



Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em degrau com dois adesivos

CELSO LOPES FERREIRA

novembro de 2018

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS EM DEGRAU COM DOIS ADESIVOS

Celso Lopes Ferreira

1130768

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS EM DEGRAU COM DOIS ADESIVOS

Celso Lopes Ferreira

1130768

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 Mestre Raul Domingos Ferreira Moreira.

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Jorge Dores de Castro

Professor adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor adjunto, ISEP

Coorientador

Mestre Raul Domingos Ferreira Moreira

Doutorando, FEUP

Arguente

Doutora Ana Sofia Oliveira Queirós Ferreira Barbosa

Investigadora, FEUP

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de prestar os meus sinceros agradecimentos ao Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pelo apoio e disponibilidade prestada durante todo o processo de realização desta dissertação.

Agradeço igualmente, ao Mestre Raul Domingos Ferreira Moreira pela disponibilidade e ajuda prestada na execução dos provetes de ensaios, realizados nas instalações do Laboratório de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Agradeço também aos meus colegas de mestrado Daniel Cardoso, Duarte Machado, Emanuel Silva e Joaquim Ferreira pela ajuda prestada.

Finalmente, agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela disponibilidade dos meios necessários para a realização da presente dissertação.

PALAVRAS CHAVE

Método de Elementos Finitos, modelo de dano coesivo, junta em degrau, junta mista, junta com dois adesivos, junta adesiva, adesivo estrutural, ensaios mecânicos.

RESUMO

A utilização de ligações adesivas tem vindo a despertar bastante interesse por parte da comunidade científica. Constata-se que, ao longo dos anos, as ligações adesivas têm vindo a substituir as ligações mecânicas, permitindo combater problemas a elas associadas. As suas vantagens técnicas relacionadas com o desempenho, produtividade e custo têm vindo a despertar interesse pelas indústrias. Atualmente, este tipo de ligações está associado a aplicações estruturais, sendo aplicadas nas mais variadas áreas. Dos vários tipos de juntas existentes, as juntas em degrau apresentam a vantagem de diminuir os gradientes de tensão ao longo da zona de ligação, embora os degraus exteriores ainda se encontrem com níveis de tensões superiores aos degraus na zona interior da ligação. Uma possível maneira de reduzir este gradiente de tensões consiste na combinação deste tipo de junta com a utilização de dois adesivos, o que já provou conseguir reduzir os picos de tensões em juntas convencionais.

Esta dissertação consiste no estudo experimental e numérico de juntas adesivas em degrau compostas por dois adesivos em substratos de alumínio, para vários comprimentos de sobreposição. A parte experimental do estudo consistiu no fabrico, ensaio e análise dos resultados obtidos das juntas mistas. A análise dos resultados experimentais encontra-se sob a forma de curvas $P-\delta$, modos de rotura, resistência de juntas, energias de rotura e comparação de resultados com juntas de adesivo único. A parte numérica do estudo consistiu na aplicação do Método de Elementos Finitos através dos modelos de dano coesivo com lei triangular na previsão do comportamento das ligações. O estudo numérico consiste na explicação das condições da análise numérica e no modelo de dano utilizado, na determinação das propriedades de dano, na análise de tensões das juntas, no estudo da variável de dano, na previsão do comportamento das juntas (curvas $P-\delta$, modos de rotura, resistência das juntas, energias de rotura) e na comparação de resultados com juntas de adesivo único. Na parte final desta dissertação também se encontra um pequeno estudo numérico para outras configurações de adesivos não estudados no trabalho experimental. Foi possível concluir que, de uma maneira geral, os modelos de dano coesivo apresentaram previsões bastante precisas. De uma maneira geral não se conseguiu obter um aumento de resistência significativo com esta técnica mas, por outro lado, obtiveram-se aumentos de energia dissipada significativos.

KEYWORDS

Finite Element Method, cohesive zone model, stepped-lap joint, mixed joint, joints with two adhesives, adhesive joint, structural adhesive, mechanical tests.

ABSTRACT

The use of adhesive bonds has attracted considerable interest from the scientific community. It has been noted that, over the years, adhesive bonding has been replacing mechanical bonding, allowing tackling the associated problems. Its technical advantages related to performance, productivity and cost have been attracting the industrial interest. Currently, this type of joint is associated with structural applications, being applied in the most varied areas. Of the various types of joints available, step joints have the advantage of decreasing stress gradients along the bond length, although the outer steps still encounter stress levels above the steps in the inner zone of the joint. One possible way to reduce this stress gradient is to combine this type of joint with the use of two adhesives, which has proven to reduce stress peaks in conventional joints.

This dissertation consists of the experimental and numerical study of step adhesive joints composed of two adhesives on aluminium adherents, for various overlap lengths. The experimental part of the study consisted in the manufacture, testing and analysis of the results obtained from the mixed joints. The analysis of the experimental results is in the form of P - δ curves, failure modes, joint strength, maximum breaking energies and comparison of results with single adhesive joints. The numerical part of the study consisted in the application of the Finite Element Method through the models of cohesive damage with triangular law in the prediction of the behaviour of the bonds. The numerical study consists of the explanation of the conditions of the numerical analysis and the damage model used, in the determination of the damage properties, in the analysis of joint stresses, in the study of the damage variable, in the prediction of joint behaviour (P - δ curves, failure modes, joint strength, failure energies) and in the comparison of results with joints with a single adhesive. In the final part of this dissertation, there is also a small numerical study for other adhesive configurations not studied in the experimental work. It was possible to conclude that, in general, the cohesive zone models presented precise predictions. In general, no significant increase in strength was achieved with this technique but, on the other hand, significant dissipated energy increases were obtained.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

Al	Alumínio
AMDC	Alternativas para modelos de dano coesivo
Cr	Crómio
Cu	Cobre
DCB	<i>Double-cantilever beam</i>
EF	Elementos finitos
ENF	<i>End-notched flexure</i>
EPMA	<i>Electron probe microanalysis</i>
Fe	Ferro
GFRP	Perfis pultrudidos de fibra de vidro
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de dano coesivo
MEF	Método de elementos finitos
MEFX	Método de elementos finitos extendido
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PRFC	Polímeros reforçados com fibras de carbono

PVC	Policloreto de vinilo
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
Si	Silício
TAST	<i>Thick-adherend shear test</i>
Ti	Titânio
Zn	Zinco

Lista de Símbolos

E [MPa]	Módulo de Young
$E_{máx}$ [kN.mm]	Energia de rotura do adesivo
G [MPa]	Módulo de elasticidade transversal
G_{Ic} [N/mm]	Tenacidade à tração
G_{IIc} [N/mm]	Tenacidade ao corte
L_0 [mm]	Comprimento de sobreposição
L_T [mm]	Comprimento total do provete
$P_{máx}$ [kN]	Força máxima de rotura do adesivo
t_A [mm]	Espessura de adesivo longitudinal ao carregamento
t_{A1} [mm]	Espessura de adesivo transversal ao carregamento
t_m^0 [MPa]	Resistência coesiva em modo misto
t_n [MPa]	Tensão coesiva atual à tração
t_n^0 [MPa]	Resistência coesiva à tração
t_p [mm]	Espessura do substrato
t_s [MPa]	Tensão coesiva atual ao corte

t_s^0 [MPa]	Resistência coesiva ao corte
x [mm]	Distância desde a extremidade esquerda do adesivo
x/L_0	Distância normalizada ao longo do comprimento de sobreposição do adesivo
γ_f [%]	Deformação de rotura ao corte
δ [mm]	Deslocamento associado à solicitação de tração da junta
δ_n^0 [mm]	Deslocamento correspondente à resistência coesiva à tração
δ_s^0 [mm]	Deslocamento correspondente à resistência coesiva ao corte
ϵ_f [%]	Deformação de rotura à tração
ϵ_n [mm]	Deformação à tração
ϵ_s [mm]	Deformação ao corte
ν	Coefficiente de Poisson
σ_f [MPa]	Tensão de rotura à tração
σ_N [MPa]	Pico de tensão de arrancamento do adesivo
σ_y [MPa]	Tensão de cedência à tração
$\sigma_y/\tau_{\text{médio}}$	Tensão de arrancamento normalizada para as juntas em degrau
τ_f [MPa]	Tensão de rotura ao corte
$\tau_{\text{médio}}$ [MPa]	Tensão de corte média
τ_{xy} [MPa]	Tensão de corte
$\tau_{xy}/\tau_{\text{médio}}$	Tensão de corte normalizada para as juntas em degrau
τ_y [MPa]	Tensão de cedência ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Junta adesiva com indicação dos aderentes, adesivo, interfases e interfaces [4].	7
Figura 2: Vista explodida de um satélite de telecomunicações – vários componentes onde são aplicadas ligações adesivas estruturais [7].	11
Figura 3: Colagem de painéis isoladores térmicos na estrutura de um foguetão [7].	12
Figura 4: Esquema representativo de um Airbus A380 e locais onde estão aplicadas ligações adesivas [9].	12
Figura 5: Ligações adesivas aplicadas na cobertura do motor Trent 700 [9].	13
Figura 6: Diferentes tipos de ligações adesivas num automóvel [11].	13
Figura 7: Utilização de ligações adesivas em pequenas embarcações [13].	14
Figura 8: Aplicação de adesivo no interior do casco, antes da ligação do motor à estrutura do barco [13].	15
Figura 9: Ligações adesivas e vedantes de juntas num vagão de um comboio [14].	16
Figura 10: Protótipo em PRFC de uma estrutura para um comboio de alta velocidade, com painéis moldados através do processo de pultrusão: (a) fora da estrutura e (b) dentro da estrutura [14].	16
Figura 11: Gärtnerplatz-bridge, Kassel, pré-fabricada com betão de alto desempenho combinado com resina epóxida de duas partes [15].	17
Figura 12 Placa elétrica com interconectores em adesivo [16].	18
Figura 13: Separação entre parte superior e a sola, e adesivo para ligação de ambas [17].	19
Figura 14: Adesivos estruturais (adaptado de [5]).	29
Figura 15: Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: (a) aproximação local e (b) modelação de uma camada fina de adesivo - aproximação contínua (adaptado de [32]).	34
Figura 16: Representação das tensões usando o MEFX em JSS: (a) iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição e (b) crescimento dano do aderente de alumínio [41].	36
Figura 17: Diferentes tipos de juntas utilizados por You et al. [48].	37
Figura 18: Resistência ao corte em função das várias juntas [48].	38
Figura 19: Geometria das juntas utilizadas no estudo [53].	40
Figura 20: Geometria, modelo EF e condições de fronteira para uma JSS: (a) modelo geométrico (AL: comprimento do aderente solicitado; OL: comprimento de sobreposição.) e (b) regiões do material e discretização de elementos [54].	41
Figura 21: JSS com dois adesivos [56].	42
Figura 22: Geometria e dimensões das juntas com um e dois adesivos [57].	42

Figura 23: Tensões de corte máxima para as juntas com um e dois adesivos [57].	43
Figura 24: Junta em degrau [19].	43
Figura 25: Modelo utilizado no cálculo através do MEF da junta adesiva em degrau [58].	44
Figura 26: (a) Componentes de tensão nas transições entre degraus na interface entre o adesivo e o aderente, (b) componentes da distribuição de tensão ao longo dos três degraus, na interface entre o adesivo e o aderente, (c) distribuição das tensões principais máximas normalizadas σ_1/σ_0 nas transições entre degraus ao longo da largura da junta [58].	45
Figura 27: (a) JSS e (b) JSS ondulada na zona de ligação [59].	46
Figura 28: (a) Distribuição da carga máxima das JSS e (b) distribuição da carga máxima das JSS onduladas [59].	47
Figura 29: (a) Distribuição da tensão de corte e arrancamento da JSS e (b) distribuição da tensão de corte e arrancamento da JSS ondulada [59].	48
Figura 30: (a) Junta normal e (b) junta graduada [60].	49
Figura 31: JSS com aderentes dobrados [63].	50
Figura 32: Franjas isocromáticas durante o carregamento [63].	50
Figura 33: Curvas σ - ϵ da liga de alumínio AW 6082-T651 [41].	54
Figura 34: Adesivo Araldite® AV138 [64].	55
Figura 35: Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [66].	56
Figura 36: Adesivo Araldite® 2015 [64].	57
Figura 37: Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [66].	58
Figura 38: Adesivo Sikaforce® 7752 [64].	59
Figura 39: Curvas σ - ϵ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [68].	60
Figura 40: Esquema representativo da geometria da junta em degrau e respetivas condições fronteira. 61	
Figura 41: Etapas do processo de fabrico das juntas.	63
Figura 42: Curvas P - δ obtidas experimentalmente com a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 para (a) $L_0=12,5$ mm, (b) $L_0=25$ mm, (c) $L_0=37,5$ mm e (d) $L_0=50$ mm.	78
Figura 43: Curvas P - δ obtidas experimentalmente com a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 para (a) $L_0=12,5$ mm, (b) $L_0=25$ mm, (c) $L_0=37,5$ mm e (d) $L_0=50$ mm.	79
Figura 44: Curvas P - δ obtidas experimentalmente com a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 para (a) $L_0=12,5$ mm, (b) $L_0=25$ mm, (c) $L_0=37,5$ mm e (d) $L_0=50$ mm.	80

Figura 45: Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] de cada provete em função de L_o para as três configurações de adesivos.	81
Figura 46: Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] e respectivos desvios padrão em função de L_o para as três configurações de adesivos.	86
Figura 47: Área da curva P - δ correspondente ao cálculo de $E_{m\acute{a}x}$	87
Figura 48: Valores médios de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] e respectivos desvios padrão em função de L_o para as três configurações de adesivos.	88
Figura 49: Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] e respectivos desvios padrão em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.....	90
Figura 50: Valores médios de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] e respectivos desvios padrão em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.....	93
Figura 51: Lei triangular do MDC [32].	103
Figura 52: Esquema representativo da normalização de L_o para as juntas em degrau.....	107
Figura 53: Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 em função de L_o	108
Figura 54: Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 em função de L_o	108
Figura 55: Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 em função de L_o	109
Figura 56: Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 em função de L_o	110
Figura 57: Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 em função de L_o	110
Figura 58: Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 em função de L_o	111
Figura 59: Estudo da variável de dano SDEG em função de L_o , no instante de $P_{m\acute{a}x}$, para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015.....	112
Figura 60: Estudo da variável de dano SDEG em função de L_o , no instante de $P_{m\acute{a}x}$, para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752.	113
Figura 61: Estudo da variável de dano SDEG em função de L_o , no instante de $P_{m\acute{a}x}$, para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752.....	113
Figura 62: Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta P_{m\acute{a}x}$ para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015, para (a) $L_o=12,5$ mm e (b) $L_o=50$ mm.....	116

Figura 63: Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta P_{m\acute{a}x}$ para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752, para (a) $L_o=12,5$ mm e (b) $L_o=50$ mm.	117
Figura 64: Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta P_{m\acute{a}x}$ para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752, para (a) $L_o=12,5$ mm e (b) $L_o=50$ mm.....	118
Figura 65: Curvas $P-\delta$ experimentais e numérica da configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 para $L_o=12,5$ mm.	119
Figura 66: Curvas $P-\delta$ experimentais e numérica da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 para $L_o=25$ mm.....	120
Figura 67: Curvas $P-\delta$ experimentais e numérica da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 para $L_o=50$ mm.	121
Figura 68: Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] obtidos no trabalho numérico, em função de L_o para as três configurações de adesivos.	129
Figura 69: Esquema representativo das tensões τ_{xy} numa junta adesiva mista [2].	130
Figura 70: Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] obtidos no trabalho numérico em função de L_o para as três configurações de adesivos.	134
Figura 71: Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] numéricos em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.	138
Figura 72: Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] numéricos em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.	144
Figura 73: Curvas $P-\delta$ numéricas para a configuração de adesivos RTV106/Araldite® AV138/RTV106... ..	147
Figura 74: Curvas $P-\delta$ numéricas para a configuração de adesivos DP8005/Araldite® AV138/DP8005.	148
Figura 75: Curvas $P-\delta$ numéricas para a configuração de adesivos RTV106/Araldite® 2015/RTV106.	148
Figura 76: Curvas $P-\delta$ numéricas para a configuração de adesivos DP8005/Araldite® 2015/DP8005.	149
Figura 77: Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] em função de L_o para as quatro configurações de adesivos.....	149
Figura 78: Valores $P_{m\acute{a}x}$ [kN] numéricos em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.	152

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Comparação do processo de ligação adesiva com os processos de soldadura e fixações mecânicas (adaptado de [1]).	9
Tabela 2: Tipos de esforços numa ligação adesiva e respetivas distribuições de tensões (adaptado de [1, 4]).	20
• Tabela 3: Modos de rotura mais frequentes numa junta adesivas (adaptado de [18]).	23
Tabela 4: Configurações de junta mais utilizadas (adaptado de [1, 19]).	24
Tabela 5: Diferentes tipos de filetes de adesivo (adaptado de [47]).	37
Tabela 6: Tipos de chanfros utilizados nos aderentes (adaptado de [52]).	39
Tabela 7: Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [64].	54
Tabela 8: Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 (dados do fabricante, [64]).	54
Tabela 9: Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [66, 67].	56
Tabela 10: Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [66].	58
Tabela 11: Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [68].	60
Tabela 12: Parâmetros geométricos usados na geometria da junta.	61
Tabela 13: Dimensões dos degraus no processo de maquinagem.	62
Tabela 14: Corte dos substratos.	64
Tabela 15: Remoção de limalha.	65
Tabela 16: Maquinagem dos degraus.	66
Tabela 17: Preparação superficial dos substratos.	70
Tabela 18: Aplicação e cura dos adesivos.	72
Tabela 19: Acabamento pós-cura das juntas.	75
Tabela 20: Ensaio de tração.	77
Tabela 21: Valores de $P_{máx}$ [kN] de cada provete em função de L_o para as três configurações de adesivos.	81
Tabela 22: Modos de rotura experimentais.	82
Tabela 23: Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o para as três configurações de adesivos.	86
Tabela 24: Valores médios e desvios padrão de $E_{máx}$ [kN.mm].	88
Tabela 25: Valores médios de $P_{máx}$ [kN] e respetivos desvios padrão obtidos experimentalmente para as juntas de adesivo único.	91

Tabela 26: Valores médios de $E_{máx}$ [kN.mm] e respetivos desvios padrão para as juntas de adesivo único [kN.mm].	94
Tabela 27: Condições da análise numérica.	96
Tabela 28: Parâmetros coesivos em tração e corte para as camadas dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, com $t_A=0,2$ mm [64, 87, 88].	106
Tabela 29: Modos de rotura numéricos.	123
Tabela 30: Caminhos de rotura para as três configurações de adesivos.	125
Tabela 31: Comparação de $P_{máx}$ [kN] entre o trabalho experimental e o numérico, em função de L_o para as três configurações de adesivos.	127
Tabela 32: Valores de $P_{máx}$ [kN] do trabalho experimental e numérico, em função de L_o para as três configurações de adesivos.	128
Tabela 33: Comparação de $E_{máx}$ [kN.mm] entre o trabalho experimental e o numérico, em função de L_o para as três configurações de adesivos.	132
Tabela 34: Valores de $E_{máx}$ [kN.mm] do trabalho experimental e numérico, em função de L_o para as três configurações de adesivos.	133
Tabela 35: Comparação de $P_{máx}$ [kN] entre o trabalho experimental e o numérico, em função de L_o para as juntas de adesivo único.	136
Tabela 36: Valores de $P_{máx}$ [kN] do trabalho experimental e numérico, em função de L_o para as juntas de adesivo único.	137
Tabela 37: Comparação de $E_{máx}$ [kN.mm] entre o trabalho experimental e o numérico, em função de L_o para as juntas de adesivo único.	142
Tabela 38: Valores de $E_{máx}$ [kN.mm] do trabalho experimental e numérico, em função de L_o para as juntas de adesivo único.	143
Tabela 39: Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo RTV106 e DP8005 [95].	146
Tabela 40: Valores de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o para as quatro configurações de adesivos.	150
Tabela 41: Valores de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o para as juntas de adesivo único.	153

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do relatório.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Ligações adesivas	5
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	6
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	10
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	20
2.1.4	Configurações possíveis de junta	24
2.1.5	Adesivos estruturais	29
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	31
2.2.1	Modelos analíticos	32
2.2.2	Modelos numéricos.....	32
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	32
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	33
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	33
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	35
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	35
2.3	Técnicas para aumento de resistência.....	36
2.3.1	Filetes de adesivo	36
2.3.2	Chanfros interiores e exteriores.....	39
2.3.3	Gradação das propriedades dos aderentes.....	40
2.3.4	Utilização de dois adesivos.....	41
2.3.5	Utilização de degraus na zona de sobreposição.....	43

2.3.6	Outras alterações	46
3	DESENVOLVIMENTO	53
3.1	Trabalho experimental.....	53
3.1.1	Materiais utilizados	53
3.1.1.1	Aderentes.....	53
3.1.1.2	Adesivos	55
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	55
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	57
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	59
3.1.2	Geometria das juntas	61
3.1.3	Processo de fabrico	63
3.1.4	Resultados obtidos	78
3.1.4.1	Curvas $P-\delta$	78
3.1.4.2	Modos de rotura	82
3.1.4.3	Resistência das juntas	85
3.1.4.4	Energias de rotura.....	87
3.1.5	Comparação com resultados de adesivo único.....	90
3.1.5.1	Resistência das juntas	90
3.1.5.2	Energias de rotura.....	93
3.2	Trabalho numérico	96
3.2.1	Condições da análise numérica	96
3.2.2	Modelo de dano utilizado	103
3.2.2.1	Modelo de dano coesivo.....	103
3.2.2.2	Modelo de dano triangular	103
3.2.3	Determinação das propriedades de dano	104
3.2.3.1	Araldite® AV138.....	105
3.2.3.2	Araldite® 2015	105
3.2.3.3	Sikaforce® 7752.....	106
3.2.4	Análise de tensões nas juntas	107

3.2.4.1	Tensões de arrancamento	108
3.2.4.2	Tensões de corte.....	110
3.2.5	Estudo da variável de dano	112
3.2.5.1	Dano para força máxima.....	112
3.2.5.2	Evolução do dano com o carregamento aplicado.....	115
3.2.6	Previsão do comportamento.....	119
3.2.6.1	Curvas $P-\delta$	119
3.2.6.2	Modos de rotura	122
3.2.6.3	Resistência das juntas	126
3.2.6.4	Energias de rotura.....	131
3.2.7	Comparação com resultados de adesivo único	135
3.2.7.1	Resistência das juntas	135
3.2.7.2	Energias de rotura.....	141
3.2.8	Outras configurações	146
3.2.8.1	Curvas $P-\delta$	146
3.2.8.2	Resistência das juntas	149
3.2.8.3	Comparação com resultados de adesivo único	152
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	157
5	REFERÊNCIAS.....	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As ligações adesivas têm sido utilizadas em áreas tão diversas como a indústria aeroespacial e aeronáutica, de defesa, automóvel, de componentes de eletrónica, da construção civil, do calçado e das madeiras. A utilização de juntas adesivas em aplicações industriais tem vindo a aumentar nos últimos anos, em detrimento dos métodos tradicionais de ligação tais como a soldadura, brasagem, e ligações aparafusadas e rebitadas. A configuração de junta adesiva mais utilizada é a sobreposição simples, devido à simplicidade associada à sua fabricação. No entanto, devido à não colinearidade de carga quando as juntas de sobreposição simples (JSS) são sujeitas à tração, observa-se a rotação excessiva dos substratos na zona de sobreposição, o que origina tensões de arrancamento consideráveis. Estas tensões, por sua vez, limitam bastante a resistência da junta, devido à tipicamente reduzida resistência dos adesivos a tensões de arrancamento. Também se registam elevados gradientes de tensões de corte devido ao efeito de deformação diferencial dos aderentes. Uma forma já estudada de minimizar os gradientes de tensões é a utilização de juntas adesivas mistas, cuja camada adesiva apresenta dois adesivos, um mais flexível nas extremidades e outro mais rígido na zona interior. Este tipo de junta já se encontra bem estudado no que concerne a JSS. No entanto, considera-se que a junta adesiva em degrau também podia beneficiar desta combinação de adesivos, para reduzir as variações de tensões ao longo da junta adesiva.

Este tipo de juntas também pode ser visto como uma solução aos problemas de juntas que necessitam de resistir a altas e baixas temperaturas, presentes em aplicações da indústria aeronáutica. A utilização de um adesivo frágil de módulo elevado no centro da junta mantém uma boa resistência a altas temperaturas enquanto, para baixas temperaturas, a presença de um adesivo dúctil nas extremidades da ligação evita o aparecimento de concentrações de tensões, que provocariam a rotura prematura da ligação, e permite ainda que o adesivo frágil localizado no centro da junta seja apenas ligeiramente solicitado [1, 2].

1.2 Objetivos

Os objetivos desta dissertação consistem no estudo numérico e experimental de juntas adesivas em degrau compostas por dois adesivos em substratos de alumínio, para diferentes comprimentos de sobreposição. A parte experimental do estudo consistiu no fabrico, ensaio e análise dos resultados obtidos das juntas mistas, através das curvas $P-\delta$, modos de rotura, resistência de juntas, energias de rotura e comparação de resultados com juntas de adesivo único. A parte numérica do estudo consistiu na aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF) através do modelo de dano coesivo (MDC) triangular na previsão do comportamento das ligações, através da análise de tensões das juntas, no estudo da variável de dano, na previsão do comportamento das juntas (curvas $P-\delta$, modos de rotura, resistência das juntas, energias de rotura) e na comparação de resultados com juntas de adesivo único.

