Effect of adhesive thickness and overlap on the behavior of composite single-lap joints*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2019. **28**(11): p. 1111-1120.
89. da Silva, L.F.M., T.N.S.S. Rodrigues, M.A.V. Figueiredo, M.F.S.F. de Moura, e J.A.G. Chousal, *Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength*. The Journal of Adhesion, 2006. **82**(11): p. 1091-1115.
90. Reis, P.N.B., J.R.L. Soares, A.M. Pereira, e J.A.M. Ferreira, *Effect of adherends and environment on static and transverse impact response of adhesive lap joints*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015. **80**: p. 79-86.
91. Grant, L.D.R., R.D. Adams, e L.F.M. 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.
92. Carbas, R.J.C., *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi (Tese de mestrado)*, 2008. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
93. Groth, H.L. e P. Nordlund, *Shape optimization of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 204-212.
94. Cherry, B.W. e N.L. Harrison, *Note: The optimum profile for a lap joint*. The Journal of Adhesion, 1970. **2**(2): p. 125-128.
95. Adams, R. e N. Peppiatt, *Effect of Poisson's ratio strains in adherends on stressed in an idealised lap joint*. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1973. **8**(2): p. 134-139.
96. Hart-Smith, L., *Adhesive-bonded single-lap joints*. National Aeronautics and Space Administration, 1973.
97. Moya-Sanz, E.M., I. Ivañez, e S.K. Garcia-Castillo, *Effect of the geometry in the strength of single-lap adhesive joints of composite laminates under uniaxial tensile load*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **72**: p. 23-29.
98. Adams, R. e 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.

99. Taib, A.A., R. Boukhili, S. Achiou, e H. Boukehili, *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.
100. Liu, Y., S. Lemanski, e X. Zhang, *Parametric study of size, curvature and free edge effects on the predicted strength of bonded composite joints*. Composite Structures, 2018. **202**: p. 364-373.
101. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, e L.F.M. da Silva, *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.
102. Correia, J.M.C., R.D.S.G. Campilho, R.J.B. Rocha, Y. Liu, e L.D.C. Ramalho, *Parametric study of composite curved adhesive joints*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **111**(9-10): p. 2957-2970.
103. Ascione, F. e G. Mancusi, *Curve adhesive joints*. Composite Structures, 2012. **94**(8): p. 2657-2664.
104. Ascione, F. e G. Mancusi, *The influence of the geometric curvature on the mechanical behaviour of the adhesive joint*, in *Eleventh International Conference on Computational Structures Technology*. 2012: Stirlingshire, Scotland.
105. Westaway, D., *Building a future for composites*. Reinforced Plastics, 2001. **45**(9): p. 62-66.
106. WilkinsonEyre. *Halgavor Footbridge*. 2021. Acedido em: Junho, 2021]; Available from: <https://www.wilkinsoneyre.com/projects/halgavor-footbridge>.
107. Kim, H. e K. Kedward, *Stress analysis of in-plane, shear-loaded, adhesively bonded composite joints and assemblies*. 2001, Office of Aviation Research: Washington, USA. p. 36.
108. Liu, C., J.X. Zhang, e C.B. Xue, *Numerical investigation on residual stress distribution and evolution during multipass narrow gap welding of thick-walled stainless steel pipes*. Fusion Engineering and Design, 2011. **86**(4-5): p. 288-295.
109. Çitil, Ş., Y. Ayaz, Ş. Temiz, e M.D. Aydın, *Mechanical behaviour of adhesively repaired pipes subject to internal pressure*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **75**: p. 88-95.
110. Ayaz, Y., Ş. Çitil, e M.F. Şahan, *Repair of small damages in steel pipes with composite patches*. Materials Science and Engineering Technology, 2016. **47**(5-6): p. 503-511.
111. Behera, R.K., S.K. Parida, e R.R. Das, *3-D interfacial stress analysis of adhesively bonded curved laminated FRP composite single lap joint*. Materials Today: Proceedings, 2020. **26**: p. 1948-1952.
112. Behera, R.K., S.K. Parida, e R.R. Das, *Effect of pre-embedded adhesion failures and surface ply delaminations on the structural integrity of adhesively bonded single lap joints made with curved laminated FRP composite panels*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021. **108**.
113. Parida, S.K. e A.K. Pradhan, *Effect of material anisotropy on delamination damage in adhesive bonded lap shear joints made with curved laminated FRP composite panels*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2016. **40**(4): p. 275-287.

114. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples (Tese de mestrado)*, 2016. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
115. Ericsson, M., *Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG*. International Journal of Fatigue, 2003. **25**(12): p. 1379-1387.
116. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, e A.M.P. de Jesus, *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.
117. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
118. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, e L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
119. Nunes, S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla (Tese de mestrado)*, 2015. Instituto Superior de Engenharia do Poto: Porto, Portugal.
120. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade (Tese de mestrado)*, 2014. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
121. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
122. Chen, X., X. Deng, e M.A. Sutton, *Simulation of stable tearing crack growth events using the cohesive zone model approach*. Engineering Fracture Mechanics, 2013. **99**: p. 223-238.
123. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
124. Jousset, P. e M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2014. **132**: p. 48-69.
125. Pocius, A., *Adhesion and adhesives technology, an introduction, 2nd ed.* 2002, Cincinnati, USA: Hanser Gardner Publications.
126. Andersson, T. e U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
127. Högberg, J.L. e U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
128. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, R.F. Silva, e L.F.M. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **25**(18): p. 2351-2368.
129. Marques, E.A.S. e L.F.M. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.

130. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, D. Ramantani, J. Morais, e J. Domingues, *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 678-686.
131. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF) (Tese de testado)*, 2014. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
132. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, D.A. Ramantani, J.J.L. Morais, e J.J.M.S. Domingues, *Buckling behaviour of carbon-epoxy adhesively-bonded scarf repairs*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1493-1513.
133. De Moura, M.F.S.F., J.P.M. Gonçalves, J.A.G. Chousal, e R.D.S.G. Campilho, *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 419-426.
134. Neto, J.A.B.P., *Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito (Tese de mestrado)*, 2011. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
135. Rocha, R.J.B.d., *Evaluation of different damage initiation and growth criteria in the cohesive zone modelling analysis of single-lap bonded joints (Tese de mestrado)*, 2016. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
136. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures (Doctoral thesis)*, 2009. Universidade do Porto: Porto, Portugal.