1.3 Organização do relatório

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, sendo eles:

- **1 INTRODUÇÃO:** dedicado à contextualização, objetivos e organização da presente dissertação;
- **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:** capítulo este dedicado à revisão bibliográfica referente à temática das ligações adesivas. Este capítulo encontra-se dividido em vários subcapítulos onde são abordadas as temáticas: caracterização das juntas adesivas, aplicações comuns das juntas adesivas, esforços e modos de rotura, configurações possíveis de junta, adesivos estruturais, modelos de previsão da resistência das juntas adesivas e técnicas para aumento de resistência das ligações;
- **3 DESENVOLVIMENTO:** neste capítulo encontra-se o trabalho experimental e o trabalho numérico. No subcapítulo dedicado ao trabalho experimental encontram-se descritos de forma detalhada os materiais utilizados, a geometria das juntas, o processo de fabrico dos provetes, os resultados obtidos e a comparação de resultados com juntas de adesivo único. No subcapítulo referente ao trabalho numérico são explicadas as condições da análise numérica, o modelo de dano utilizado, a determinação das propriedades do dano, a análise de tensões nas juntas, o estudo da variável de dano, a previsão do comportamento das juntas, a comparação de resultados com juntas de adesivo único e um pequeno estudo referente a outras configurações de adesivos;
- **4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS:** dedicado essencialmente à discussão de resultados do trabalho experimental e do trabalho numérico, bem como à apresentação de sugestões de trabalhos futuros;
- **5 REFERÊNCIAS:** fontes consultadas para a estruturação da presente dissertação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas
- 2.3 Técnicas para aumento de resistência

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

A ligação adesiva é um tipo de ligação de materiais que tem sofrido um enorme interesse e desenvolvimento ao longo dos anos. Não é uma técnica de ligação recente, uma vez que a sua utilização remonta a um passado muito longínquo. A civilização egípcia é exemplo disso. Os Egípcios utilizavam colas à base de gelatina, ovo e resinas extraídas das árvores para aplicarem posteriormente em trabalhos feitos em madeira e em pedra. A decoração dos sarcófagos (caixões Egípcios em madeira) era feita com pigmentos colados em gesso, e a fabricação de *papyrus* era feita através de um processo de adesão entre canas de bambu e uma pasta de farinha e água [3].

No entanto, o termo adesivo só foi patenteado em 1750 na Inglaterra, e consistia numa cola fabricada a partir de peixe. As primeiras ligações adesivas utilizavam adesivos naturais, como por exemplo a caseína (material polimérico derivado do leite), leite, goma e borracha natural. Estes adesivos tinham o inconveniente de, quando submetidos a ambientes húmidos, tornavam-se muito fracos e geradores de odores desagradáveis, principalmente devido à absorção de água [4].

Até ao século XX os adesivos eram essencialmente utilizados como elemento de vedação ou como elemento aglutinante, sendo de origem animal, vegetal ou mineral. O maior desenvolvimento dos adesivos deu-se a partir século XX, onde começaram a aparecer as primeiras fábricas de adesivos. A maior impulsionadora e utilizadora deste tipo de ligações foi a indústria aeronáutica durante a primeira e segunda guerra mundial. Com o aparecimento das colas fenólicas, surgiu o conceito de desempenho de uma ligação adesiva e, através da descoberta das colas à base de ureia-formaldeído, foi possível a criação de produtos como os contraplacados e os painéis utilizados na indústria da madeira. Os adesivos de epóxido marcaram a indústria aeronáutica, uma vez que permitiram as primeiras colagens estruturais metal-metal [4].

Constata-se ao longo da história que os adesivos têm vindo a substituir as ligações de fixação mecânica, sobretudo em aplicações industriais, uma vez que apresentam vantagens técnicas relacionadas com o desempenho, produtividade e menor custo dos adesivos. Atualmente as ligações adesivas são usadas em diversas indústrias (automóvel, aeroespacial, aeronáutica, construção civil, têxtil, calçado, embalagens, entre outras), e estão relacionadas com aplicações de elevada responsabilidade [1, 4].

Este método de ligação é ideal para a ligação de materiais compósitos, uma vez que é mantida a integridade das fibras, facto que não é aplicável nas ligações mecânicas (parafusos, rebites) ou no processo de soldadura, uma vez que é impossível aplicar este processo de ligação em materiais compósitos ou poliméricos. Deste modo, as juntas adesivas apresentam melhor desempenho, uma vez que a boa distribuição de carga sobre uma superfície maior origina uma menor concentração de tensões no material. Este tipo de ligação também é indicado para a ligação de metais onde o processo de soldadura não é indicado, como é o caso de algumas ligas de alumínio [2, 5].

As juntas adesivas são menos propícias ao aparecimento de corrosão e de problemas de fadiga, problemas característicos das ligações tradicionais. Apresentam também excelente estanquicidade [2].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Segundo Kinloch [6], e passando a citar: *“An adhesive may be defined as a material which when applied to surfaces of materials can join them together and resist separation”*. Basicamente, o termo adesivo pode ser definido como uma material polimérico capaz de promover a união entre dois substratos e com capacidade de resistir à sua separação, pela ação combinada de diferentes forças: forças adesivas (adesão) e forças coesivas (coesão) [2].

Na Figura 1 encontra-se representado um esquema referente à constituição de uma junta adesiva, onde estão indicados os aderentes, o adesivo, as interfases e as interfaces.

O aderente ou substrato, é um material, corpo ou componente ligado através de um adesivo. O termo aderente é geralmente utilizado para designar o componente após a colagem, enquanto o termo substrato é geralmente utilizado para designar o material a ser ligado. Ambos os termos são frequentemente usados sem distinção [1].

A interface, também designada por camada limite, corresponde ao plano de contacto entre duas superfícies de dois materiais, como por exemplo o adesivo e o aderente [1].

A interfase é a região entre o adesivo e o aderente que se estende desde um ponto no aderente onde as propriedades locais (físicas, químicas, mecânicas e morfológicas) começam a alterar-se desde as propriedades do aderente, até um ponto no adesivo onde as propriedades locais igualam as propriedades do adesivo maciço. A interface está contida na interfase [1].

A junta é o conjunto formado pelos aderentes, o adesivo, o primário (se presente) e todas as interfases associadas. Corresponde à zona na qual dois aderentes são ligados entre si por ação de um adesivo [1].

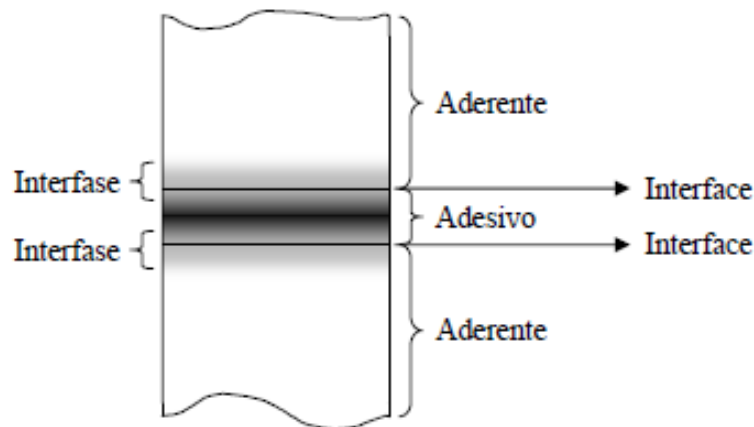


Figura 1: Junta adesiva com indicação dos aderentes, adesivo, interfases e interfaces [4].

As ligações adesivas apresentam as seguintes vantagens [1]:

- Distribuição uniforme das tensões ao longo da largura da junta;
- Redução ou eliminação de concentração de tensões;
- Melhoria da resistência à fadiga;
- Elevada capacidade de amortecimento de vibração;
- Incrementa a rigidez e o isolamento acústico;
- Permite simultaneamente a ligação e a vedação;
- Redução do peso da estrutura;
- Mais económica quando comparada com outros processos de ligação (por exemplo, a soldadura);
- Envolve menos componentes, pelo que podem ser mais simples e rápidas do que as ligações mecânicas;
- É um método simples e de fácil automatização;
- Permite a ligação de qualquer combinação de materiais (similares ou dissimilares);
- Têm a capacidade de ligar substratos sensíveis ao choque;
- Apresentam boa resistência à corrosão, ou seja, têm a capacidade de ligar metais suscetíveis ao desenvolvimento da corrosão galvânica;
- Apresentam versatilidade, ou seja, permitem a ligação de materiais de qualquer espessura ou geometria, permitindo um projeto mais flexível. Permitem a união de formas complexas e superfícies irregulares;
- Permitem a obtenção de contornos suaves, melhorando a aspeto aerodinâmico ou estético;
- Não danificam o substrato, ao contrário das ligações mecânicas;
- Podem ser efetuadas a baixas temperaturas, não provocando alterações estruturais.

No entanto, apresentam as seguintes desvantagens [1]:

- Necessitam de um tratamento das superfícies a ligar. Este tipo de ligação baseia-se no fenómeno de adesão para transferir carga;
- O processo de fabrico e endurecimento pode ser bastante moroso;
- Poderá ser necessária temperatura e pressão;
- A sua resistência e durabilidade são fortemente dependentes das condições de processamento;
- Apresentam durabilidade limitada em condições extremas de serviço, especialmente de temperatura;
- Podem necessitar de ferramentas especiais para garantir o posicionamento e alinhamento dos substratos;
- Podem ser mais caras do que as ligações por fixação mecânica;
- Apresentam desmontagem difícil ou mesmo impossível;
- Alguns adesivos exibem fraca resistência à propagação de fendas;
- Exibem fraca resistência aos esforços de arrancamento e clivagem;
- Alguns adesivos têm tempo de vida limitado;
- Alguns adesivos são tóxicos e inflamáveis, por isso devem ser tomadas precauções e medidas de segurança para evitar efeitos nefastos provocados por alguns solventes e outros químicos;
- Como existe uma enorme variedade de adesivos, é necessário adquirir conhecimentos para seleccionar o adesivo que melhor se adequa à aplicação pretendida;
- A verificação da qualidade da ligação é de difícil inspeção;
- Ainda existe um escasso conhecimento e falta de experiência desta tecnologia quando comparada com as ligações mecânicas tradicionais;
- Não existem normas que permitam projetar qualquer tipo de estrutura através deste método de ligação.

Na Tabela 1 é feita uma comparação entre os vários tipos de ligação mais utilizados.

Tabela 1: Comparação do processo de ligação adesiva com os processos de soldadura e fixações mecânicas (adaptado de [1]).

	Ligação adesiva	Soldadura	Fixações mecânicas
Permanência	Junta permanente.	Junta permanente.	Junta desmontável.
Distribuição de tensões	Boa distribuição de tensões pela superfície (exceto no arrancamento e clivagem).	Promove a criação de tensões internas na estrutura.	Pontos de tensão elevada nos locais de fixação.
Aparência	Boa aparência, não deixando marcas na superfície, o que leva a uma junta praticamente invisível, sendo esteticamente agradável.	Aparência aceitável. Para obtenção de superfícies lisas é necessário trabalho extra.	Descontinuidades da superfície. Nem sempre aceitável.
Materiais ligados	Ideal para a maioria de pares de materiais diferentes.	Limitado a materiais similares.	Aplicável à maioria das formas e combinações de materiais.
Resistência à temperatura	Fraca resistência a altas temperaturas.	Resiste a temperaturas muito elevadas.	Resiste a temperaturas elevadas.
Resistência mecânica	Resistente à corrosão e à fadiga. É necessário ter em atenção à fluência.	Necessita de tratamentos para obter boa resistência mecânica.	Pouco resistente à fadiga. É necessário ter cuidado com o aparecimento de folgas na ligação.

Preparação da junta	É necessário uma limpeza das superfícies.	Necessita de preparação dos bordos para chapas espessas.	Necessita de preparação dos furos e nalguns casos, roscas.
Pós-processamento	Nem sempre necessário.	Por vezes são necessários tratamentos térmicos.	Geralmente não é necessário. Por vezes é necessário um reaperto durante o serviço.
Equipamento	Apenas em alguns adesivos especiais. Equipamentos caros.	Caros, por vezes volumosos e de grande consumo energético.	Relativamente barato e portátil.
Consumíveis	Alguns adesivos (estruturais) são caros.	Fios, eléctrodos (geralmente baratos).	Bastante caro.
Taxa de produção	De segundos a horas (de acordo com o tipo de adesivo).	Pode ser rápido.	Preparação da junta e aperto manual lento. Aperto automatizado rápido.
Garantia de qualidade	Aplicação de ensaios não destrutivos é limitada.	Os ensaios não destrutivos são aplicáveis à maioria dos processos.	Confiança razoável quando o torque de aperto é controlado.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As ligações adesivas são utilizadas em diversas indústrias, nomeadamente na indústria aeroespacial, aeronáutica, automóvel, naval, ferroviária, construção civil, calçado, embalagens, entre outras. O aparecimento dos adesivos estruturais permitiu o desenvolvimento de ligações resistentes entre materiais do mesmo ou de diferentes tipos, o que potencia a construção de componentes e estruturas de alto desempenho.

Indústria aeroespacial

Os equipamentos utilizados na indústria aeroespacial enfrentam condições severas de funcionamento, como elevadas cargas mecânicas num curto espaço de tempo, e exposição prolongada a temperaturas extremas durante longos períodos de tempo [7].

Nesta indústria, as ligações adesivas possibilitaram a ligação de diferentes tipos de materiais, nomeadamente a ligação de materiais compósitos a materiais metálicos. São usadas em componentes estruturais, mas também como proteção das altas temperaturas geradas no corpo das naves quando estas reentram na atmosfera [7].

O uso de ligações adesivas em naves espaciais remonta à mesma era de utilização de materiais compósitos nesta indústria. Na construção das estruturas dos equipamentos são usados compósitos reforçados a fibras de vidro, fibras de carbono, fibras de aramida reforçadas com matriz de resina epóxida, fenólica e termoplástica, e também ligas de metais leves como o alumínio e o titânio [7]. Com o uso de ligações adesivas, é possível promover a união destes materiais, o que não se verifica com os processos de ligação tradicionais.

A Figura 2 mostra a vista explodida de um satélite de telecomunicações, e vários componentes onde são utilizadas ligações adesivas. A Figura 3 mostra a colagem de painéis isoladores na estrutura de um foguetão.

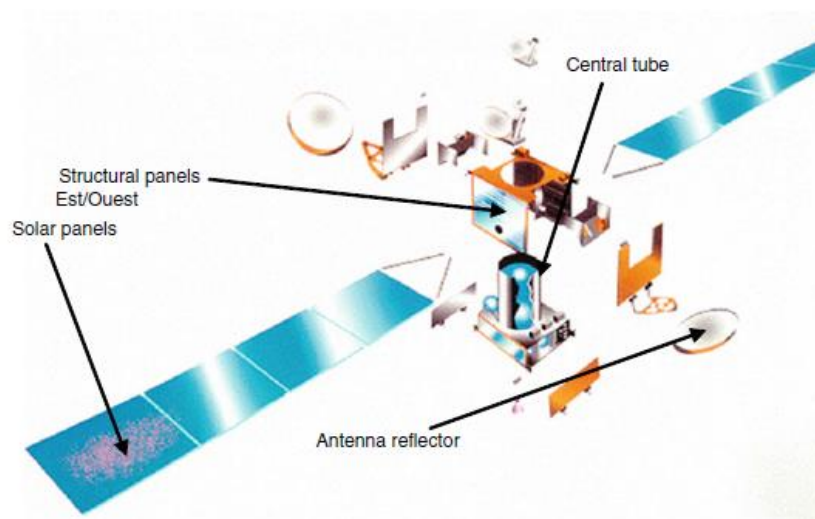


Figura 2: Vista explodida de um satélite de telecomunicações – vários componentes onde são aplicadas ligações adesivas estruturais [7].



Figura 3: Colagem de painéis isoladores térmicos na estrutura de um foguetão [7].

Indústria aeronáutica

Na indústria aeronáutica, as ligações adesivas quando comparadas com as ligações de fixação mecânica apresentam vantagens, nomeadamente na redução significativa do peso, na elevada resistência à fadiga, no bom isolamento, no amortecimento de vibrações e no elevado tempo de vida útil. Esta indústria utiliza duas classes de juntas adesivas: juntas adesivas estruturais e juntas para selagem. As juntas adesivas estruturais transferem as cargas entre os membros, e utilizam adesivos de epóxico, fenólico ou acrílico, enquanto as juntas para selagem protegem as interfaces sujeitas à corrosão [8]. A Figura 4 mostra os locais onde tipicamente são aplicadas ligações adesivas num Airbus A380. Na Figura 5 encontra-se representada uma ligação adesiva aplicada na cobertura de um motor.

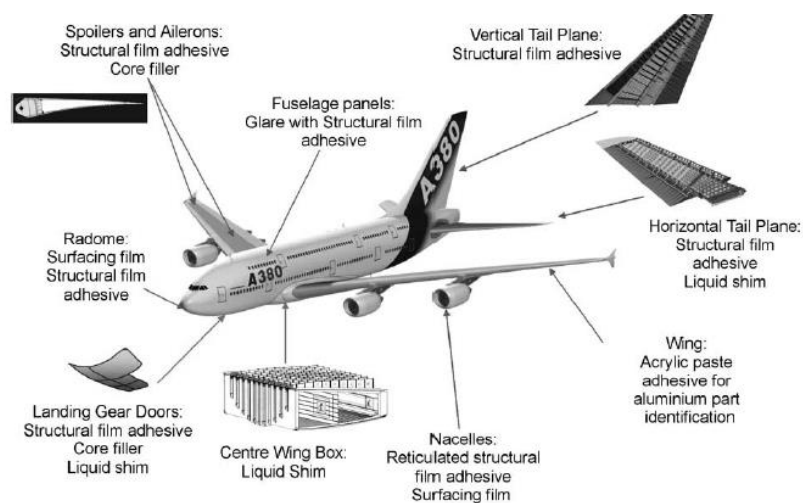


Figura 4: Esquema representativo de um Airbus A380 e locais onde estão aplicadas ligações adesivas [9].

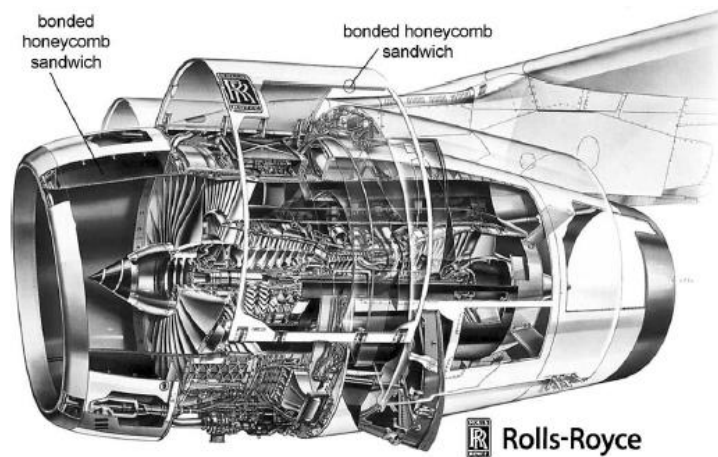


Figura 5: Ligações adesivas aplicadas na cobertura do motor Trent 700 [9].

Indústria automóvel

A indústria automóvel é uma das indústrias mais ativas na utilização de ligações adesivas. A implementação de adesivos iniciou-se com a colagem de para-brisas. Posteriormente foram aplicados noutros componentes tais como vidros traseiros, para-choques, *spoilers*, componentes do interior, emblemas, entre outros [10]. A Figura 6 mostra os diferentes tipos de ligações adesivas utilizadas pela indústria automóvel.

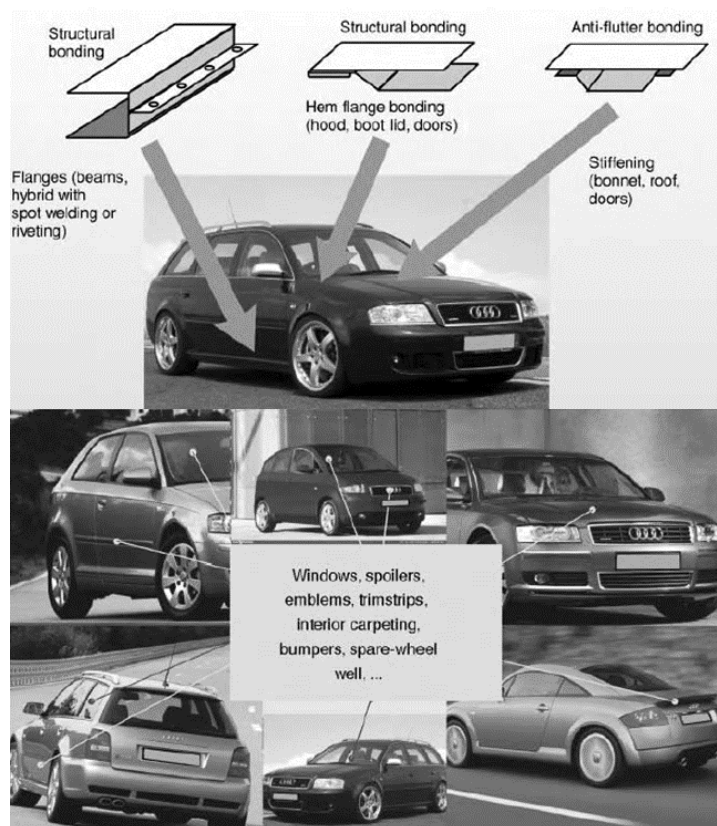


Figura 6: Diferentes tipos de ligações adesivas num automóvel [11].

A finalidade do uso de ligações adesivas nesta indústria consiste na redução do peso dos veículos, o que permite a redução dos consumos e a obtenção de um melhor desempenho dos mesmos. Os adesivos também são usados de forma a prevenir a corrosão, através do preenchimento de falhas na reparação e pintura [10, 12].

O aumento do uso de adesivos, particularmente nas ligações das estruturas dos automóveis, permitiu o aumento da resistência das estruturas, o que leva a uma otimização da rigidez à torção [10].

Indústria naval

A agressividade do ambiente marítimo tem influência nos materiais utilizados pela indústria naval. O uso de materiais compósitos reforçados com fibras é bastante comum nesta indústria. Desta forma, as ligações adesivas são ideais para este tipo de aplicações, uma vez que são leves, resistentes à corrosão, humidade e temperatura, e apresentam excelente estanquicidade [13].

As juntas adesivas são usadas em diversas aplicações, desde pequenos barcos até a ligação de componentes estruturais em plataformas marítimas de exploração de petróleo. Em embarcações, são usadas na ligação de componentes estruturais, componentes interiores, e na reparação dos cascos e convés. Nas plataformas de exploração de petróleo, o uso de ligações adesivas ainda continua em crescimento. São usadas essencialmente na ligação de tubos e na montagem e reparação de estruturas em aço, em zonas onde não é permitido o uso do processo de soldadura por razões de segurança [13].

A Figura 7 mostra os locais comuns da aplicação de adesivos numa pequena embarcação. A Figura 8 mostra aplicação de um adesivo no interior do casco de um barco.

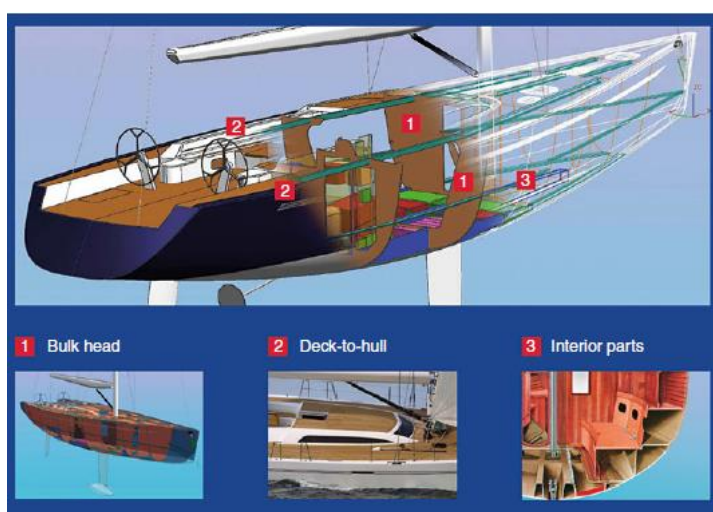


Figura 7: Utilização de ligações adesivas em pequenas embarcações [13].



Figura 8: Aplicação de adesivo no interior do casco, antes da ligação do motor à estrutura do barco [13].

Indústria ferroviária

A indústria ferroviária utiliza adesivos na fabricação de comboios, nomeadamente em aplicações estruturais. Nas estruturas dos comboios são usados adesivos para promover a ligação de painéis decorativos em alumínio às paredes das estruturas, e na união de equipamentos interiores tais como: coberturas de chão, assentos, fixação de materiais isolantes térmicos e acústicos, equipamentos de ar-condicionado, cablagens elétricas, tubagens de água, equipamentos decorativos, componentes interiores, painéis das portas, preenchimentos de juntas e colagens de vidros [14].

Os mais recentes comboios de alta velocidade têm estruturas modernas de baixo peso construídas em alumínio, painéis *sandwich* e polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC). Nisto, as ligações adesivas são ideais para a ligação destes materiais. O uso de ligações adesivas nesta indústria tem vindo a aumentar. Como resultado, os ruídos dentro e fora dos comboios são reduzidos, bem como o consumo de energia [14].

A Figura 9 mostra os locais típicos onde são aplicadas ligações adesivas num vagão de um comboio. A Figura 10 mostra um protótipo de um vagão em PRFC.

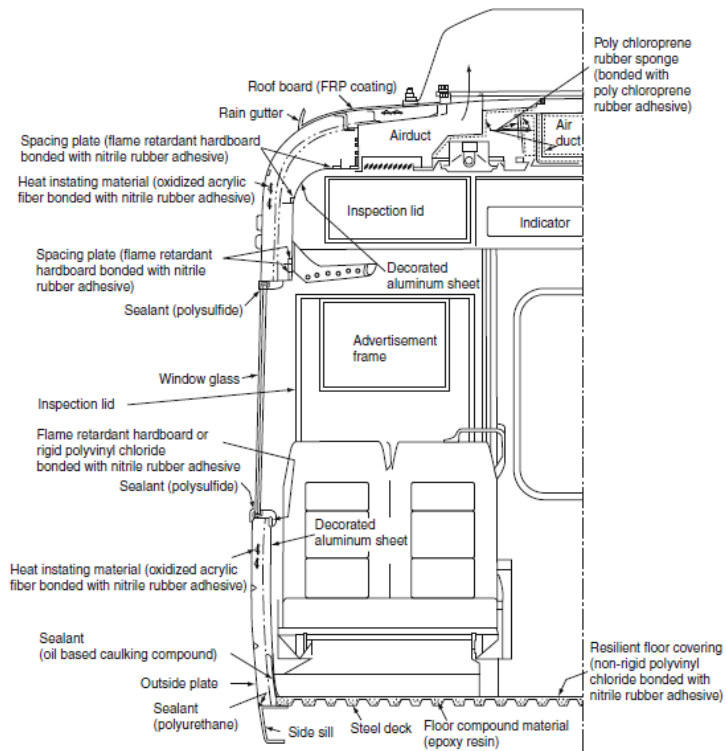


Figura 9: Ligações adesivas e vedantes de juntas num vagão de um comboio [14].

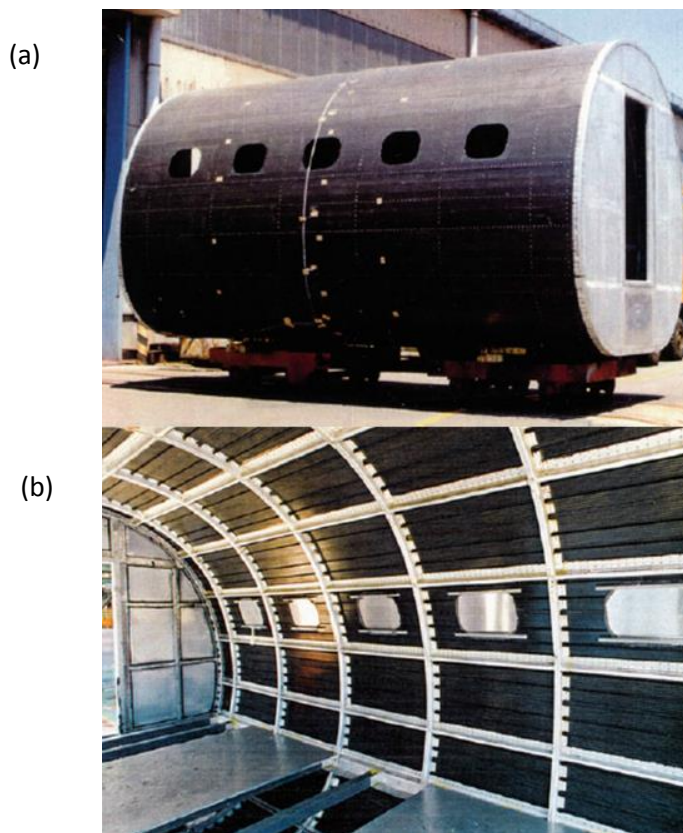


Figura 10: Protótipo em PRFC de uma estrutura para um comboio de alta velocidade, com painéis moldados através do processo de pultrusão: (a) fora da estrutura e (b) dentro da estrutura [14].

Construção civil

Os adesivos elásticos (as propriedades dos adesivos elásticos são combinadas através de vedantes puros e adesivos com resistência estrutural adesiva) estão a começar a ser bastante usados na construção civil. Nesta indústria, as ligações aparafusadas apresentam como desvantagens a visibilidade da junta e a criação de ligações rígidas dos materiais com diferentes coeficientes de expansão, o que leva a picos de tensão nos pontos da ligação. Através da utilização de adesivos elásticos, é criada uma distribuição de tensões mais uniforme. A elevada temperatura pode danificar parafusos e pregos, prejudicando a ligação, por isso os adesivos podem ser uma boa solução como método de ligação [15].

Através dos adesivos elásticos de poliuretano, consegue-se unir quase todos os materiais de construção, como o cimento, madeira, cerâmicos, plásticos, metais e vidro. O uso de adesivos na construção civil cria uma maior resistência ao impacto das ligações, e permite o isolamento acústico e a vedação de juntas [15]. Contudo, o baixo nível de confiança nas ligações adesivas e a sua falta de conhecimento por parte dos construtores, são as principais razões para o pouco uso deste tipo de ligações [15].

A Figura 11 mostra uma ponte pré-fabricada com betão de alto desempenho e resina epóxida de duas partes.

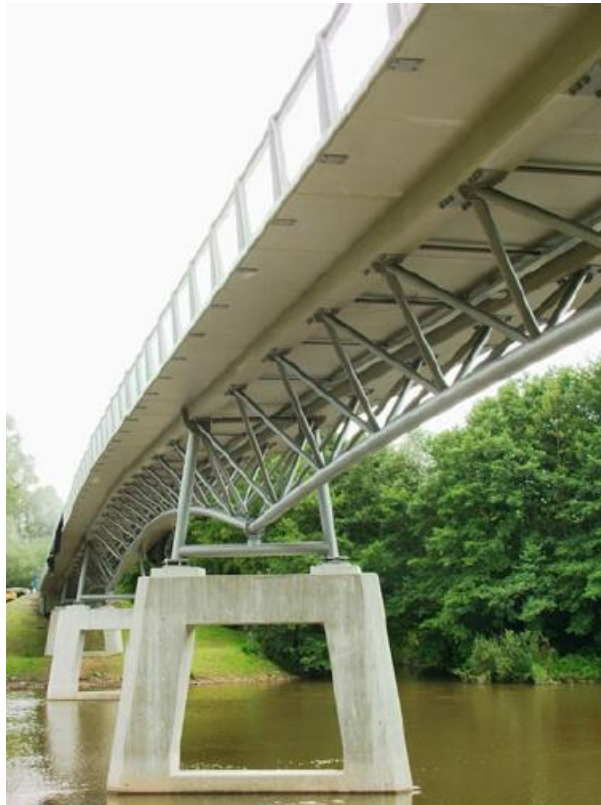


Figura 11: Gärtnerplatz-bridge, Kassel, pré-fabricada com betão de alto desempenho combinado com resina epóxida de duas partes [15].

Indústria elétrica

A indústria elétrica utiliza adesivos com condutividade elétrica para a ligação de componentes elétricos/eletrônicos. Estes adesivos são compósitos que consistem numa matriz polimérica e aditivos condutores de eletricidade. As propriedades mecânicas são provenientes da matriz polimérica, enquanto a condutividade elétrica é fornecida pelos aditivos condutores de eletricidade. Tipicamente, existem adesivos não condutores e dois tipos de adesivos condutores: isotrópicos condutores e anisotrópicos condutores. Estes adesivos são classificados de acordo com a sua condutividade elétrica, que é controlada através dos aditivos condutores de eletricidade existentes na matriz polimérica. A sua aplicação na indústria elétrica requer dois requisitos especiais: a condutividade elétrica e as propriedades termomecânicas [16].

Os adesivos usados nesta indústria podem ser classificados em duas categorias: adesivos com condutividade elétrica e adesivos isoladores. Os adesivos com condutividade elétrica são geralmente usados para a ligação de partes elétricas condutoras na montagem elétrica, enquanto que os adesivos isoladores são usados para proteção de circuitos abertos ou fios de ligação. Os adesivos isoladores devem ter elevada resistência elétrica, elevada resistência térmica, boa flexibilidade, e são empregues como proteção numa vasta gama de componentes elétricos [16].

Apesar das ligas de soldadura de estanho-chumbo promoverem um baixo ponto de fusão e boa fiabilidade mecânica, a toxicidade e a incompatibilidade ambiental do chumbo, levaram à implementação de novas medidas no mercado para produtos eletrónicos, nomeadamente na redução e possível eliminação do uso destes materiais. Como resultado, a indústria está a mudar para a utilização de chumbo sem ligas e adesivos de condutividade elétrica [16]. A Figura 12 mostra um exemplo de uma placa elétrica com interconectores em adesivo.

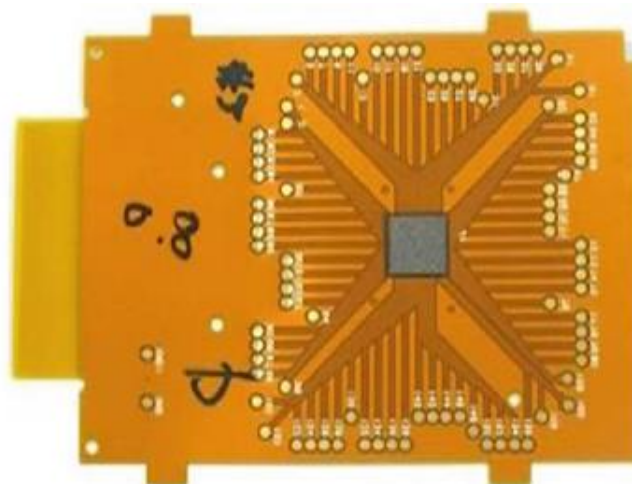


Figura 12 Placa elétrica com interconectores em adesivo [16].

Indústria do calçado

O uso de adesivos na indústria do calçado é de extrema importância, uma vez que a maior parte dos componentes do calçado são ligados por adesivos. A ligação da parte superior do calçado à sola através de adesivos constitui uma das mais exigentes tecnologias de ligação adesiva nesta indústria. Diferentes tipos de materiais são usados na produção de calçado. Estes materiais são alterados de ano em ano e conforme a estação. Para cada diferente modelo de calçado, a ligação adesiva deve ser projetada, e ocorre várias vezes ao ano (consoante a estação). Por isso, é difícil o estabelecimento de um padrão da aplicação de adesivos [17].

A indústria do calçado usa as ligações adesivas como método alternativo de ligação à costura e ao uso de agrafos, pregos e tachas. As vantagens da utilização das ligações adesivas são a obtenção de juntas mais flexíveis e homogêneas, distribuição de tensões ao longo das juntas, melhor aspecto, possibilidade de obtenção de novos *designs* e automação do processo de colagem. Contudo, apresenta algumas desvantagens, tais como a necessidade de controlo permanente para evitar possíveis problemas de adesão entre a parte superior do calçado e a sola [17].

Diferentes tipos de ligações adesivas são aplicados consoante o tipo de calçado. Caso seja calçado para uso normal, a colagem é pouco exigente. No entanto, o calçado desportivo já exige uma colagem mais exigente, devendo possuir baixo peso, alto desempenho durante o impacto e à flexão, conforto e alta durabilidade. O calçado para trabalho requer elevada exigência das ligações, uma vez que têm de cumprir normas de segurança, tais como a resistência a solventes, altas temperaturas ou forças elevadas durante longos períodos de tempo [17]. A Figura 13 mostra a separação entre a parte superior e a sola, e o adesivo utilizado para a ligação de ambas.



Figura 13: Separação entre parte superior e a sola, e adesivo para ligação de ambas [17].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Uma ligação adesiva pode estar sujeita a esforços de:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;
- Clivagem (*Cleavage*);
- Arrancamento (*Peel*).

Na Tabela 2 são indicados os tipos de esforços numa ligação adesiva e as respetivas distribuições de tensões.

Tabela 2: Tipos de esforços numa ligação adesiva e respetivas distribuições de tensões (adaptado de [1, 4]).

Esforços	Ligação adesiva	Distribuição de tensões
Tração		
Compressão		
Corte		



Esforços de tração

Os esforços de tração consistem em tensões que se desenvolvem quando atuam forças perpendiculares ao plano de ligação, em que a distribuição das tensões normais é uniforme ao longo do comprimento de sobreposição. Porém, nas juntas adesivas, a distribuição destas tensões não é uniforme, uma vez que existem picos de tensões de clivagem ou de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição [1, 2].

Esforços de compressão

Os esforços de compressão consistem em forças que comprimem um aderente contra o outro. A distribuição de tensões é constante ao longo do adesivo. Uma junta em compressão pura praticamente não precisa de adesivo [1, 2].

Esforços de corte

Os esforços de corte consistem em forças que provocam o escorregamento entre os dois aderentes. As tensões de corte são máximas nas extremidades da junta, porque ao longo do comprimento de sobreposição, cada um dos aderentes sofre uma deformação diferencial, uma vez que cada aderente deforma-se longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade até à extremidade oposta da sobreposição [1, 2].

Quanto maior for o aumento do comprimento de sobreposição, maior será a deformação longitudinal. Por isso, a largura de sobreposição é mais importante do que o comprimento de sobreposição, uma vez que o aumento da largura torna a ligação mais resistente. Isto acontece porque a área dos extremos da ligação é aumentada. O aumento do comprimento de sobreposição também aumenta a resistência da junta. No entanto, devido ao efeito acentuado da deformação diferencial dos aderentes, a sua resistência irá ter um aumento a uma taxa decrescente [1, 2].

Esforços de clivagem

Os esforços de clivagem resultam de forças de tração aplicadas na extremidade da junta, o que provoca uma elevada concentração de tensões na extremidade da junta [1, 2].

Esforços de arrancamento

Os esforços de arrancamento são semelhantes aos esforços de clivagem mas, neste tipo de esforços, um ou os dois aderentes são flexíveis, e podem deformar plasticamente através das forças aplicadas, o que leva a uma elevada concentração de tensões numa das extremidades da junta [1, 2].

Nas ligações adesivas, os esforços de clivagem e arrancamento devem ser sempre evitados. Preferencialmente, as juntas devem utilizar configurações de modo a suportarem maioritariamente esforços de corte. As juntas sujeitas a esforços de clivagem e arrancamento são menos resistentes do que as sujeitas a esforços de corte, porque as tensões de clivagem e arrancamento concentram-se maioritariamente numa ou nas duas extremidades da ligação. A escolha do tipo de junta e adesivo a utilizar é fundamental para a criação de uma ligação adesiva resistente [1, 2].

Modos de rotura

Na Tabela 3 são indicados os modos de rotura mais frequentes nas juntas adesivas, sendo elas:

- Rotura adesiva;
- Rotura coesiva e coesiva próxima do aderente;
- Rotura por tração de um dos aderentes (rotura pelo aderente);
- Rotura mista.

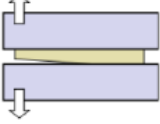
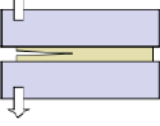
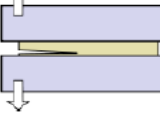
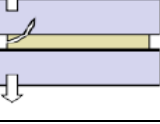
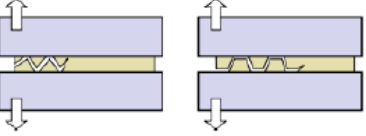
Rotura adesiva

A rotura adesiva ocorre entre a interface do adesivo e num dos aderentes, proveniente da falha de adesão entre o adesivo e a superfície do aderente. Após a rotura, é possível verificar que a superfície de um dos aderentes não contém resíduos de adesivo, e a superfície de rotura do outro aderente encontra-se coberta de adesivo [1].

Esta rotura pode acontecer caso haja má preparação das superfícies ou em juntas adesivas de sobreposição simples, onde existem variações de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo. Estas tensões são máximas junto da interface [1].

A maior parte das roturas adesivas são na realidade roturas coesivas visto que, após uma observação mais rigorosa do substrato, encontra-se a existência de uma película fina de adesivo. Por este motivo, alguns autores preferem o termo rotura aparente na adesão [4].

- Tabela 3: Modos de rotura mais frequentes numa junta adesivas (adaptado de [18]).

Rotura	Ligação adesiva
Adesiva	
Coesiva	
Coesiva próxima do aderente	
Aderente	
Mista	

Rotura coesiva

A rotura coesiva dá-se no interior do adesivo, e ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Após a rotura, ambas as superfícies se encontram cobertas por adesivo. Também pode ocorrer rotura coesiva próxima do aderente. A rotura coesiva é um dos modos de rotura preferenciais de uma ligação adesiva [1].

Rotura pelo aderente

Tal como a rotura coesiva, a rotura pelo aderente também é um modo de rotura preferencial, uma vez que utiliza a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta. Caso a rotura seja pelo aderente, e se a carga de rotura corresponder à resistência nominal do substrato, pode-se concluir que a junta foi bem fabricada [1].




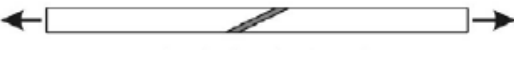




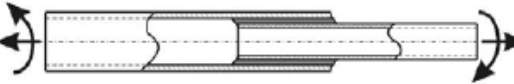
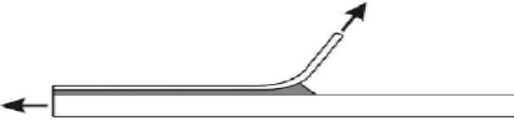

Rotura mista

A rotura mista consiste na combinação da rotura adesiva com a rotura coesiva. Este tipo de rotura ocorre principalmente devido à falta de limpeza da superfície a ligar ou no uso de um adesivo impróprio para a ligação pretendida [1].

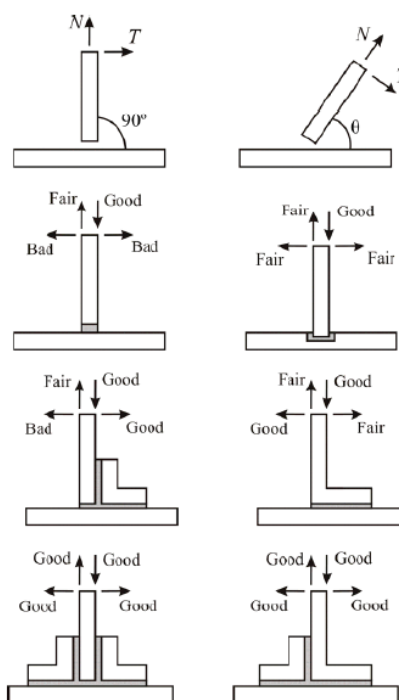
2.1.4 Configurações possíveis de junta

A Tabela 4 indica as configurações de junta mais utilizadas.

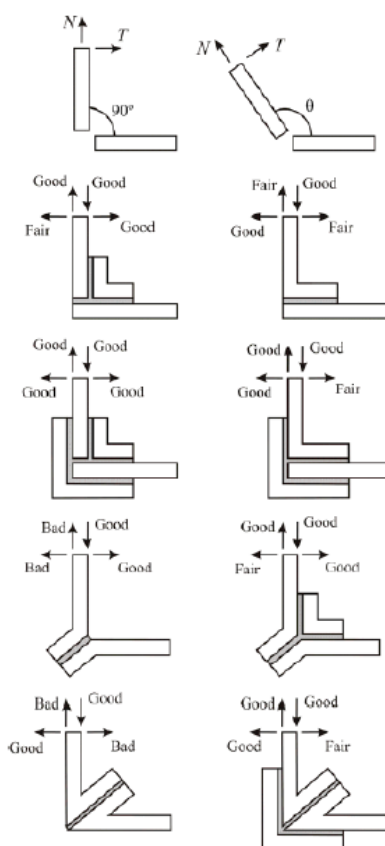
Tabela 4: Configurações de junta mais utilizadas (adaptado de [1, 19]).

Sobreposição simples	
Sobreposição dupla	
Chanfro exterior	
Chanfro interior (scarf)	
Degrau	
Cobre-junta	
Cobre-junta dupla	
Topo a topo	
Tubular	
Arrancamento (peel)	
Ressalto (joggle lap joint)	

Juntas em T

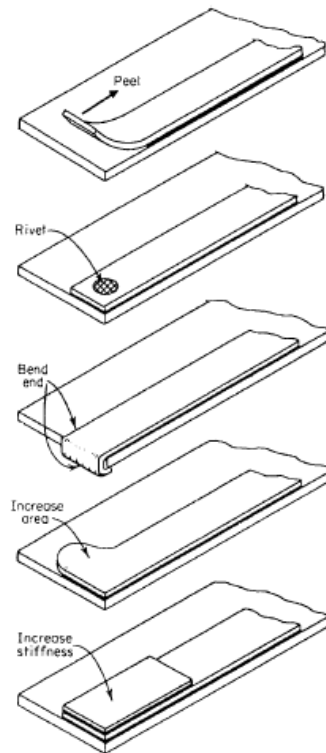


Juntas de canto



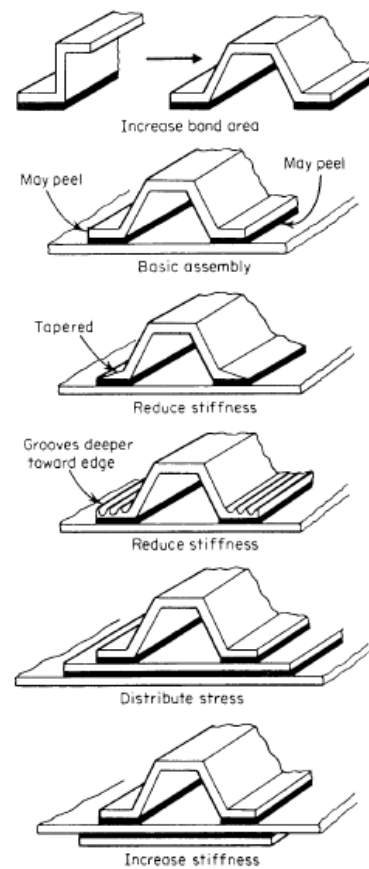
Juntas de reforço

**Reforços para
minimizar o
arrancamento**



Juntas de reforço

**Reforços para
minimizar a
clivagem**



Juntas sobreposição simples

As JSS são as mais utilizadas, porque são de fácil fabricação e a carga é transmitida para os adesivos maioritariamente através de tensões de corte. Contudo, a aplicação descentrada da carga provoca efeitos de flexão, o que origina o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (arrancamento), e posteriormente perda de resistência da junta. Também é verificado nas extremidades da junta a ocorrência de um efeito de entalhe causado pela mudança brusca da geometria. O efeito da flexão combinado com a mudança brusca de secção ocorre na zona mais crítica da ligação, o que provoca a concentração de tensões e a redução da resistência da junta. Para combater estes problemas, recorre-se às juntas de sobreposição dupla (JSD), onde os efeitos de flexão são inferiores [1].

Juntas sobreposição dupla

As JSD são ideais para a redução dos efeitos de flexão, uma vez que apresentam uma configuração simétrica. Caso os substratos exteriores sofram flexão, podem desenvolverem-se tensões de tração e compressão na linha de adesão. O processo de fabrico deste tipo de juntas é mais demorado quando comparado com as JSS [1].

Juntas chanfro exterior

As juntas com chanfros exteriores têm como finalidade a redução dos picos de tensão que ocorrem nas extremidades das JSS, de maneira a promover uma distribuição mais uniforme das tensões. Neste tipo de juntas, as tensões de arrancamento são reduzidas [1].

Juntas chanfro interior e degrau

As juntas de chanfro interior (*scarf*) e as juntas em degrau são caracterizadas pela diminuição da variação de tensões ao longo do adesivo, de maneira a aumentar a sua resistência, associada também à diminuição da excentricidade dos esforços. Neste tipo de juntas, há uma redução das tensões de arrancamento. Estas juntas são conhecidas pela dificuldade em maquinar os degraus e as rampas, mas quando aplicável em substratos em compósito tornam-se vantajosas, uma vez que é comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, com a finalidade em eliminar as operações de maquinagem, de maneira a evitar a danificação das fibras e tornar o processo de fabrico mais económico [1].

Juntas cobre-junta e cobre-junta dupla

As juntas com cobre-junta apresentam resistência superior às JSS, mas estão sujeitas a esforços de arrancamento, tal como nas JSS. Para combater esse efeito são utilizadas juntas com reforço duplo (juntas com cobre-junta dupla) onde o momento fletor é menor, o que torna este tipo de junta preferível [1].

Juntas topo a topo

As juntas topo a topo apresentam elevadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da junta. São pouco resistentes a esforços de flexão, uma vez que o adesivo é sujeito a esforços de clivagem. Estas juntas são de fabricação simples [1].

Juntas tubulares

As juntas tubulares possibilitam a união de perfis tubulares com extremidades planas ou em chanfro, de maneira a criar uma junta com boa resistência a esforços de tração e de compressão. O principal inconveniente desta configuração de junta consiste no aparecimento de esforços de arrancamento caso não haja um perfeito alinhamento do eixo de revolução dos substratos [1].

Juntas de arrancamento

As juntas de arrancamento (*peel*) têm uma aplicação muito restrita. São essencialmente aplicadas em ensaios de caracterização de adesivos. Como exemplo, a indústria do calçado utiliza este tipo de juntas para testar a resistência da ligação dos vários materiais existentes no calçado [17].

A solicitação de juntas com substratos finos e componentes espessos leva ao aparecimento de forças de arrancamento, que são indesejadas numa ligação adesiva. As forças de arrancamento são geradas devido à concentração de tensões em porções muito reduzidas na área de ligação [2].

Juntas de ressalto

As juntas de ressalto (*joggle lap joint*) são indicadas para garantir o alinhamento das forças nas JSS. Podem ser fabricadas a partir da dobragem dos aderentes. No entanto, a principal desvantagem deste tipo de juntas consiste na dificuldade da sua fabricação em substratos frágeis ou de elevada resistência [1].

Juntas em T

As juntas em T são caracterizadas por obterem uma orientação perpendicular entre substratos. No projeto das juntas em T deve-se ter o cuidado de reduzir ao máximo os esforços de arrancamento e aumentar os esforços de corte no adesivo. As juntas em T estão normalmente sujeitas a esforços transversos (T) ou a esforços normais (N) [1].

Juntas de canto

As juntas de canto são semelhantes às juntas em T. A diferença reside no posicionamento da ligação, ou seja, nas juntas de canto a ligação é efetuada nas extremidades de um dos aderentes. Este tipo de juntas é utilizado para diminuir o efeito de arrancamento no adesivo [1].

Juntas de reforço

As juntas de reforço são utilizadas para diminuir os esforços nas ligações, e aumentar a sua rigidez. As juntas com aderentes finos e componentes espessos, quando solicitadas à tração, podem gerar tensões de cedência à tração (σ_y). Para combater estas tensões, utilizam-se reforços para minimizar o arrancamento. No entanto, os reforços sobre aderentes finos com o intuito de aumentar a sua rigidez, quando solicitados à flexão, podem induzir clivagem no adesivo. Logo, é fundamental a utilização de soluções para melhorar a resistência aos esforços de flexão, através do aumento da área adesiva, da flexibilidade do rebordo e da rigidez da base [1].

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais possuem elevada resistência e desempenho, são resistentes a esforços elevados, a resistência ao corte da ligação excede os 6,9 MPa, não sofrem fluência quando sujeitos a cargas significativas, são resistentes a cargas elevadas sem grandes deformações, são capazes de suportarem transmissões de esforços de grande grandeza e possuem boa resistência ao meio ambiente [2]. Na Figura 14 são indicados os vários tipos de adesivos estruturais.

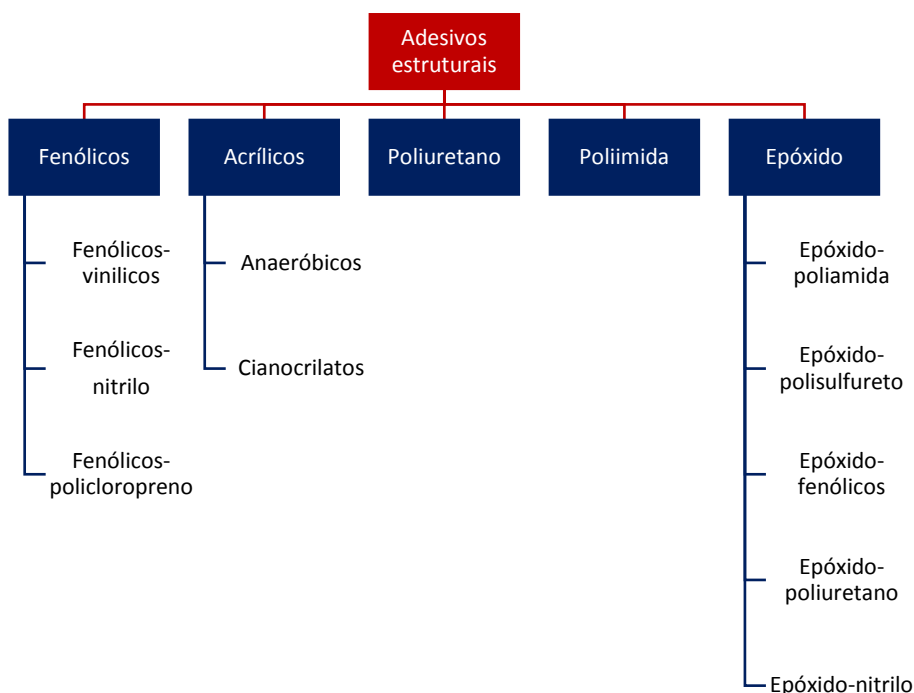


Figura 14: Adesivos estruturais (adaptado de [5]).

Adesivos fenólicos

Os adesivos fenólicos apresentam um baixo custo, possuem boa resistência mecânica e boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Como principais limitações apresentam baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e grande fragilidade proveniente das elevadas tensões internas geradas pela contração durante o processo de cura. Têm sido desenvolvidos adesivos que combinam resinas fenólicas com resinas vinílicas ou elastômeros (nitrilo, cloropreno), com o objetivo em melhorar algumas propriedades, especialmente a resistência ao impacto. Os adesivos que contêm resina vinílica apresentam uma temperatura máxima de utilização de 130°C, apresentam uma resistência mecânica semelhante aos adesivos fenólicos com nitrilo e são comercializados como emulsões e filmes ou apresentados sob a forma de dois componentes, como por exemplo líquido + pó [5].

Adesivos acrílicos

Os adesivos acrílicos incluem anaeróbicos (ou diésteres poliacrílicos), cianoacrilatos e os adesivos acrílicos modificados. Os adesivos anaeróbicos consistem em líquidos monocomponentes armazenados com ar, para manterem a sua forma monomérica. No processo de endurecimento o oxigênio é eliminado, dando origem a uma reação de polimerização do tipo radical-livre. Apresentam resistência mecânica considerável, boa resistência a solventes e a sua temperatura de utilização situa-se próxima dos 150°C. Os adesivos acrílicos podem ser utilizados em diversos materiais tais como: Teflon[®], acetal, poliolefinas (PEBD, PEAD), *Nylon* e policloreto de vinilo (PVC) [5].

Os cianoacrilatos são líquidos monocomponentes que se utilizam sem solventes e têm uma cura rápida à temperatura ambiente. O processo de cura é influenciado pela humidade relativa existente no meio circundante ou nas superfícies a serem coladas, pelo teor do pH do meio e pela espessura da junta colada. Apresentam excelente resistência à tração mas baixa resistência ao arrancamento, fragilidade e custo elevado [5].

Na família dos adesivos acrílicos, podem também ser referidos os adesivos acrílicos modificados, também designados por acrílicos reativos. A modificação é feita com a introdução de polimetilmetacrilato e borracha de nitrilo. Têm como vantagens a elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Possuem baixa contração durante o processo de cura e permitem ligações fortes, mesmo quando as superfícies não estão convenientemente limpas. As principais desvantagens são a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e a elevada inflamabilidade [5].

Adesivos de poliuretano

Os adesivos de poliuretano advêm da reação de um polioliol (ou poliéter-polioliol) com isocianato e apresentam-se sob a forma de dois componentes. A cura é lenta à temperatura ambiente, possuem um bom comportamento a baixas temperaturas, boa

resistência ao arrancamento e à abrasão, boa tenacidade e flexibilidade. Como desvantagens, apresentam elevada sensibilidade às proporções da mistura, a toxicidade do isocianato e resistência ao corte à temperatura ambiente inferior à de outras famílias de adesivos estruturais [5].

Adesivos de poliimida

Os adesivos de poliimida são indicados em aplicações para temperaturas de serviço elevadas, superiores a 200°C. Encontram-se sob a forma de filmes ou líquidos e o seu custo é relativamente elevado. O uso deste tipo de adesivos é complexo, uma vez que estes requerem longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevada. São frágeis e pouco tenazes, resistem mal às vibrações e têm grande dureza [5].

Adesivos de epóxido

Os adesivos de epóxido possuem uma boa resistência mecânica, não produzem agentes voláteis durante a cura e apresentam contração reduzida. São aplicados numa vasta variedade de materiais, e são comercializados sob a forma de monocomponentes ou policomponentes (resina e endurecedor), baseados maioritariamente em diglicidil éter de bisfenol A. Neste tipo de adesivos não é necessária a aplicação de pressão no processo de cura, pelo que basta simplesmente o posicionamento das peças a serem ligadas. As suas propriedades podem ser modificadas através da adição de outras resinas como a poliamida, polisulfido e fenólicas, ou por um elastómero, como o poliuretano ou nitrilo [5].

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, as juntas adesivas eram sobredimensionadas devido à inexistência de modelos de plasticidade precisos e critérios de rotura adequados para a precisão da rotura das juntas, o que resultava em estruturas pesadas e de elevado custo. Após o aparecimento de metodologias de projeto e previsões de resistência mais confiáveis, surgiram novas formas de análise para o uso eficiente de ligações adesivas. Existem dois métodos de análise: a análise através de métodos analíticos e a análise através de métodos numéricos, como por exemplo o MEF.

Durante a década de 1930, o estudo de juntas adesivas era realizado através do modelo fechado de Volkersen [20], no qual se consideram materiais totalmente elásticos e que a deformação elástica do adesivo ocorre apenas por corte. Contudo, se o adesivo se deforma plasticamente, ou se forem utilizados materiais compósitos como aderentes ou aderentes de materiais diferentes, a formulação analítica de juntas adesivas torna-se mais complexa.

Adams foi o pioneiro na utilização das análises de elementos finitos (EF), que são as mais utilizadas no estudo de juntas adesivas [21]. Harris e Adams [22] incluíram nas análises

efeitos como a rotação da junta, a plasticidade do adesivo e dos aderentes e a influência do filete de adesivo.

Para a previsão da resistência de juntas adesivas, inicialmente usava-se a mecânica dos meios contínuos, em que é exigida uma distribuição de tensões, mas também um critério de rotura adequado. Também podem ser utilizadas análises EF conjugadas com técnicas da mecânica da fratura, através dos fatores de intensidade da tensão ou através da técnica do fecho da fenda virtual. A principal desvantagem deste método de previsão consiste na sua complexidade e do elevado esforço computacional, devido à necessidade da criação de uma nova malha sempre que haja propagação de fenda [23].

A modelação do dano em materiais por combinação de EF com MDC é uma técnica de análise que utiliza a modelação por EF convencional em regiões em que é previsto que haja dano, e utiliza também a mecânica da fratura, através da utilização de elementos coesivos na simulação do crescimento de fenda. Também pode-se recorrer ao método de elementos finitos estendido (MEFX) para modelar a propagação de fendas dentro dos materiais, através de funções que representam um campo de deslocamentos contínuo.

2.2.1 Modelos analíticos

Os modelos analíticos foram os primeiros métodos de previsão da resistência de ligações adesivas. As fórmulas de Volkersen [20] e Goland e Reissner [24] foram as primeiras fórmulas capazes de simplificar os campos de tensão nas estruturas, devido à simplificação da geometria da estrutura, das condições fronteira e dos carregamentos aplicados. Estas fórmulas originaram soluções mais eficientes, e levaram à análise de estruturas de uma forma mais rápida e simplificada. A utilização destes modelos facilitou o cálculo de tensões, deformações e distribuições do momento fletor da estrutura. Na maioria dos casos, a previsão da resistência é realizada através de critérios baseados em tensões ou deformações. Ao longo dos anos os modelos analíticos foram substituídos pelos modelos numéricos.

2.2.2 Modelos numéricos

Os modelos numéricos mais utilizados para o estudo de ligações adesivas são a mecânica dos meios contínuos, mecânica da fratura, MDC, mecânica do dano e o MEFX.

2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Para a previsão da resistência de juntas através da mecânica dos meios contínuos, são utilizados critérios de rotura com base nos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação previstos pelos modelos analíticos ou pelos modelos numéricos (análises EF). Considera-se que a rotura ocorre quando os valores obtidos através de critérios baseados na tensão e na deformação (critério da tensão normal máxima, ou o

critério de tensão de corte máxima) atingem a resistência limite dos materiais. Este método de análise foi aplicado às ligações adesivas depois do MEF e da programação computacional terem sido disponibilizadas [22].

A mecânica dos meios contínuos tem como vantagem a possibilidade da análise de ligações adesivas com ou sem dano inicial. Contudo, devido às arestas vivas das juntas, são geradas singularidades de tensões nas extremidades das regiões de sobreposição, o que constitui a principal limitação deste modelo. Quando se realiza uma análise EF a uma junta adesiva, as tensões nas extremidades da junta aumentam com o refinamento da malha [25]. Ao longo dos anos têm vindo a ser desenvolvidas melhorias neste tipo de modelação, como o desenvolvimento de critérios mais rigorosos de tensão e deformação para diferentes materiais e mecanismos de fratura, mas também a combinação de modelos de meios contínuos mais realistas. No entanto, ainda não foram criados mecanismos para combater o problema da malha.

2.2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os seus materiais são contínuos e sem defeitos, e não dá solução para o estado de tensão nos pontos em que existem singularidades de tensão ou deformação. Nas estruturas os defeitos mais comuns são as fendas, pelo que se recorre à mecânica da fratura para resolver este problema. A mecânica da fratura assume que as tensões calculadas pela mecânica dos meios contínuos são singulares na extremidade da fenda. Williams [26] descobriu que existe sempre uma singularidade quando o ângulo da fenda é inferior a 180° , através do estudo de singularidades de tensão num entalhe em cunha. O mesmo se aplica para singularidades de tensões entre dois materiais ligados por adesivos e com um canto reentrante.

A mecânica da fratura tem vindo a ser aplicada em diversos problemas de engenharia. Diversos estudos sobre juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia e o seu respetivo valor crítico, ou a resistência à fratura, em vez de fatores de intensidade de tensão, uma vez que se torna difícil a sua determinação quando a fenda ocorre numa interfase ou perto dela [27]. A fratura de juntas adesivas também ocorre em modo misto, devido às propriedades dos diferentes materiais e a sistemas de deformação complexos. Para a fratura do modo misto, os critérios de rotura podem ser desenvolvidos de forma semelhante aos critérios de rotura clássicos, embora deva ser introduzido o conceito de superfície de fratura.

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

No final dos anos 50 e início dos anos 60, Barenblatt [28] desenvolveu estudos acerca do MDC para descrever danos sob cargas estáticas na zona em processo de fratura na extremidade da fenda. Desde então, os MDC foram amplamente aplicados para a

simulação do início e propagação de fendas em problemas de rotura coesiva e interfacial, ou em delaminações em compósitos. Segundo Hansen e Jensen [29], os MDC podem ser implementados em elementos de mola ou em elementos coesivos, mas também em análises EF para a modelação do comportamento da fratura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [30]. A Figura 15 mostra aplicação dos MDC na simulação de juntas adesivas considerando a aproximação local (a) e a aproximação contínua (b).

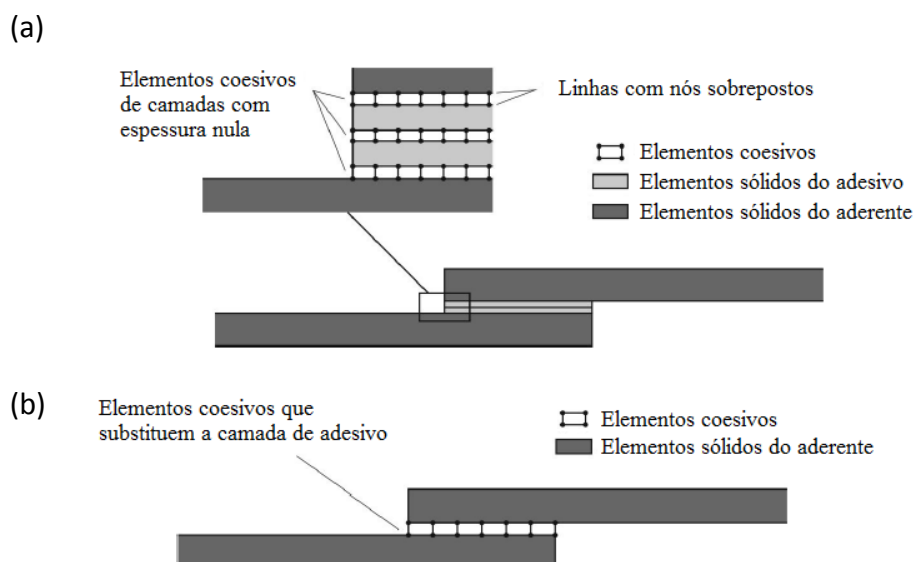


Figura 15: Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: (a) aproximação local e (b) modelação de uma camada fina de adesivo - aproximação contínua (adaptado de [31]).

O principal conceito dos MDC consiste na utilização de uma ou mais interfaces/regiões de fratura, que possam ser introduzidas artificialmente em estruturas e nas quais é permitido o crescimento do dano por uma possível descontinuidade no campo de deslocamentos, através de leis de tração-separação usadas para a modelação de interfaces ou regiões sólidas. Os MDC são normalmente utilizados entre nós emparelhados em elementos coesivos, e são também utilizados na ligação de nós sobrepostos de elementos de diferentes materiais ou diferentes camadas em materiais compósitos. Podem também ser aplicados entre dois materiais que não contêm contacto para simular camadas finas e para simular ligações adesivas.

De maneira a explicar a degradação gradual das propriedades do material, são modeladas a evolução da força e o amaciamento até à rotura. Segundo Yang e Thouless [32], as leis de tração-separação são geralmente constituídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora uma ou mais etapas possam ser definidas de forma diferente, de maneira a representarem de uma forma mais precisa o comportamento dos materiais.

2.2.2.4 Mecânica do dano

Neste tipo de modelação, o dano é o principal parâmetro, dando informações acerca da diminuição da rigidez ou da resistência dos materiais. Pode ser utilizado em ligações adesivas finas, delaminações em compósitos e em roturas matriciais, de forma a mostrarem a gravidade do dano do material durante o carregamento [33, 34]. A absorção do dano na pré-fenda e a propagação da fenda podem ser modeladas através de uma lei de evolução de dano, que utiliza o dano como variável. As variáveis de dano são divididas em dois grupos: (1) variáveis que preveem a quantidade do dano pela redefinição das propriedades dos materiais, não estando diretamente relacionadas com o mecanismo de dano e (2) variáveis ligadas à definição física de um tipo de dano específico, tais como porosidades ou área relativa de micro cavidades [35].

Nestas técnicas, o crescimento do dano é definido através de uma função de carga para modelações estáticas ou para carregamentos cíclicos nas análises de fadiga. As técnicas da mecânica do dano, quando comparadas com as análises por MDC, não fazem a distinção entre a fase de iniciação à fadiga e a propagação de fenda, mas podem fornecer bases para a sua previsão [33]. Apesar disso, é possível simular a evolução do dano à fadiga antes de uma macro fenda. A modelação à fadiga através dos MDC só pode ser realizada através de percursos de fenda pré-definidos. As técnicas da mecânica do dano podem ser recomendadas caso o dano se encontre espalhado, ou se o percurso da fenda for desconhecido [36].

2.2.2.5 Método de Elementos Finitos Estendido

O MEFX é uma melhoria do MEF com a finalidade de modelar o crescimento do dano em estruturas. São utilizadas leis de dano para a previsão de fratura baseadas na resistência dos materiais para a iniciação de dano, e deformações para a previsão da rotura (definida por G_{IC}), em vez dos valores de resistência coesiva à tração/corte (t_n^0/t_s^0) ou deslocamentos correspondentes à resistência coesiva à tração/corte (δ_n^0/δ_s^0) utilizados nos MDC. Quando comparado com o MDC, o MEFX apresenta a vantagem de a fenda não percorrer uma trajetória pré-definida, ou seja, a fenda pode propagar-se livremente no interior do material sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das discontinuidades, ou refazer a malha na proximidade da fenda durante a análise [37]. Este método de análise é visto como uma extensão da modelação por EF, cujas características fundamentais foram apresentados por Belytschko e Black [38] nos finais dos anos 90. O MEFX têm como base o conceito de partição da unidade, e pode ser implementado nos EF através da utilização de funções locais de enriquecimento para os deslocamentos nodais próximos da fenda, o que permite o crescimento e separação entre as faces da fenda [39]. A extremidade da fenda pode mudar a sua posição/orientação devido ao seu crescimento. Este efeito depende das condições de

carga e geometria da estrutura, mas também devido à criação de funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF em torno da fenda.

Campilho et al. [40] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de JSS e JSD, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 16). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

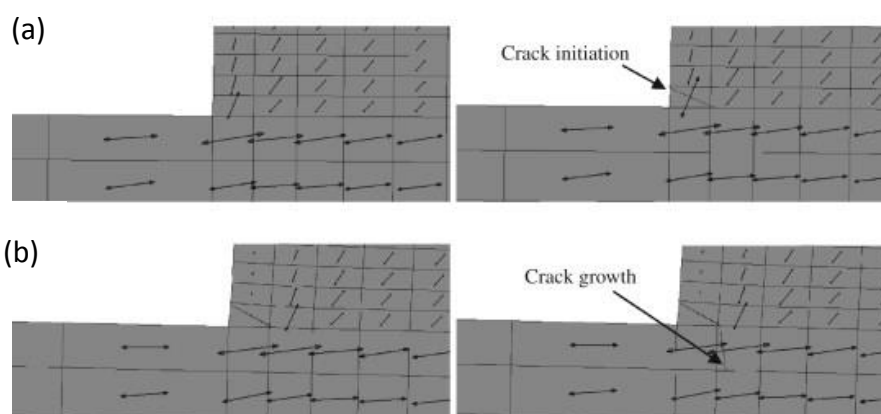


Figura 16: Representação das tensões usando o MEFX em JSS: (a) iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição e (b) crescimento do dano do aderente de alumínio [40].

2.3 Técnicas para aumento de resistência

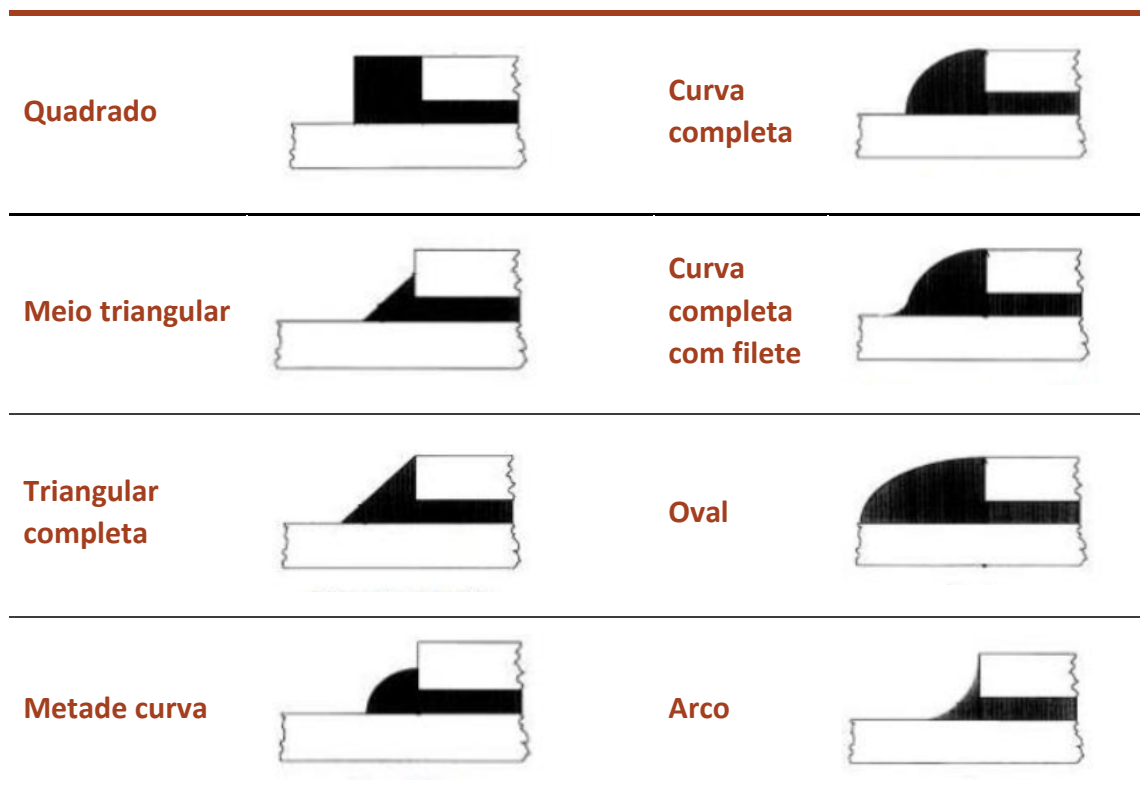
As extremidades das juntas adesivas estão sujeitas a concentrações de tensões, o que leva ao surgimento de fendas ou mesmo à rotura prematura da mesma. Como tal, é necessário aplicar técnicas para aumentar a resistência das juntas durante a sua fabricação, que podem ser divididas em modificações nos próprios materiais ou modificações da geometria da junta [41].

2.3.1 Filetes de adesivo

A utilização de filetes de adesivo permite a redistribuição das tensões nas regiões das extremidades de sobreposição das juntas, o que provoca o aumento da resistência da ligação [41-43]. São aplicados na totalidade da espessura dos substratos, e levam à minimização das tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da junta [44].

Estudos realizados demonstram que a utilização de filetes com um ângulo de 45° são a solução ideal para o aumento da resistência da ligação [45]. A Tabela 5 mostra os diferentes tipos de filetes de adesivo.

Tabela 5: Diferentes tipos de filetes de adesivo (adaptado de [46]).



You et al. [47] estudaram o efeito da adição de componentes metálicos nos filetes de adesivo, na resistência ao corte de JSS. Na preparação das juntas foram usados aço ao carbono e adesivo estrutural epóxico. Foram também usadas quatro juntas (Figura 17): uma junta apenas com filete de adesivo (*Group A*), duas juntas com filete de adesivo com arame em aço embutido de 0,8 mm (*Group B*) e 12 mm (*Group C*), e uma junta em filete de secção triangular retangular isósceles com extremidades em aço (*Group D*).

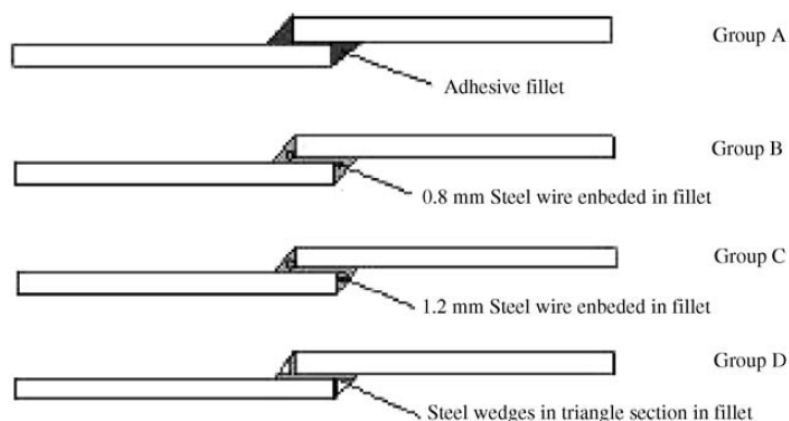


Figura 17: Diferentes tipos de juntas utilizados por You et al. [47].

Os resultados obtidos mostraram que a resistência ao corte aumentou cerca de 45% ao embutir arame em aço nos filetes. O arame em aço incorporado nos filetes tem como objetivo aumentar a resistência ao corte e levar à alteração do modo de rotura da interface para rotura coesiva. O modo de rotura pode ser alterado por este procedimento ou pelas condições de cura, pelas propriedades físicas e mecânicas do adesivo, e pelos elementos em aço. Através da alteração da extensão de cura do adesivo ou das propriedades dos elementos em aço, a distribuição de tensões dentro da junta é modificada, o que leva à alteração do modo de rotura e a tensão de rotura da junta.

A Figura 18 mostra a resistência à rotura para cada junta. Verifica-se que a resistência à rotura é máxima para a junta em filete com arame em aço com diâmetro de 1,2 mm (*Group C*), seguido da junta em filete com arame em aço com diâmetro de 0,8 mm (*Group B*), seguido da junta em filete de secção triangular retangular isósceles com extremidades em aço (*Group D*), e em último a junta em filete unicamente com adesivo (*Group A*).

Foi concluído que embutir arame em aço nos filetes melhora a resistência ao corte. O modo de rotura das juntas mudou com a adição destes componentes metálicos nos filetes. Sem os componentes metálicos, a rotura iniciou-se a partir da interface do metal/adesivo e terminou dentro da própria interface. A inclusão de arame no filete originou a danificação parcial na camada do adesivo dentro da junta, o que levou ao crescimento da fissuração no adesivo. Foi observado modo de rotura misto, com zonas de rotura adesiva e coesiva.

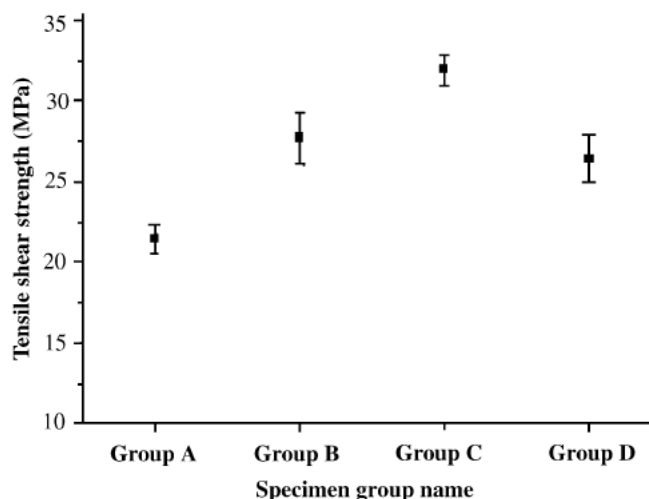


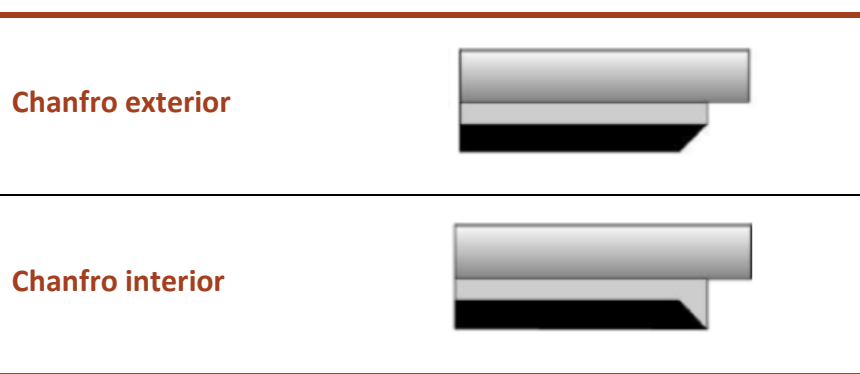
Figura 18: Resistência ao corte em função das várias juntas [47].

2.3.2 Chanfros interiores e exteriores

Os picos de tensão de arrancamento nas extremidades das juntas podem ser reduzidos através da utilização de chanfros interiores e exteriores nos aderentes [46, 48]. A Tabela 6 mostra estes dois tipos de chanfros.

A utilização de chanfros exteriores permite uma melhor uniformização da distribuição de carga entre os substratos, o que origina uma melhoria da resistência da ligação [41, 49]. O aumento da espessura do adesivo nas extremidades de sobreposição do chanfro interior dos aderentes permite uma redução dos picos de tensões de corte [50].

Tabela 6: Tipos de chanfros utilizados nos aderentes (adaptado de [51]).



Vallée e Keller [52] realizaram um estudo acerca da utilização de chanfros em juntas adesivas a partir de perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP) (Figura 19). Foram realizados ensaios estáticos em JSD balanceadas, compostas por GFRP, ligados por um adesivo epóxico. Os parâmetros investigados foram o comprimento de sobreposição (de 50 a 100 mm), a espessura da camada do adesivo (1 e 3 mm) e a inclinação do chanfro dos aderentes.

Experimentalmente, observou-se que a iniciação e propagação da rotura ocorreu nas camadas externas das fibras dos aderentes. A utilização de chanfros reduziu os picos de tensão de tração e de corte através da espessura na direção das bordas da junta chanfrada. No entanto, a resistência da junta não foi significativamente melhorada. Numericamente, foi utilizado o MEF para prever a resistência da junta, através de um critério quadrático de rotura em função das tensões normais e de corte, para uma rotura localizada nas camadas exteriores dos aderentes pultrudidos. Os resultados de resistência obtidos revelaram um acordo com os dados experimentais. Também se observou que a espessura das camadas do adesivo não tem praticamente influência nas distribuições de tensão e deformação na camada do adesivo nem na resistência da junta.

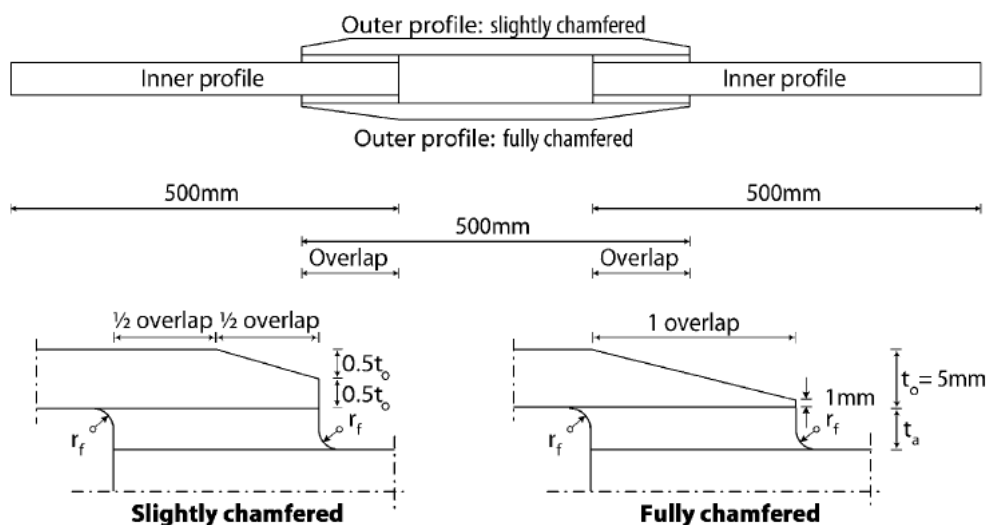


Figura 19: Geometria das juntas utilizadas no estudo [52].

2.3.3 Gradação das propriedades dos aderentes

Ganesh e Choo [53] analisaram o efeito da utilização de reparações por sobreposição simples em aderentes com gradação do módulo de elasticidade (E) segundo a direção da solicitação e ao longo do comprimento de sobreposição. Neste estudo foram comparadas as distribuições de tensões ao longo da junta para vários tipos de gradação do módulo E . Os resultados obtidos foram comparados com as juntas em que os aderentes apresentavam módulo E constante. A Figura 20 mostra a junta utilizada no estudo, em que AL corresponde ao comprimento do aderente solicitado, e OL ao comprimento de sobreposição.

A gradação de rigidez é criada através da variação do ângulo segundo a qual as fibras de carbono se encontram entrelaçadas entre si nas camadas de tecido de carbono que constituem os substratos. No estudo, as tensões normais e de corte foram obtidas ao longo do comprimento de sobreposição e a meio do adesivo para três tipos de gradações diferentes. Foi observada a existência de dois picos de tensões de corte nas extremidades na junta, e a inexistência de esforços na zona central da mesma. Através da aplicação da gradação do módulo de elasticidade dos aderentes, os picos da tensão de corte nas extremidades do comprimento de sobreposição diminuiriam cerca de 20%, o que leva a um ligeiro aumento das tensões de corte na zona intermédia do adesivo. As tensões normais segundo a espessura não sofreram variação significativa (inferior a 5%).

As tensões normais segundo a direção x também apresentavam picos nas extremidades da ligação e a inexistência de esforços na zona intermédia da junta. Com aplicação da gradação do módulo de elasticidade dos aderentes, estas tensões sofreram um aumento dos picos tensão nas extremidades e nas zonas intermédias, não sendo graves uma vez

que estas tensões são inferiores em ordem de grandeza às duas restantes. Este método permite assim a diminuição dos picos de tensão nas extremidades do comprimento de sobreposição, o que provoca o aumento da resistência estática e à fadiga da ligação.

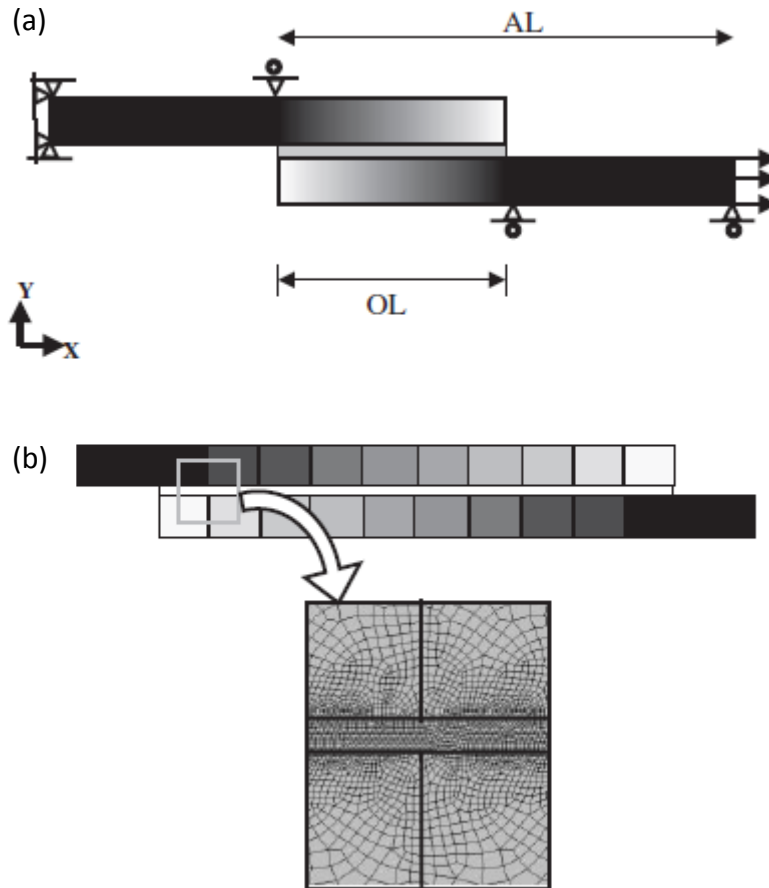


Figura 20: Geometria, modelo EF e condições de fronteira para uma JSS: (a) modelo geométrico (AL: comprimento do aderente solicitado; OL: comprimento de sobreposição.) e (b) regiões do material e discretização de elementos [53].

2.3.4 Utilização de dois adesivos

As juntas com dois adesivos (Figura 21), também conhecidas como juntas mistas, têm maior resistência quando comparadas com as juntas de adesivo único, uma vez que permitem a diminuição das concentrações de tensões. Como as tensões de corte do adesivo são maiores nas extremidades das juntas, deve ser usado um adesivo dúctil e flexível nas extremidades, e um adesivo rígido e menos dúctil no centro da junta. Para que uma junta mista seja mais resistente do que uma junta de adesivo único, seja ele frágil ou dúctil, é necessário que a carga transmitida pelo adesivo frágil seja superior à do adesivo dúctil [54].

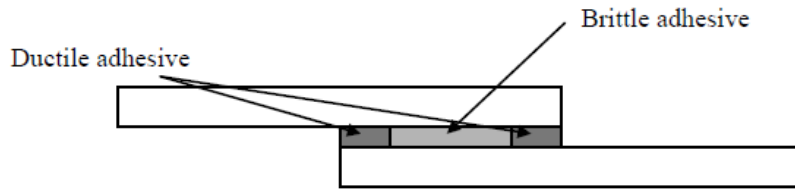


Figura 21: JSS com dois adesivos [55].

Öz e Özer [56] realizaram um trabalho de investigação acerca do efeito dos carregamentos até à rotura de JSS com um e dois adesivos. A Figura 22 mostra a geometria e dimensões das juntas utilizadas.

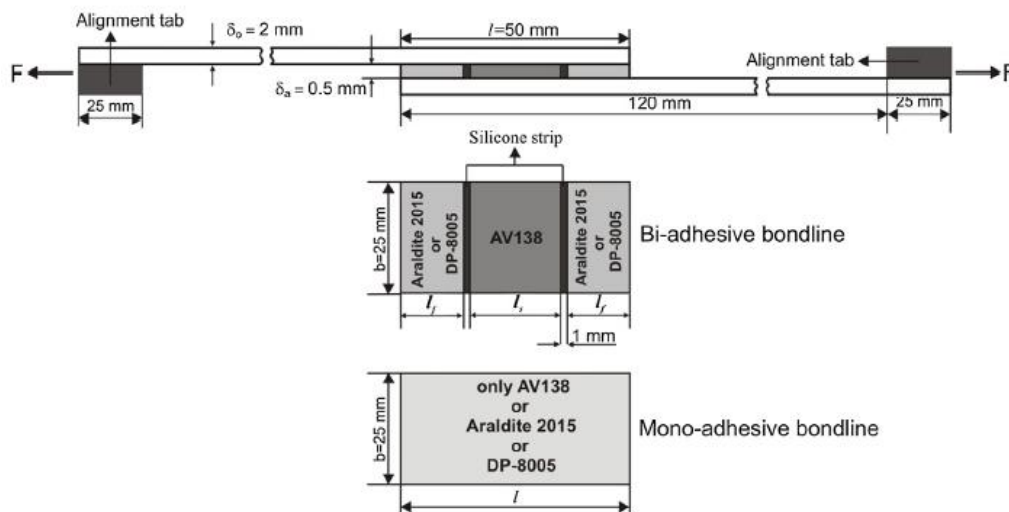


Figura 22: Geometria e dimensões das juntas com um e dois adesivos [56].

Neste estudo foram usados os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Araldite® DP-8005. Na primeira fase do estudo foi apenas utilizado um adesivo em cada junta. Foi constatado, através do carregamento até à rotura das juntas, que a junta com o adesivo Araldite® 2015 apresenta a carga de rotura mais elevada. Posteriormente, foram usadas juntas mistas com as seguintes combinações: AV138 + 2015 e AV138 + DP-8005. Como resultado, as juntas mistas revelaram-se mais resistentes do que as juntas com apenas um adesivo (Figura 23). Foi também verificado que as juntas mistas com adesivos dúcteis nas extremidades conseguem alcançar a máxima resistência quando combinadas com adesivos rígidos no centro da junta. A parte final do estudo focou-se na determinação da relação do comprimento da ligação para as juntas mistas. Foram utilizadas três relações dos comprimentos de ligação, 0,3, 0,5 e 0,7. Foi concluído que a relação do comprimento de ligação influencia a resistência da junta, e os melhores resultados foram obtidos para uma relação de 0,5.

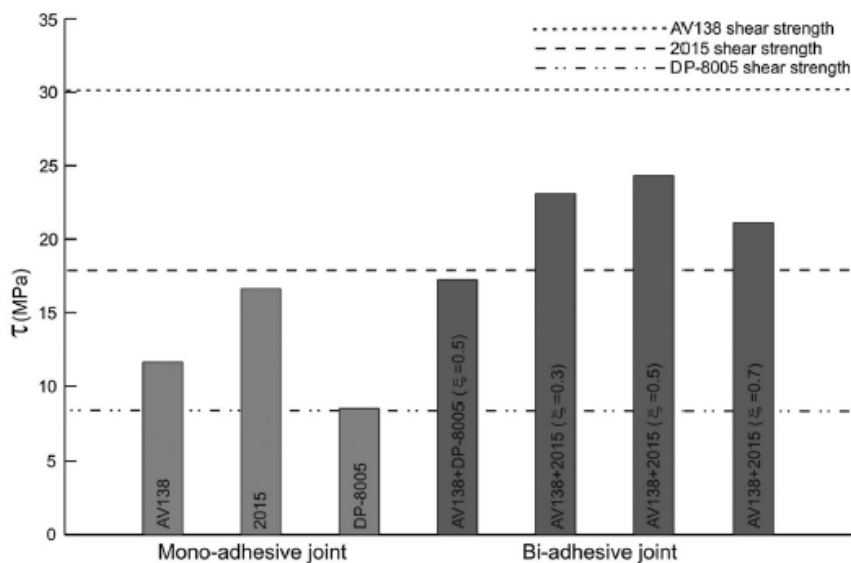


Figura 23: Tensões de corte máxima para as juntas com um e dois adesivos [56].

2.3.5 Utilização de degraus na zona de sobreposição

As juntas em degrau (Figura 24) são caracterizadas pela diminuição da variação de tensões ao longo do adesivo, de maneira a aumentar a sua resistência, associada também à diminuição da excentricidade dos esforços. Neste tipo de juntas, há uma redução das tensões de arrancamento. Estas juntas são conhecidas pela dificuldade em maquinar os degraus. Em juntas com substratos em compósito, é comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, com a finalidade em eliminar as operações de maquinagem, de maneira a evitar a danificação das fibras e tornar o processo de fabrico mais económico [1].



Figura 24: Junta em degrau [19].

Ichikawa et al. [57] realizaram um estudo através do MEF para analisar a distribuição de tensões numa junta em degrau sujeita a cargas estáticas (Figura 25). No estudo foram examinados os efeitos do módulo de Young do adesivo, da espessura do adesivo e do número de degraus da junta. Os resultados mostraram que o valor máximo da tensão principal (σ_1) ocorre nas extremidades das interfaces do adesivo. O valor máximo desta tensão diminui à medida que o módulo de Young do adesivo e o número de degraus aumenta, e também com a redução da espessura do adesivo.

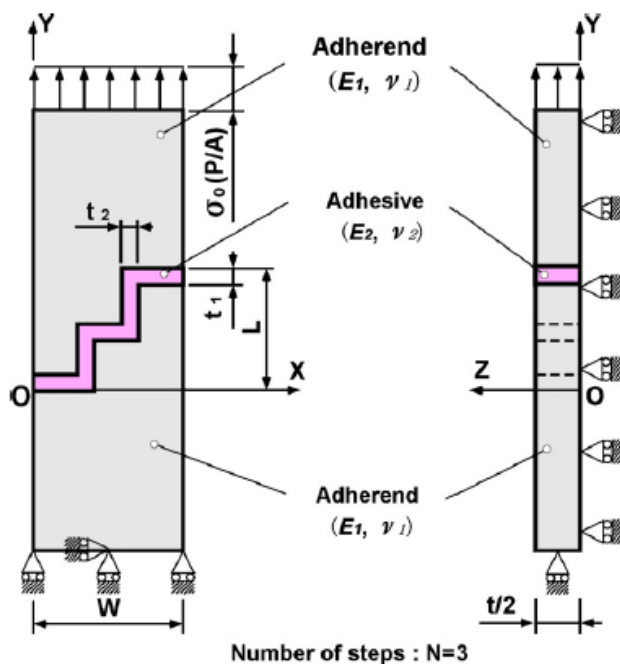


Figura 25: Modelo utilizado no cálculo através do MEF da junta adesiva em degrau [57].

A Figura 26 (a) mostra cada componente de tensão nas transições entre degraus na interface entre o adesivo e o aderente. A abcissa representa a distância normalizada x/w e a ordenada as componentes de tensão σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx} . Verifica-se que a componente da tensão mais relevante é a σ_y , porque a direção desta componente de tensão é a mesma na direção do carregamento. A análise da Figura 26 (b) mostra as componentes da distribuição de tensão ao longo dos três degraus, na interface entre o adesivo e o aderente. A abcissa representa a distância normalizada y/L do degrau e a ordenada representa o valor da componente de tensão σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx} . Verifica-se que a componente de tensão com maior magnitude é a tensão σ_y . A comparação com a Figura 26 (a) mostra que o valor máximo da componente de tensão nas na transição do degrau é maior do que no próprio degrau. Considerou-se assim que a rotura da junta deve iniciar a partir da extremidade das interfaces do adesivo na transição do degrau. A partir da Figura 26 (c) é possível visualizar a distribuição das tensões principais máximas normalizadas σ_1/σ_0 nas transições entre degraus ao longo da largura da junta, mais especificamente nas duas interfaces entre o adesivo e os aderentes e também a meio da espessura do adesivo. A abcissa representa a distância normalizada x/w na direção x e a ordenada representa o valor da tensão máxima principal normalizada σ_1/σ_0 . Verifica-se que a tensão principal máxima normalizada σ_1/σ_0 torna-se máxima nas extremidades livres das interfaces entre o adesivo e os aderentes e que a tensão σ_1/σ_0 é maior do que as tensões no plano médio da camada do adesivo. A diferença de tensões entre as duas interfaces é inferior 1%.

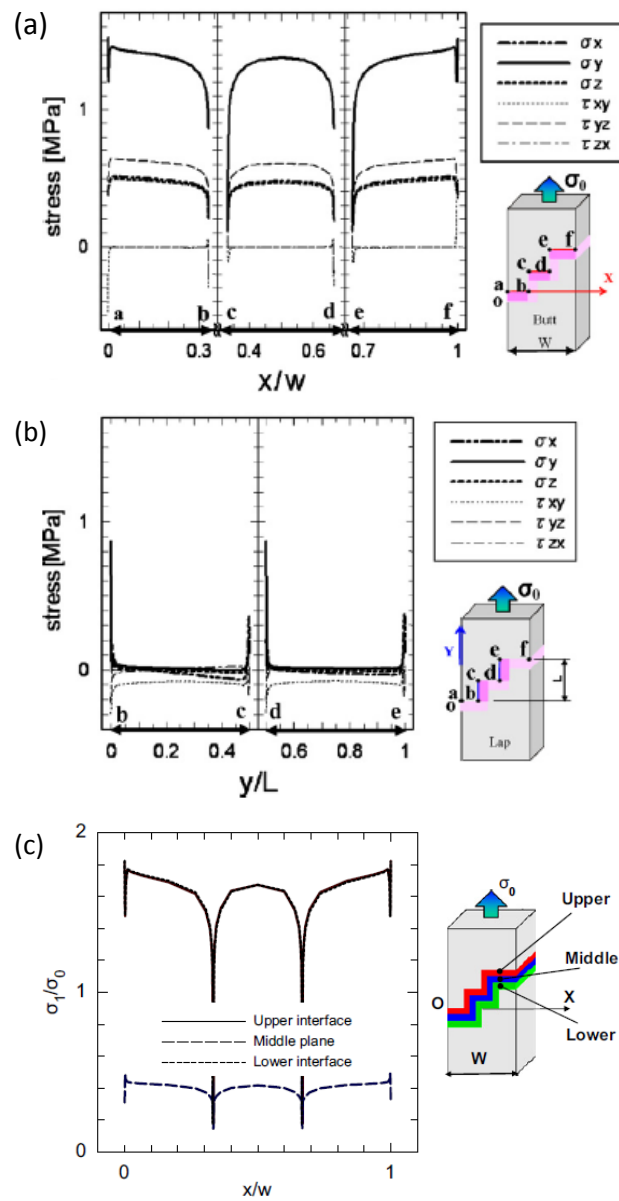


Figura 26: (a) Componentes de tensão nas transições entre degraus na interface entre o adesivo e o aderente, (b) componentes da distribuição de tensão ao longo dos três degraus, na interface entre o adesivo e o aderente, (c) distribuição das tensões principais máximas normalizadas σ_1/σ_0 nas transições entre degraus ao longo da largura da junta [57].

2.3.6 Outras alterações

Neste subcapítulo são descritos alguns trabalhos científicos referentes à utilização de outras alterações geométricas como técnicas para aumento da resistência das ligações adesivas, nomeadamente juntas onduladas na zona de ligação, juntas com gradação do adesivo e juntas com aderentes dobrados.

Juntas onduladas na zona de ligação

Segundo Ávila e Bueno [58], a utilização de geometrias onduladas na zona de ligação em JSS (Figura 27 (a) e (b)) leva a um aumento da resistência da junta em cerca de 41%. A utilização de ondulações na zona de ligação evita a excentricidade da carga transmitida, e permite o aparecimento de tensões compressivas nas extremidades da camada do adesivo, o que provoca o aumento da resistência da ligação.

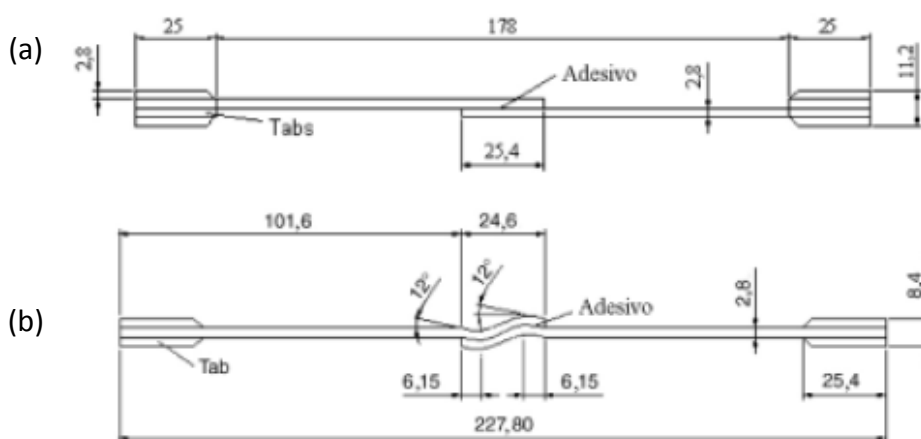


Figura 27: (a) JSS e (b) JSS ondulada na zona de ligação [58].

Com base no trabalho realizado pelos autores mencionados anteriormente, encontra-se representada na Figura 28 (a) as cargas máximas obtidas para quatro lotes de JSS em material compósito. Para cada um destes quatro lotes, foi considerado um grupo de cinco provetes com JSS, em cada que cada uma das colunas representa um provete. As cargas máximas obtidas para as JSS onduladas também em material compósito, encontram-se representadas na Figura 28 (b). Ao contrário do caso anterior, foram utilizados dez lotes diferentes. Dentro destes dez lotes, o número de provetes foi variado, ou seja, nos lotes 5, 7 e 8 foram utilizados apenas um provete, nos lotes 1, 2, 3, 6, foram utilizados dois provetes, e nos lotes 4, 9 e 10 três provetes. Com base nos valores obtidos, foi concluído que a carga máxima nas juntas onduladas é superior à das juntas sem ondulação na zona de ligação, o que indica que as ligações onduladas são mais resistentes do que as juntas sem ondulação.

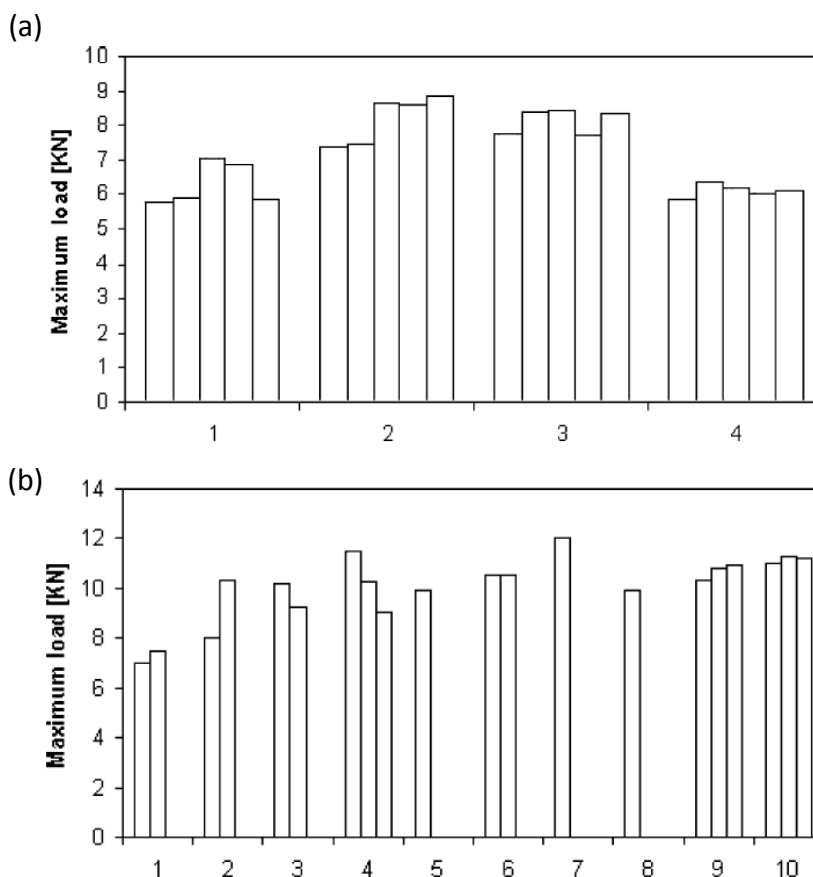


Figura 28: (a) Distribuição da carga máxima das JSS e (b) distribuição da carga máxima das JSS onduladas [58].

Na Figura 29 (a) encontra-se representada a distribuição das tensões de arrancamento e corte ao longo da linha central do adesivo da JSS. O valor mais alto da tensão de arrancamento está localizado nas extremidades da sobreposição, o que provoca a falha do adesivo. Ao mesmo tempo, a tensão de corte é mais elevada na proximidade das extremidades da junta, o que leva a possibilidade de rotura nos aderentes.

A Figura 29 (b) mostra a distribuição das tensões de arrancamento e de corte ao longo da linha central do adesivo para a JSS ondulada. Observa-se que a tensão normal nas extremidades do adesivo é compressiva, embora exista tensão de arrancamento no centro do mesmo. A localização da tensão compressiva situa-se em torno da área mais crítica, ou seja, nas extremidades da junta. A tensão de arrancamento nas extremidades da junta é um dos principais fatores que levam à rotura da mesma. Ao inverter a tensão normal de arrancamento para compressão nestas áreas, a resistência da junta aumenta. A maioria das tensões de corte são transferidas para o centro da junta. Estes dois fatores combinados podem levar a roturas por delaminação, uma vez que o adesivo melhora a sua capacidade de transferência de cargas enquanto o campo de tensões no laminado pode levar à sua rotura.

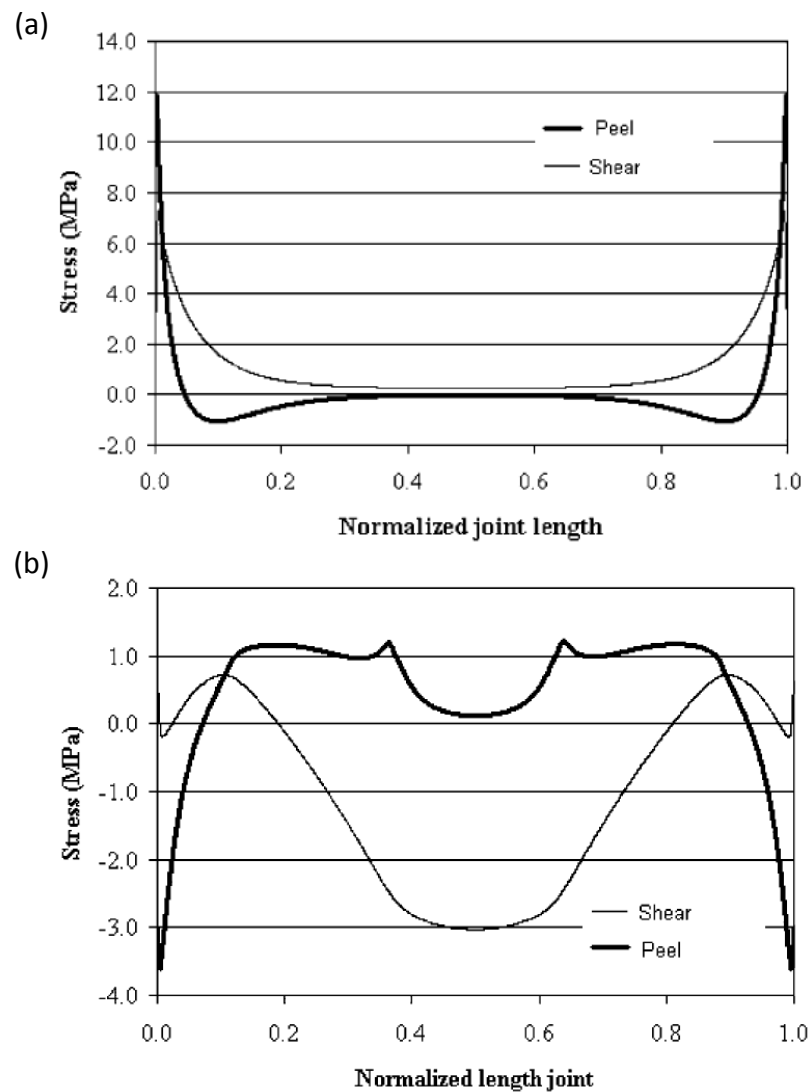


Figura 29: (a) Distribuição da tensão de corte e arrancamento da JSS e (b) distribuição da tensão de corte e arrancamento da JSS ondulada [58].

Juntas com gradação do adesivo

As juntas graduadas foram introduzidas teoricamente como uma evolução natural das juntas mistas. Materiais graduados podem ser usados com a finalidade de reduzir a concentração de tensões nas bordas de sobreposição. O principal objetivo deste método consiste em ter um substrato ou adesivo cujas propriedades mecânicas variem ao longo do comprimento de sobreposição. Através de um valor de rigidez diferente ao longo do comprimento de sobreposição da junta, promove-se uma distribuição de tensões mais uniforme, originando juntas mais resistentes [59]. Através da análise da Figura 30 é possível concluir que a gradação do adesivo permite uma uniformização da distribuição de tensões.

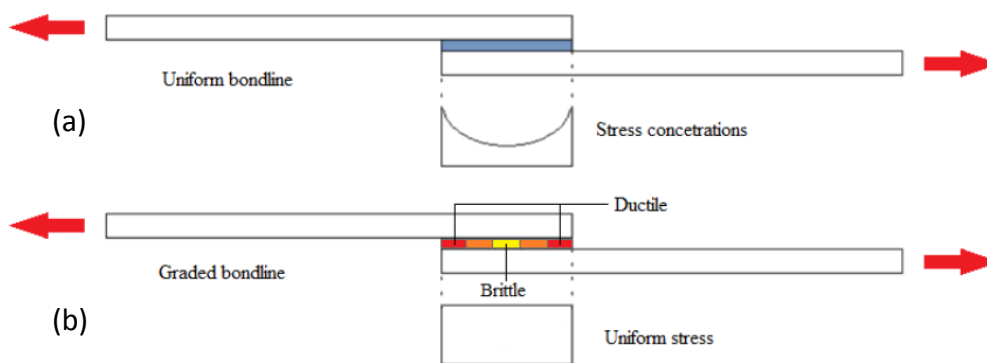


Figura 30: (a) Junta normal e (b) junta graduada [59].

Kumar e Scanlan [60] realizaram um estudo comparativo entre um adesivo funcionalmente graduado (com variação contínua de propriedades) e um adesivo equivalente graduado em degraus, numa junta tubular com diferentes espessuras de adesivo e comprimentos de sobreposição. Foi concluído que o adesivo funcionalmente graduado reduziu as tensões máximas de corte e de arrancamento.

Stapleton et al. [61] estudaram o efeito da utilização de adesivos funcionalmente graduados no comportamento de cobre-juntas simples solicitadas à tração. O estudo foi realizado através da concentração de diferentes esferas de vidro ao longo do comprimento de sobreposição, com a finalidade de criar um gradiente na rigidez do adesivo. Foi concluído que este método aumentou a resistência da junta.

Juntas com aderentes dobrados

Sancaktar e Lawry [62] realizaram um estudo através da fotoelasticidade acerca da distribuição de tensões em juntas adesivas com aderentes dobrados com um adesivo rígido (Figura 31). A utilização de aderentes dobrados tem como finalidade a redução dos picos de tensão no adesivo.

As franjas isocromáticas (Figura 32) são visíveis através de um fundo de luz branca. Durante o carregamento são criadas franjas brancas e pretas. A franja branca no canto de fora do aderente é a franja de ordem zero, onde a tensão é nula. É atingida a ordem de franja dois na zona de ligação. Como os módulos de Young do adesivo e do aderente são da mesma ordem de magnitude, pode-se considerar que as tensões são contínuas na transição entre o aderente e o adesivo. Por isso, o pico de tensão de arrancamento no adesivo (σ_N) nas extremidades da ligação é a única componente de tensão não nula do adesivo. Para esta condição de fronteira livre, a única tensão σ_N principal não nula, como referido por Goland e Reissner [24].

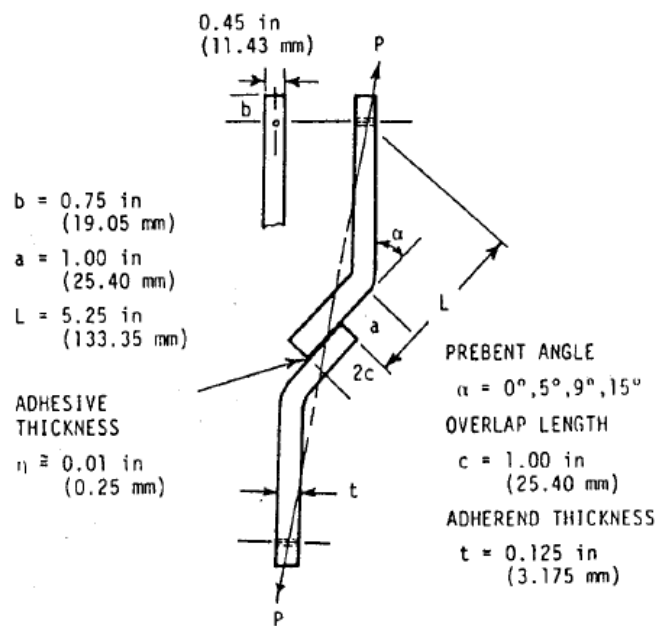


Figura 31: JSS com aderentes dobrados [62].

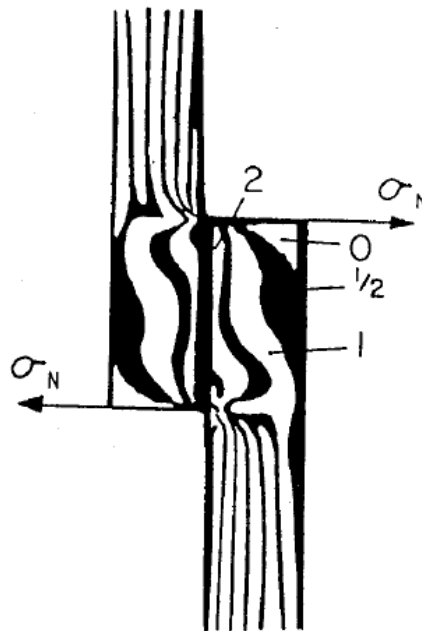


Figura 32: Franjas isocromáticas durante o carregamento [62].

Pela técnica da fotoelasticidade foi concluído que a capacidade de carga das juntas com adesivo rígido aumentou cerca de 71%. Contudo, através da análise da ordem das franjas na zona de ligação, foi verificado que existia a possibilidade de rotura do aderente nesta região. Durante a carga, os ângulos de dobragem reduziram cerca de 50%, o que indica que o uso de ângulos de dobragem superiores a 15% pode ser crítico durante uma possível rotura do aderente.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é feita a descrição do trabalho experimental e do trabalho numérico da presente dissertação. Na primeira parte é abordado o trabalho experimental, onde são descritos os materiais utilizados, a geometria das juntas, o processo de fabrico das juntas, a análise dos resultados obtidos e a comparação de resultados com as juntas de adesivo único. Na segunda parte é abordado o trabalho numérico, onde se apresentam as condições da análise numérica, o modelo de dano utilizado, a determinação das propriedades de dano, a análise de tensões da junta, o estudo da variável de dano, a previsão do comportamento, a comparação de resultados com as juntas de adesivo único e um pequeno estudo referente a outras configurações de adesivos.

3.1 Trabalho experimental

Neste capítulo é feita a abordagem ao trabalho experimental realizado no âmbito da presente dissertação. No ponto 3.1.1 são descritos de forma detalhada os materiais utilizados na execução das juntas, onde são referidas as suas principais características mecânicas. No ponto 3.1.2 são especificadas as dimensões geométricas das juntas em análise. No ponto 3.1.3 são descritas as várias etapas do processo de fabrico dos provetes. No ponto 3.1.4 são apresentados os resultados obtidos, nomeadamente as curvas $P-\delta$, os modos de rotura e análise da resistência e das energias de rotura das juntas. O ponto 3.1.5 é dedicado à comparação de resultados das juntas mistas com as juntas de adesivo único.

3.1.1 Materiais utilizados

No trabalho experimental foram utilizados aderentes em alumínio AW 6082-T651 e os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

3.1.1.1 Aderentes

Os aderentes foram produzidos a partir da liga de alumínio AW 6082-T651, também conhecida como liga estrutural da série 6000, constituída por magnésio e silício como principais elementos de liga. Este alumínio é utilizado numa vasta produção de componentes estruturais a partir de perfis extrudidos, ou em peças obtidas por maquinagem. A sua vasta utilização deve-se a propriedades como a elevada resistência

à tração (mínima de 300 MPa, como especificado pelo fabricante, e obtida através do envelhecimento artificial a uma temperatura de aproximadamente 180°C).

Tabela 7: Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [63].

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
% Mínimo	0,70	0,60	0,40	0	0	0	0	0	----
% Máxima	1,30	1,20	1,00	0,50	0,25	0,20	0,10	0,05	Resto

Tabela 8: Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 (dados do fabricante, [63]).

Espessura [mm]	Tensão de rotura mínima [MPa]	Tensão de cedência 0,2% mínima [MPa]	Alongamento mínimo [%]	Dureza Brinell	Módulo de elasticidade [GPa]
3,00	300	255	9	91	70

O alumínio é bastante utilizado na indústria aeronáutica e automóvel no fabrico de juntas adesivas. Propriedades como a elevada energia de superfície e a sua relação resistência/peso fazem deste tipo de material uma solução ideal na construção de estruturas [1].

Esta liga de alumínio foi caracterizada à tração por Campilho et al. [40], de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [64], onde foram registadas as seguintes propriedades:

- Módulo de Young: $E = 70,07 \pm 0,83$ GPa;
- Tensão de rotura: $\sigma_f = 324,00 \pm 0,16$ MPa;
- Tensão de cedência à tração: $\sigma_y = 261,67 \pm 7,65$ MPa;
- Deformação de rotura à tração: $\epsilon_f = 21,70 \pm 4,24\%$.

A Figura 33 mostra as curvas de tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW 6082-T651 e a respetiva aproximação numérica.

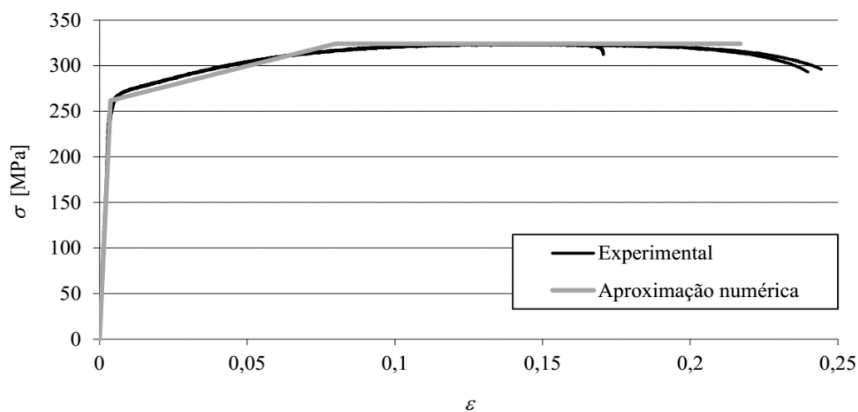


Figura 33: Curvas σ - ϵ da liga de alumínio AW 6082-T651 [40].

3.1.1.2 Adesivos

No trabalho experimental foram utilizados três adesivos estruturais: Araldite® AV138 (adesivo epóxico frágil), Araldite® 2015 (adesivo epóxico dúctil) e Sikaforce® 7752 (adesivo poliuretano estrutural com elevada ductilidade e resistência mecânica moderada). Estes adesivos são adesivos bi-componente (resina + endurecedor) com baixa viscosidade. A baixa viscosidade destes adesivos facilita a deposição nas superfícies a serem ligadas, e permite variar facilmente a espessura do adesivo e corrigir a falta de planeza dos substratos [63].

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo estrutural Araldite® AV138 (Figura 34), fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, é um adesivo epóxico frágil, mas de elevada resistência (Figura 36). Este adesivo de base epóxico, termoendurecível, é composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998, fornecidos em duas embalagens. Para fabricar este adesivo é necessária uma relação de mistura de 100 g de resina para 40 g de endurecedor, com uma precisão de $\pm 5\%$. Este adesivo é apresentado na forma de pasta tixotrópica e cura à temperatura ambiente. Apresenta baixa emissão de gases e perdas voláteis. É adequado para a ligação de materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [65]. As propriedades mecânicas e de fratura deste adesivo são indicadas na Tabela 9.



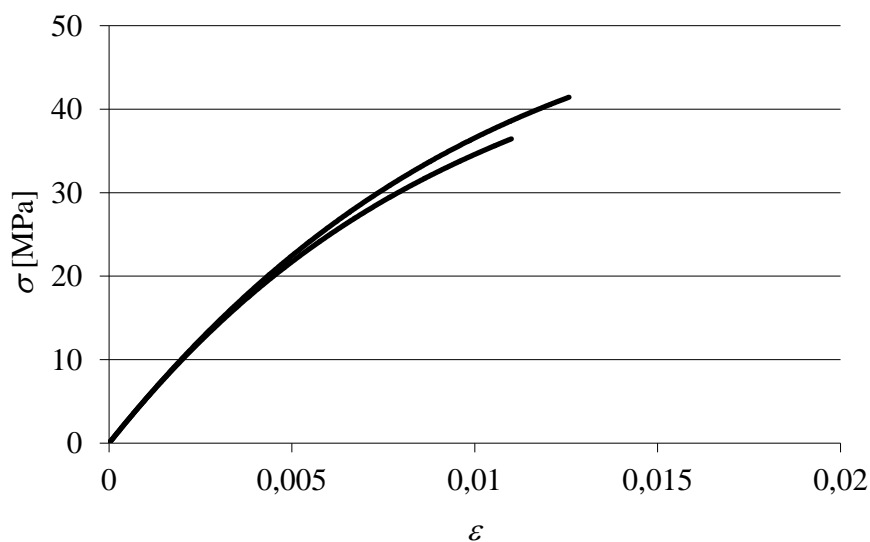
Figura 34: Adesivo Araldite® AV138 [63].

Tabela 9: Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [65, 66].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	$4,89 \pm 0,81$
Coefficiente de Poisson, ν^b	0,35
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 à tração, 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]	$0,20^a$
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	$0,38^a$

^a Valores estimados na referência [66].

^b Valores do fabricante.

Figura 35: Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [65].

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo estrutural Araldite® 2015 (Figura 36), fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, é um adesivo epóxico com ductilidade moderada (Figura 37), e de baixa contração. Quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, apresenta uma resistência à tração e ao corte inferiores. No entanto, devido à sua ductilidade moderada, possibilita a redistribuição de tensões nas zonas críticas, tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [65].

Este adesivo de base epóxico, termoendurecível, é composto por dois componentes, resina e endurecedor, e é fornecido em cartucho. É de fácil aplicação, uma vez que é aplicado através de uma pistola manual com o recurso a um bico que mistura os dois componentes em quantidades iguais. Apresenta-se na forma de pasta tixotrópica e cura à temperatura ambiente. As propriedades mecânicas e de fratura deste adesivo são indicadas na Tabela 10.

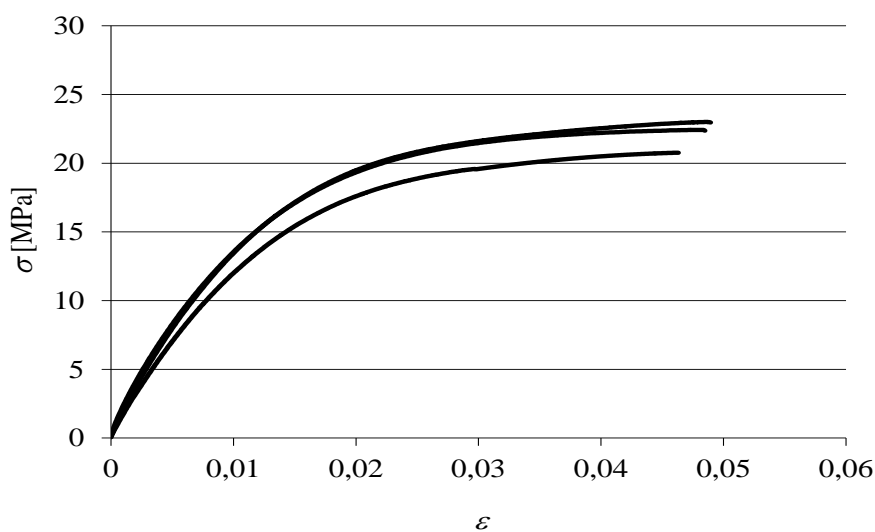


Figura 36: Adesivo Araldite® 2015 [63].

Tabela 10: Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [65].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente de Poisson, ν^a	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$14,6 \pm 1,3$
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 Valores do fabricante.

Figura 37: Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [65].

O tratamento das superfícies afeta a resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo. As superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante, como a acetona ou o isopropanol (para plásticos), com o objetivo de remover todos os vestígios de contaminações e sujidades.

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo estrutural Sikaforce® 7752 (Figura 38), fabricado pela empresa *Sika*®, é um adesivo dúctil (Figura 39). Quando comparado com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, apresenta uma menor resistência ao corte e à tração, no entanto é o mais dúctil.

É um adesivo à base de poliuretano estrutural tixotrópico e apresenta-se sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor. A resina de polioli com cargas e endurecedor de base isocianato possuem baixa emissão de gases e perdas voláteis. Este adesivo apresenta também boa resistência a altas temperaturas [63]. A mistura de resina e endurecedor é feita através da razão 100 g de resina por 20 g de endurecedor.

Através das propriedades deste adesivo (Tabela 11) é expectável que a resistência das juntas seja elevada, uma vez que este adesivo combina uma resistência aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. São permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura nas extremidades do adesivo com o carregamento progressivo da junta, o que origina elevada resistência na ligação.

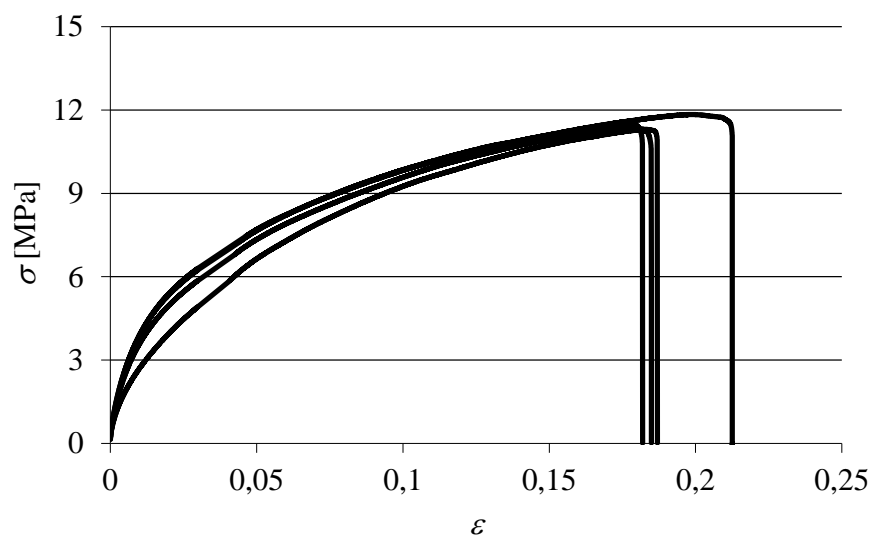


Figura 38: Adesivo Sikaforce® 7752 [63].

Tabela 11: Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [67].

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, E [GPa]	$0,49 \pm 0,09$
Coefficiente de Poisson, ν^a	0,30
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$3,24 \pm 0,48$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$11,48 \pm 0,25$
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	$19,18 \pm 1,40$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$0,19 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$5,16 \pm 1,14$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$10,17 \pm 0,64$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$54,82 \pm 6,38$
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	$2,36 \pm 0,17$
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	$5,41 \pm 0,47$

^a Valores do fabricante.

Figura 39: Curvas σ - ε relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [67].

3.1.2 Geometria das juntas

A geometria da junta em degrau em estudo encontra-se representada na Figura 40. Os parâmetros geométricos utilizados são a espessura do substrato (t_p), a espessura de adesivo longitudinal ao carregamento (t_A), a espessura de adesivo transversal ao carregamento (t_{A1}), o comprimento de sobreposição (L_o) e o comprimento total do provete (L_T). Os valores destas dimensões podem ser consultados na Tabela 12.

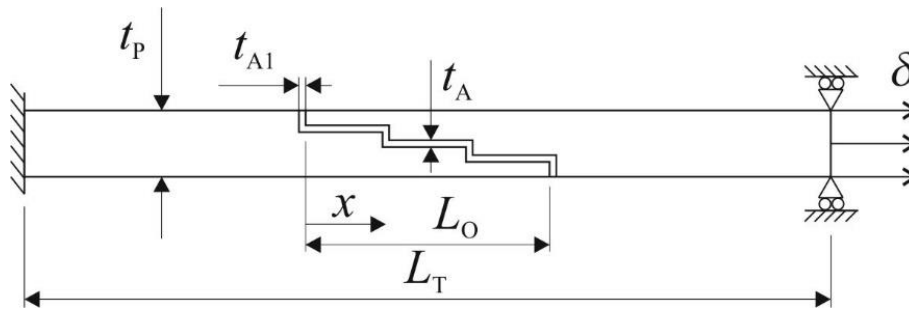


Figura 40: Esquema representativo da geometria da junta em degrau e respetivas condições fronteira.

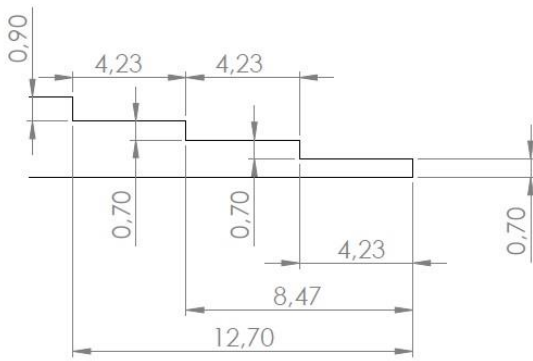
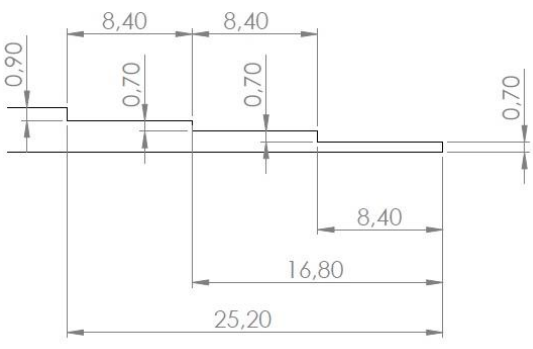
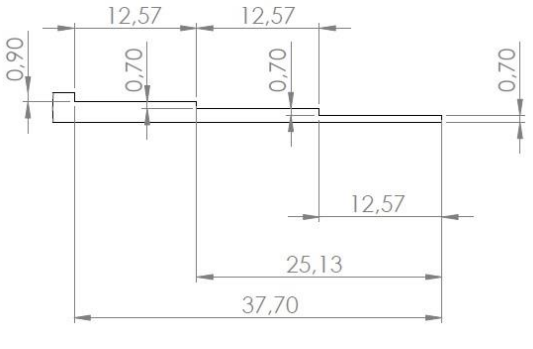
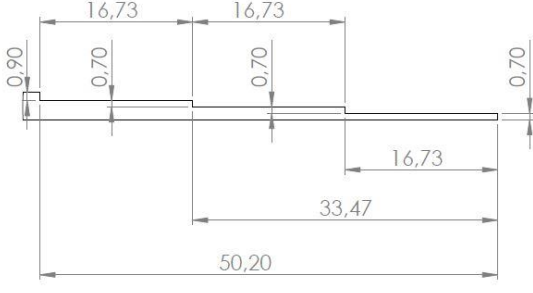
Tabela 12: Parâmetros geométricos usados na geometria da junta.

Parâmetro geométrico	Dimensões [mm]
Espessura do substrato (t_p)	3
Espessura de adesivo longitudinal ao carregamento (t_A)	0,2
Espessura de adesivo transversal ao carregamento (t_{A1})	0,2
Comprimento de sobreposição (L_o)	12,5 25 37,5 50
Comprimento total do provete (L_T)	180

Número de degraus: 3

Na Tabela 13 são indicadas as dimensões dos degraus no processo de maquinagem para os quatro L_o . É de salientar que, para a realização dos degraus, teve de ser considerada a espessura de adesivo transversal ao carregamento (t_{A1}).

Tabela 13: Dimensões dos degraus no processo de maquinagem.

L_0 [mm]	Dimensões dos degraus no processo de maquinagem [mm]
12,5	
25	
37,5	
50	

3.1.3 Processo de fabrico

Neste subcapítulo são descritas as etapas do processo de fabrico das juntas em degrau estudadas na presente dissertação. Na Figura 41 encontram-se as etapas do processo de fabrico das juntas.

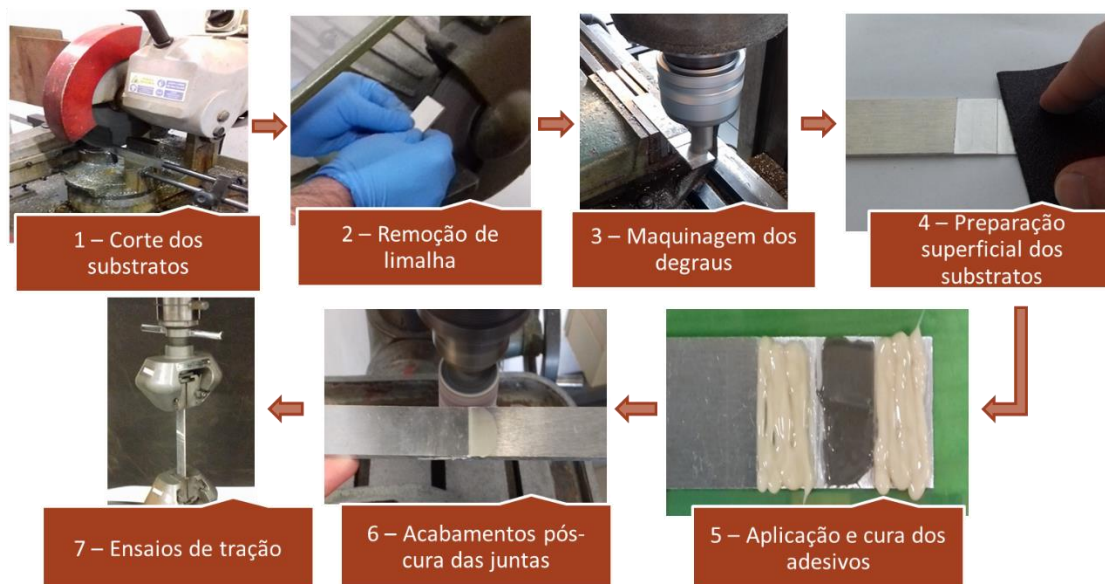


Figura 41: Etapas do processo de fabrico das juntas.

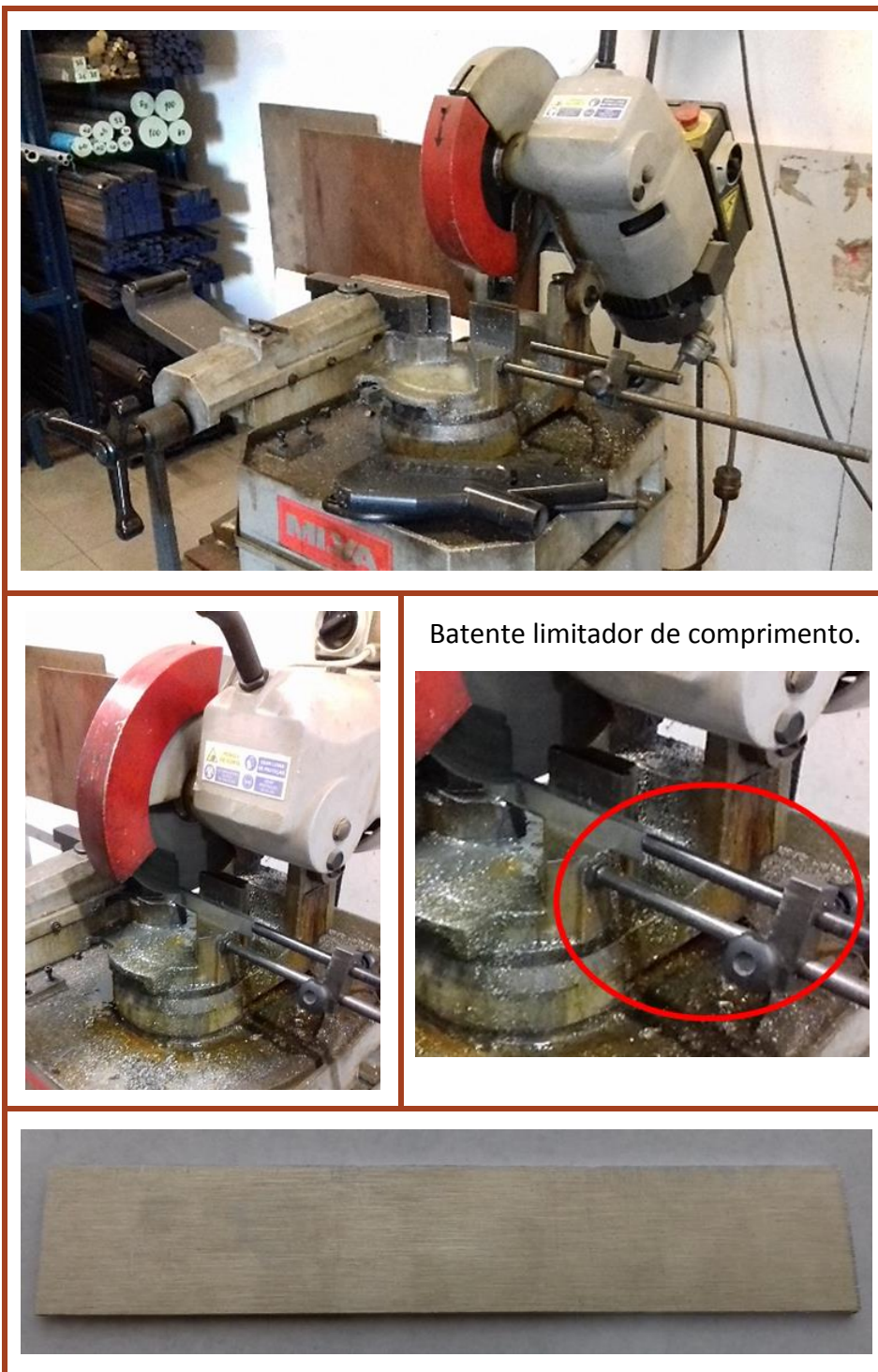
1 - Corte dos substratos

A primeira etapa do processo de fabrico da junta consistiu no corte dos substratos a partir de perfis rectangulares extrudidos da liga de alumínio AW 6082-T651, com dimensões $150 \times 25 \times 3 \text{ mm}^3$ (Tabela 14).

Foi prevista a realização de 4 provetes para cada valor de L_0 para 3 configurações de adesivos, de forma a garantir uma amostragem satisfatória para avaliações pós-experimentais. Para o efeito, foi necessário proceder ao corte de 96 substratos (24 para cada L_0).

As operações de corte foram efectuadas através de um serrote de disco. Neste processo foi necessária a utilização de um batente limitador de comprimento, presente na mesa da máquina, de modo a garantir o comprimento pretendido. Através deste batente limitador de comprimento, o processo de corte é realizado com maior rapidez e é assegurada a reprodutividade do processo.

Tabela 14: Corte dos substratos.



2 - Remoção de limalha

Nesta etapa foi feita a remoção da limalha dos substratos criada no processo de corte através de um esmerilador (Tabela 15).

Tabela 15: Remoção de limalha.



3 - Maquinagem dos degraus

A terceira etapa do fabrico das juntas consistiu na maquinagem dos degraus numa das extremidades dos substratos (Tabela 16). Este processo foi realizado através da fresadora universal Gambin^{SA} modelo 1m com os seguintes parâmetros de trabalho:

- Avanço: 100 mm/min;
- Velocidade de rotação: 710 rot/min.

Para a realização da maquinagem dos degraus foi efectuado um *setup* na máquina tendo em conta a reprodutibilidade do processo. Para o efeito, foi utilizada a prensa fixa da máquina e dois calços posicionados por baixo dos substratos a maquinar, de maneira a prevenir que estes não sofressem empenos na zona de maquinagem, provenientes da entrada da fresa na peça. Através deste *setup* foi possível maquinar os três degraus com uma única amarração.

Tabela 16: Maquinagem dos degraus.









4 – Preparação superficial dos substratos

A quarta etapa no processo de fabrico das juntas consistiu na preparação superficial dos substratos (Tabela 17). Na primeira fase do processo procedeu-se à limpeza superficial dos degraus através do processo passivo mecânico de lixagem. Este método de preparação superficial tem como objetivo a remoção das *weak boundary layers* (óxidos e revestimentos), que apresentam fraca coesão ou não aderem ao substrato ou ao adesivo com resistência suficiente, comprometendo a resistência da junta. O principal objetivo deste processo consiste na alteração da topografia da superfície dos substratos, de maneira a conferir uma rugosidade uniforme. Esta etapa proporciona uma melhor molhagem das superfícies e ancoragem por parte do adesivo.

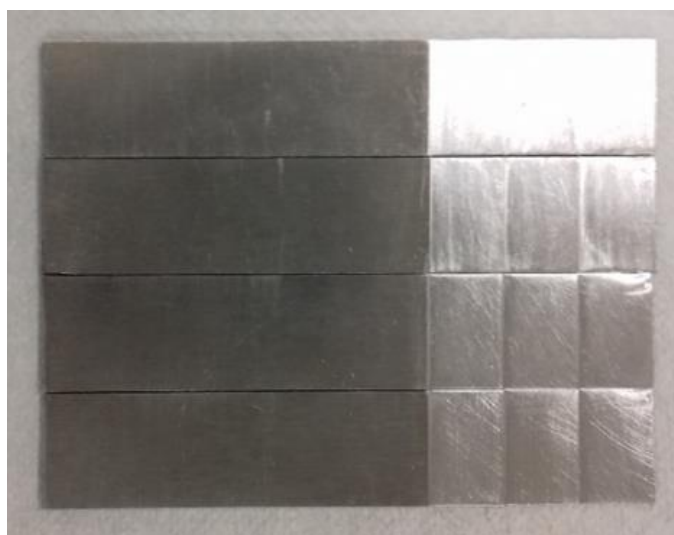
Terminado o processo de lixagem, os substratos foram sujeitos a uma limpeza manual com acetona industrial, com o objetivo em remover as partículas sólidas deixadas pelo processo antecedente e eliminar vestígios oleosos das superfícies.

Tabela 17: Preparação superficial dos substratos.





Processo de limpeza com acetona industrial.



Substratos após limpeza com acetona industrial.

5 – Aplicação e cura dos adesivos

A quinta etapa do processo de fabrico das juntas consistiu na aplicação e cura dos adesivos (Tabela 18), onde foram utilizados os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Considerou-se aplicação do adesivo mais frágil no centro da junta, e o adesivo mais dúctil nas extremidades da junta. Foram utilizadas três configurações:

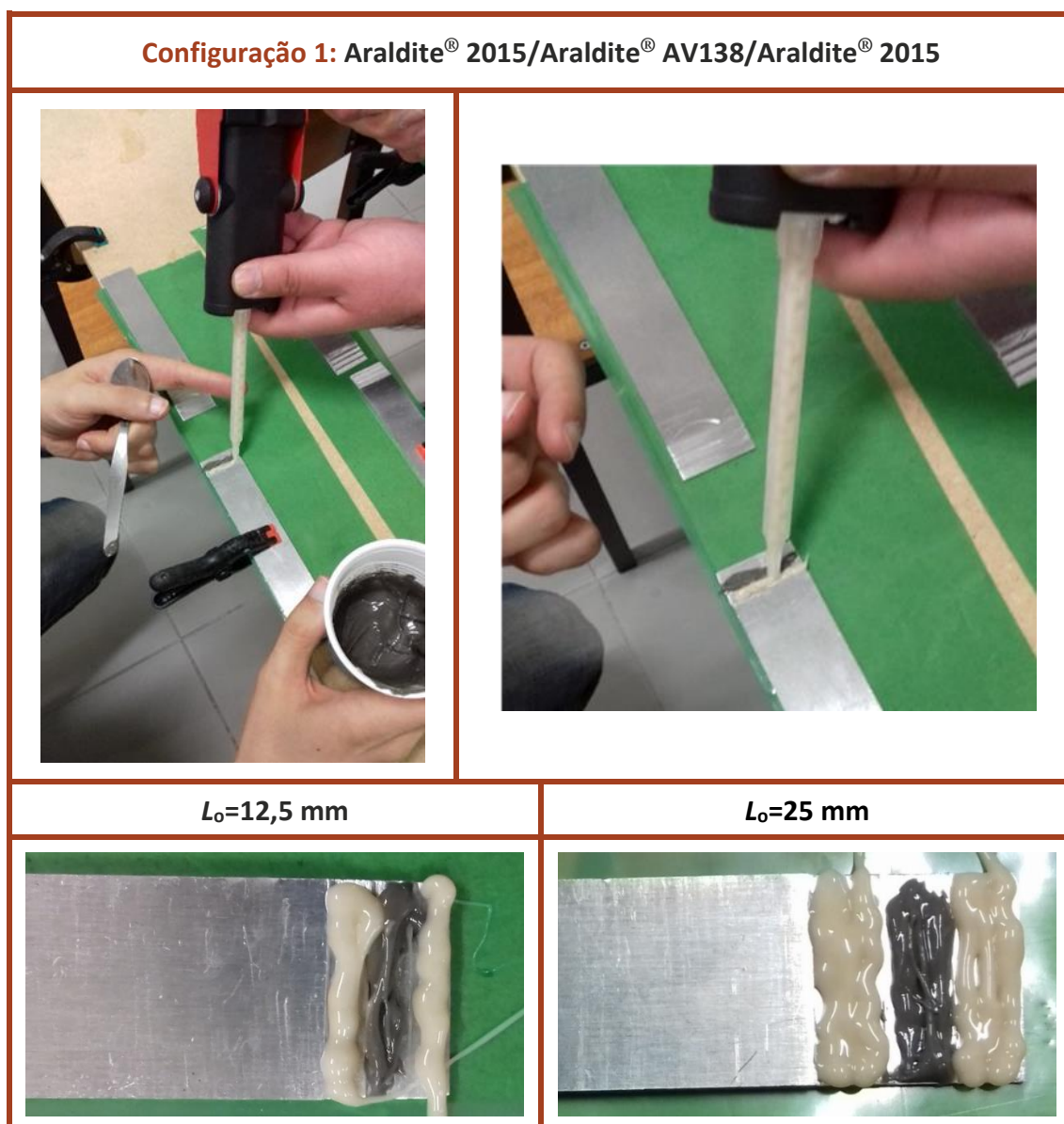
- **Configuração 1:** Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- **Configuração 2:** Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752;
- **Configuração 3:** Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752.

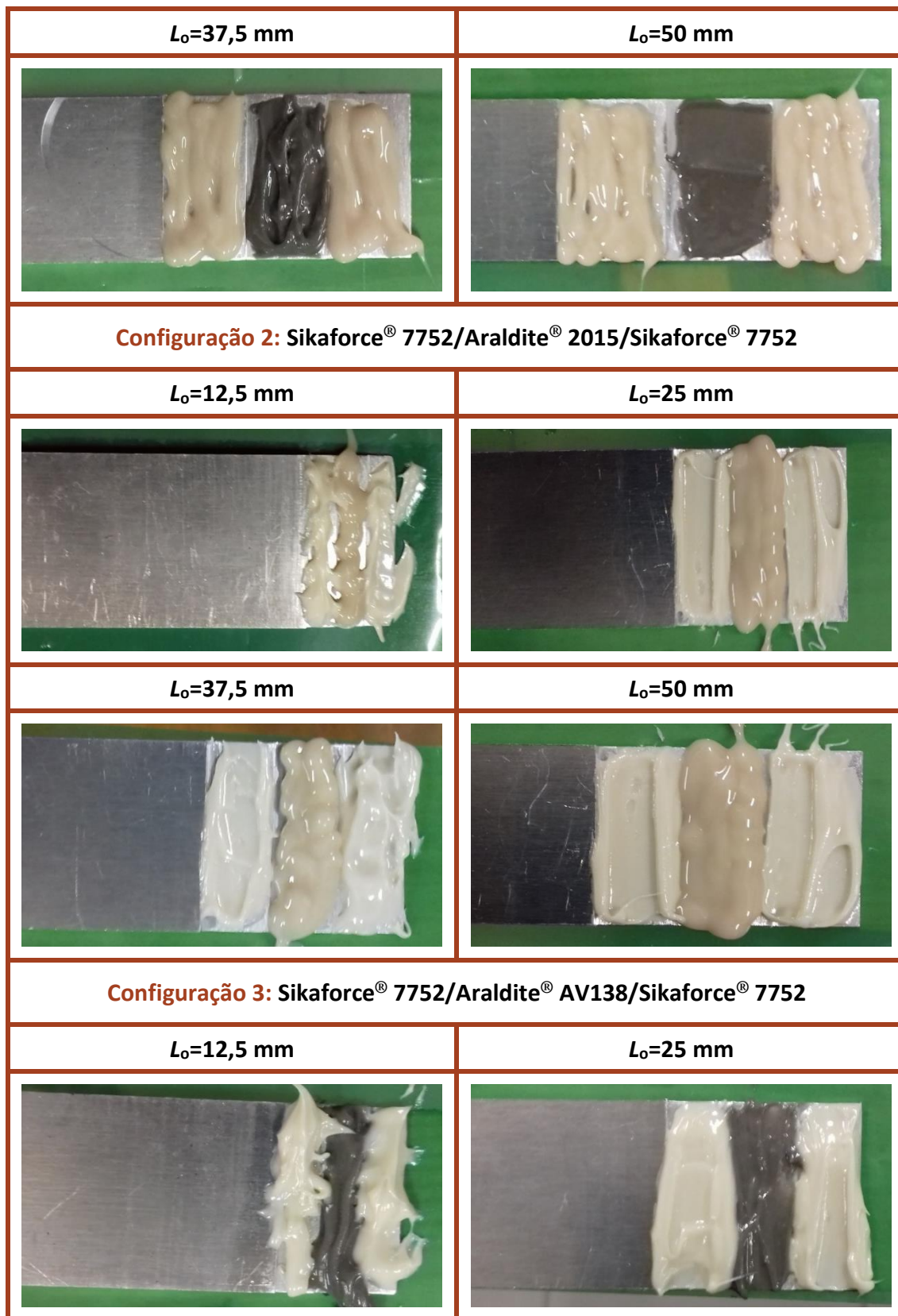
Para cada adesivo foram aplicadas diferentes técnicas de preparação e aplicação, devido às suas diferentes características. Para o adesivo Araldite® AV138, a preparação da mistura consistiu numa proporção de 10 g de resina para 4 g de endurecedor. Esta mistura foi mexida manualmente até à homogeneização do adesivo. Depois de misturado, o adesivo foi aplicado manualmente com recurso a uma espátula.

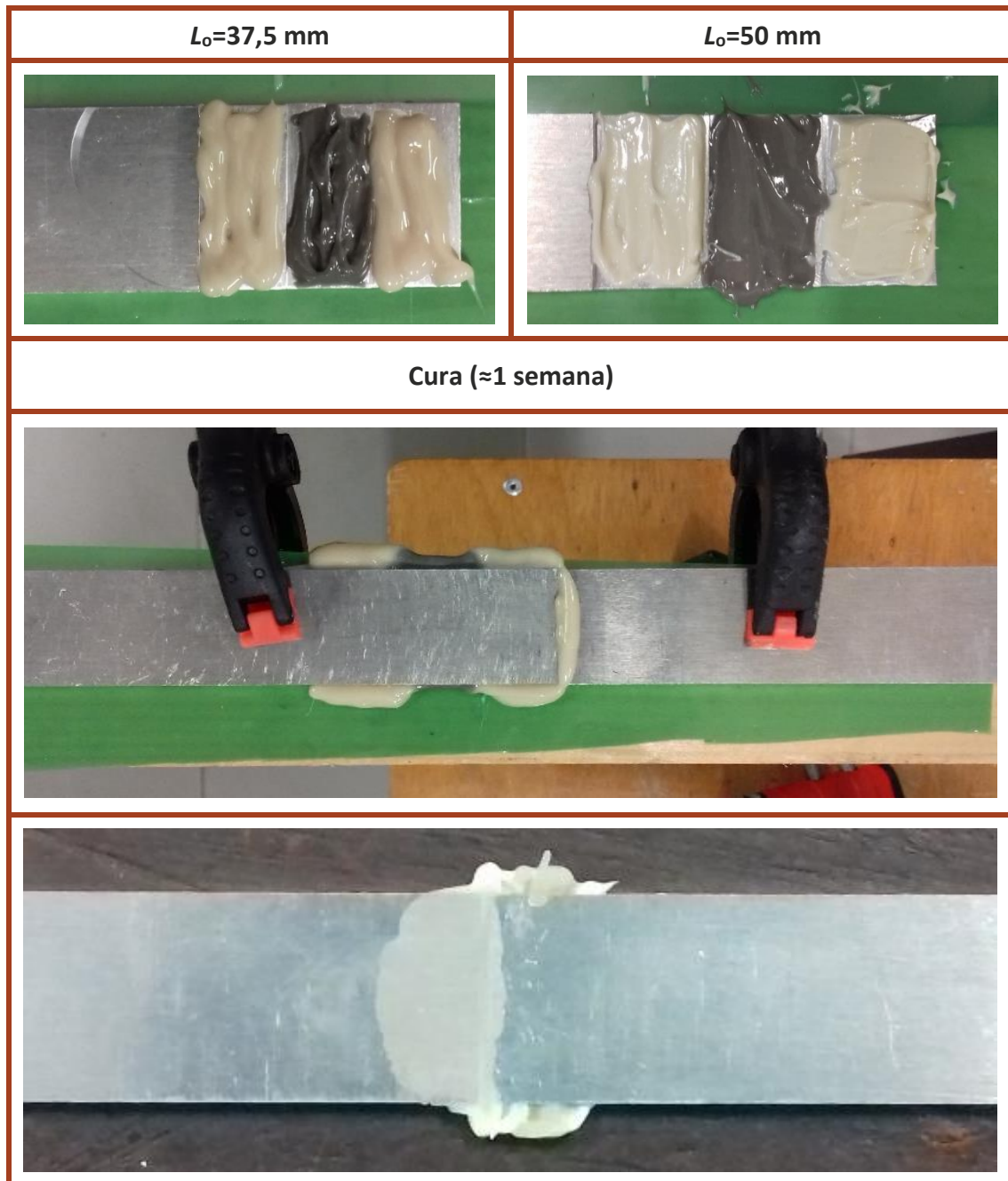
O adesivo Araldite® 2015 é fornecido em bisnagas de 50 ml + 50 ml, e foi aplicado através de uma pistola manual de pressão, onde a mistura dos componentes é assegurada por um bico de mistura da própria embalagem.

O adesivo Sikaforce® 7752 é constituído por dois componentes fornecidos em duas embalagens separadas, uma de resina e outra de endurecedor. A preparação da mistura consistiu numa proporção de 5 g de resina para 1 g de endurecedor. Esta mistura foi mexida manualmente até à homogeneização do adesivo. Depois de misturado, o adesivo foi aplicado manualmente com recurso a uma espátula. Na fabricação das juntas foi assegurado que a quantidade de adesivo aplicado fosse superior à quantidade necessária, de forma a evitar problemas relacionados com a ocorrência de vazios na zona de ligação.

Tabela 18: Aplicação e cura dos adesivos.







6 – Acabamento pós-cura das juntas

Após a cura dos adesivos, foi necessário proceder ao acabamento final dos provetes (Tabela 19). Este processo consistiu na eliminação dos excessos de adesivo depositado nas arestas exteriores da junta, uma vez que estes influenciam a resistência da junta. Na primeira fase do acabamento, foram removidos os excessos de adesivo de maior dimensão com recurso a um alicate. Posteriormente, com o recurso a uma mó abrasiva, procedeu-se ao polimento das arestas laterais da junta, com o intuito em eliminar vestígios de adesivo que não foram removidos na etapa anterior.

Tabela 19: Acabamento pós-cura das juntas.





7 – Ensaios de tração

A última etapa do processo de fabrico das juntas consistiu nos ensaios de tração (Tabela 20). O ensaio das juntas foi realizado numa máquina de ensaios à tração Shimadzu AG-X 100, onde as juntas foram solicitadas à tração. A célula de carga utilizada tem capacidade de 100 kN.

Na realização dos ensaios foi definida uma velocidade de solicitação constante de 1 mm/min, e foi imposto um deslocamento às juntas de modo a que ocorresse sempre a rotura da ligação, ou seja, a separação total dos aderentes.

Tabela 20: Ensaio de tração.



3.1.4 Resultados obtidos

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas força-deslocamento ($P-\delta$), os modos de rotura, análise dos dados obtidos experimentalmente na forma de força máxima ($P_{m\acute{a}x}$) em função de L_0 e as energias de rotura das juntas ($E_{m\acute{a}x}$).

3.1.4.1 Curvas $P-\delta$

As curvas $P-\delta$ consistem em representações gráficas da força em função do deslocamento. Através destas curvas é possível retirar o valor $P_{m\acute{a}x}$ que a junta suportou até a sua rotura, bem como o deslocamento aplicado. Neste estudo foram criadas quatro curvas $P-\delta$ correspondentes a cada valor de L_0 , para as três configurações adesivos.

Na Figura 42 encontram-se representadas as curvas $P-\delta$ para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 para os vários valores de L_0 . Verifica-se que as juntas apresentam um comportamento elástico até à sua rotura. O comportamento elástico de uma junta é caracterizado por uma evolução praticamente linear dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ em relação ao deslocamento, até atingir a rotura total dos adesivos. Para os L_0 maiores observa-se algum amaciamento antes da rotura.

Configuração 1: Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015

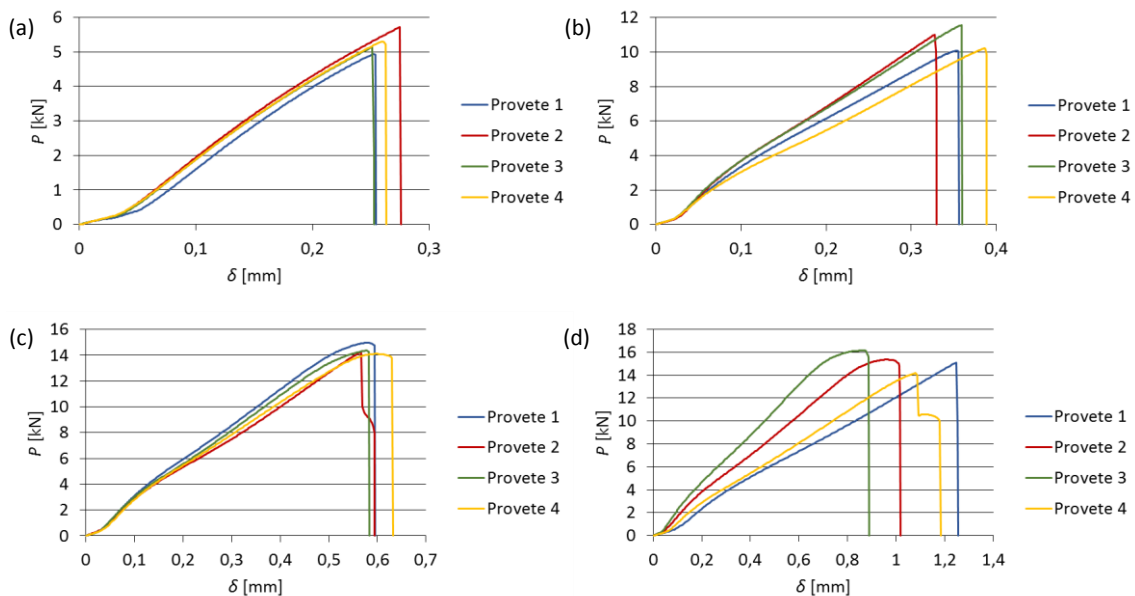


Figura 42: Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente com a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 para (a) $L_0=12,5$ mm, (b) $L_0=25$ mm, (c) $L_0=37,5$ mm e (d) $L_0=50$ mm.

Relativamente aos deslocamentos, possíveis divergências de geometria durante o processo de maquinagem e durante o processo de aplicação dos adesivos podem estar na causa na variação observada. Também é possível observar ligeiras oscilações na rigidez elástica durante o carregamento das juntas, originadas pela flexibilidade da máquina de ensaios e modo de fixação dos provetes.

Na Figura 43 encontram-se representadas as curvas P - δ para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 para os vários valores de L_0 . Verifica-se também um comportamento elástico das juntas até à sua rotura. Tal como no caso anterior, a variação dos deslocamentos pode estar relacionada com possíveis divergências de geometria durante o processo de maquinagem, escorregamento das amarras e durante a aplicação dos adesivos. As oscilações na rigidez elástica durante o carregamento das juntas também estão relacionadas com a flexibilidade da máquina de ensaios e no modo de fixação dos provetes.

Configuração 2: Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752

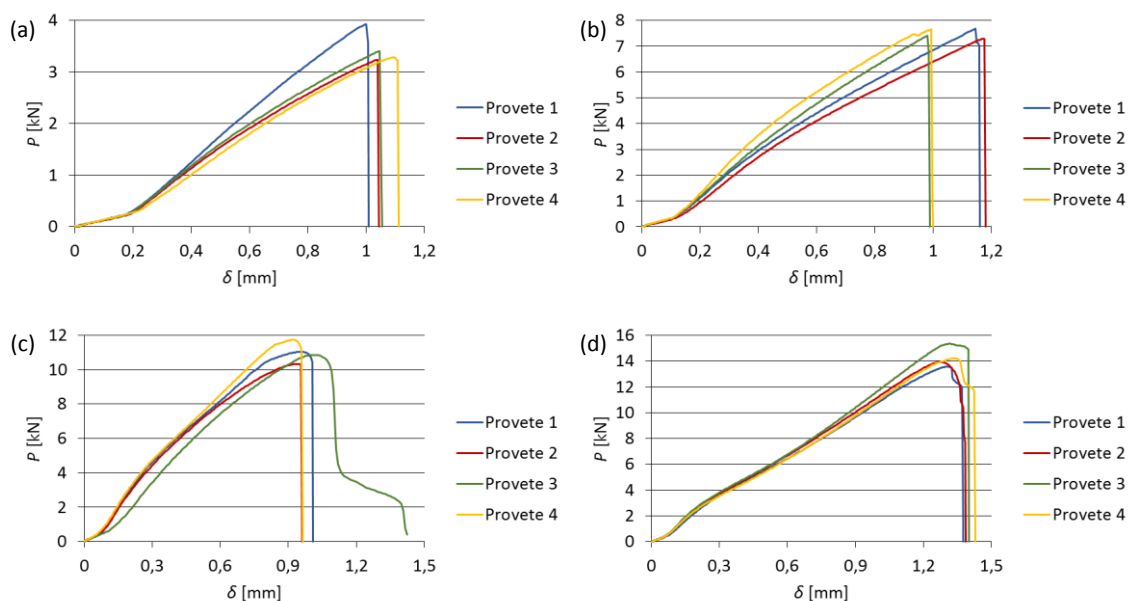


Figura 43: Curvas P - δ obtidas experimentalmente com a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 para (a) $L_0=12,5$ mm, (b) $L_0=25$ mm, (c) $L_0=37,5$ mm e (d) $L_0=50$ mm.

Na Figura 44 encontram-se representadas as curvas P - δ para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 para os vários valores de L_0 . Observa-se a existência de um comportamento elástico das juntas até a sua rotura. Para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm são verificadas variações de rigidez. Também são observadas variações dos deslocamentos e ligeiras oscilações na rigidez elástica durante o carregamento das juntas, pelas razões já mencionadas anteriormente.

Configuração 3: Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752

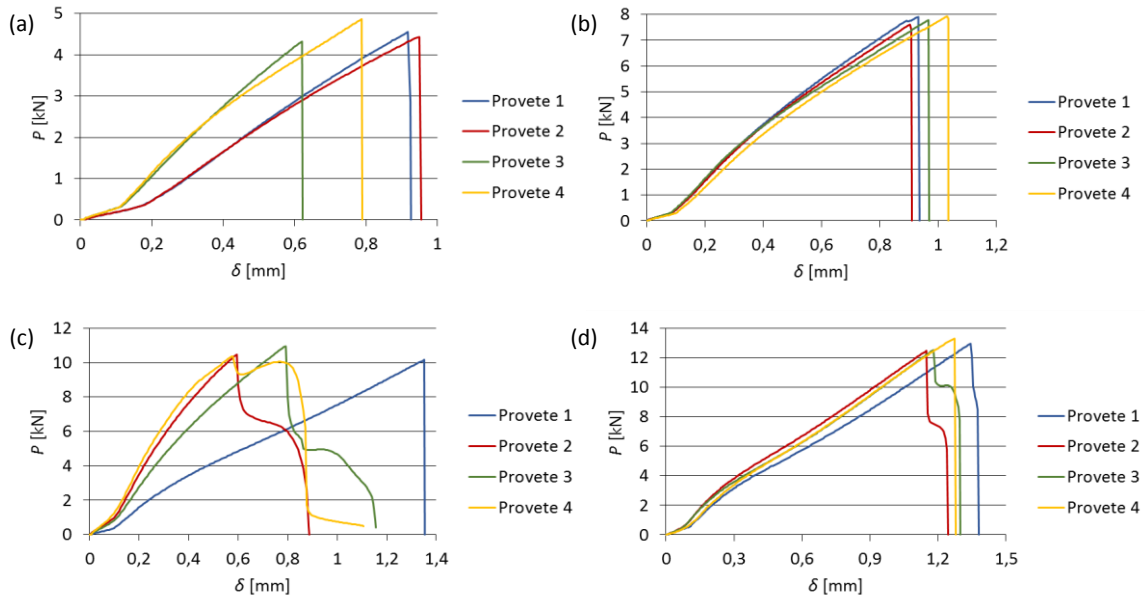


Figura 44: Curvas P - δ obtidas experimentalmente com a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 para (a) $L_0=12,5$ mm, (b) $L_0=25$ mm, (c) $L_0=37,5$ mm e (d) $L_0=50$ mm.

Na Figura 45 e na Tabela 21 são apresentados os valores de $P_{\text{máx}}$ de cada provete em função de L_0 para as três configurações de adesivos. Numa análise preliminar da Figura 45, observa-se que os valores de $P_{\text{máx}}$ dos quatro provetes utilizados para cada L_0 de cada configuração, encontram-se bastante próximos. Verifica-se também que o aumento do L_0 provoca o aumento da força necessária para que a ligação sofra rotura, uma vez que a área de ligação é maior.

Das três configurações utilizadas, a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 apresenta a maior resistência de junta para os quatro L_0 . A configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 apresenta uma resistência menor do que a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015, no entanto apresenta maior resistência do que a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm.

Para $L_0=12,5$ mm a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 apresenta resistência superior à junta composta pelos adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752, aproximando-se bastante da junta com melhores resultados de resistência. Para $L_0=25$ mm, a resistência da junta composta pelos adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 e Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 é praticamente a mesma, sendo que a junta com o adesivo Araldite® AV138 supera ligeiramente a junta com o adesivo Araldite® 2015.

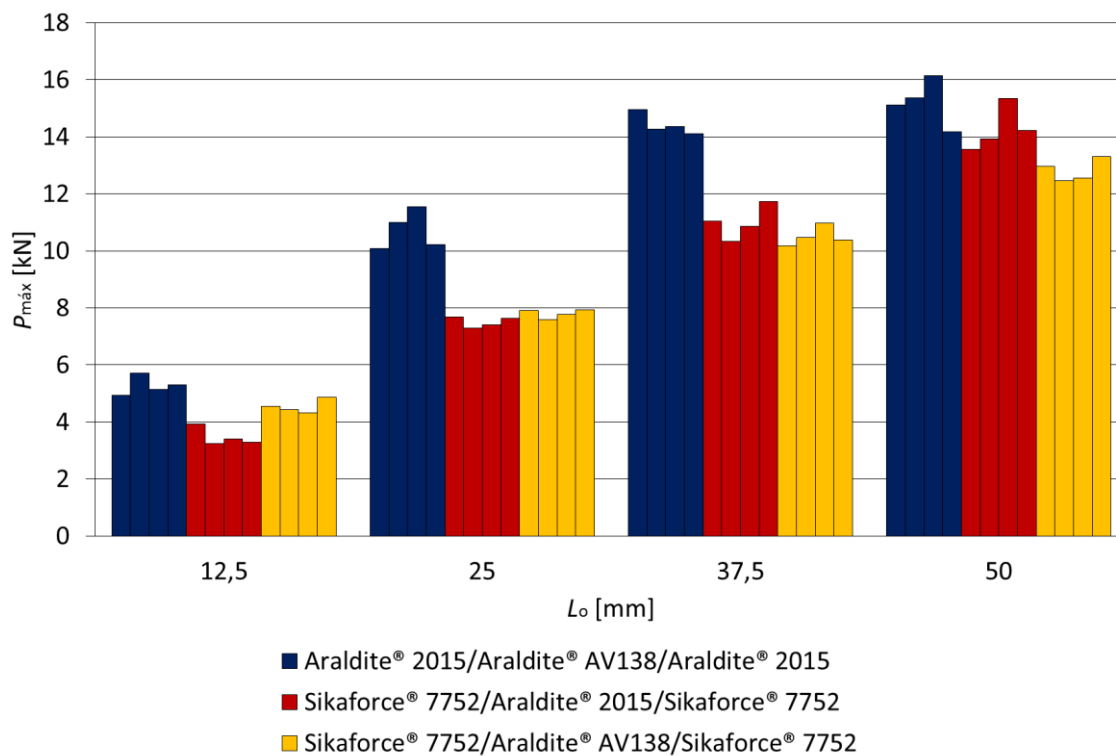


Figura 45: Valores de P_{\max} [kN] de cada provete em função de L_o para as três configurações de adesivos.

Tabela 21: Valores de P_{\max} [kN] de cada provete em função de L_o para as três configurações de adesivos.

Configurações de adesivos		Araldite® 2015 Araldite® AV138 Araldite® 2015				Sikaforce® 7752 Araldite® 2015 Sikaforce® 7752				Sikaforce® 7752 Araldite® AV138 Sikaforce® 7752			
		L_o [mm]	12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5
Provetes	1	4,9	10,1	15,0	15,1	3,9	7,7	11,0	13,6	4,6	7,9	10,2	13,0
	2	5,7	11,0	14,3	15,4	3,2	7,3	10,3	13,9	4,4	7,6	10,5	12,4
	3	5,1	11,5	14,4	16,1	3,4	7,4	10,9	15,3	4,3	7,8	11,0	12,5
	4	5,3	10,2	14,1	14,2	3,3	7,6	11,7	14,2	4,9	7,9	10,4	13,3

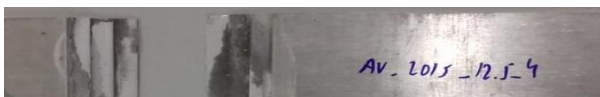

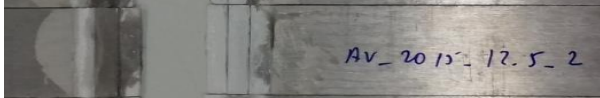


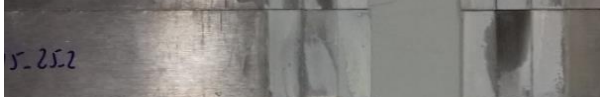


3.1.4.2 Modos de rotura

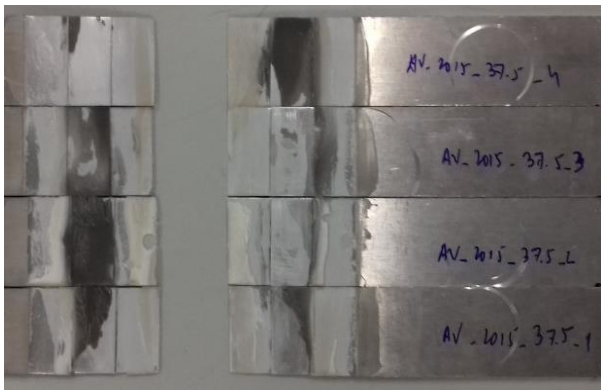
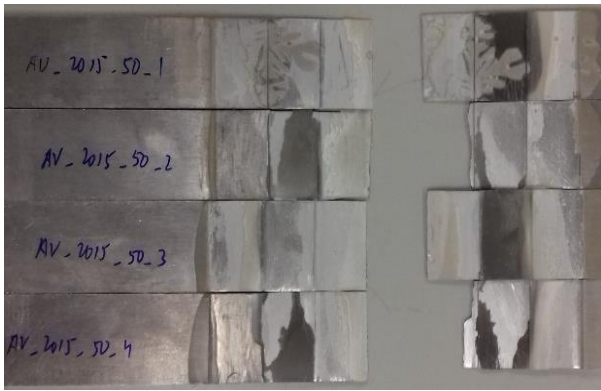
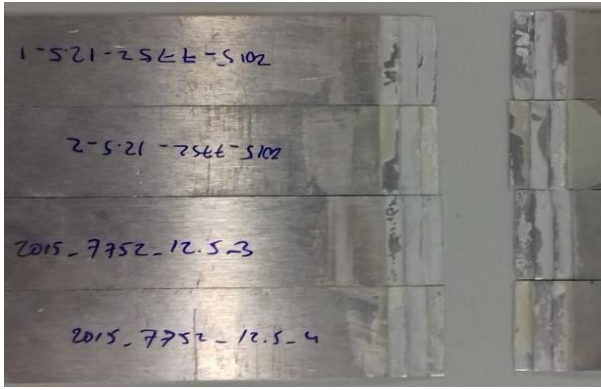

Neste subcapítulo são apresentados os modos de rotura obtidos para as juntas após os ensaios, para as três configurações de adesivos utilizados e para os quatro valores de L_0 (Tabela 22).





Os modos de rotura para as três configurações de adesivos foram maioritariamente roturas coesivas. A rotura coesiva é um dos modos de rotura preferenciais. Este tipo de rotura dá-se no interior do adesivo, e ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Após a rotura, ambas as superfícies encontram-se cobertas por adesivo. A rotura coesiva próxima da interface ocorreu em algumas juntas ensaiadas e, embora possa visualmente parecer uma rotura adesiva, uma inspeção mais cuidada mostra a existência de uma camada fina de adesivo no aderente [1].

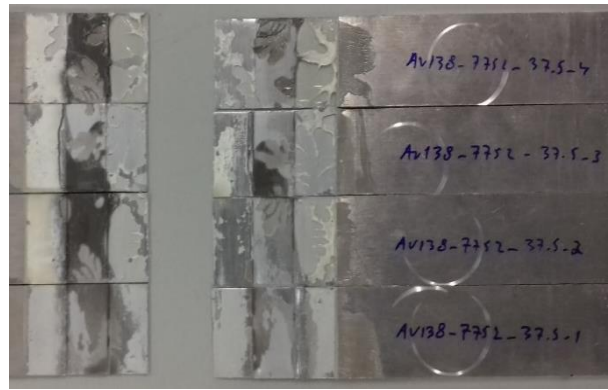
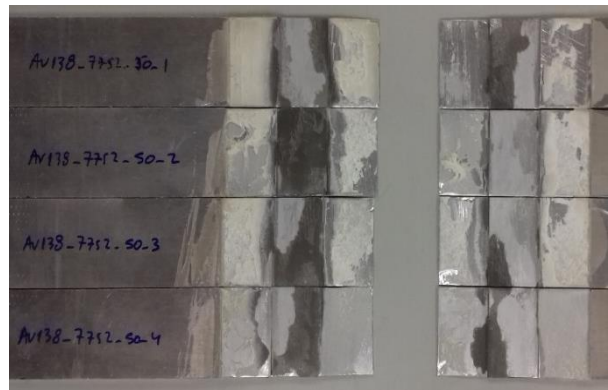
Em alguns casos pontuais, verificou-se também rotura pelo aderente. Tal como a rotura coesiva, a rotura pelo aderente também é um modo de rotura preferencial, uma vez que utiliza a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta [1].

Tabela 22: Modos de rotura experimentais.

L_0 [mm]	Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015	Modos de rotura
12,5		Coesiva
		Coesiva
		Coesiva
		Coesiva
25		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva

37,5		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva
50		Coesiva próxima da interface
		Aderente e Coesiva
		Coesiva próxima da interface
		Aderente e Coesiva
L₀ [mm]	Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752	Modos de rotura
12,5		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva
25		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface

37,5		Coesiva
		Coesiva próxima da interface
		Aderente e Coesiva
		Coesiva próxima da interface
50		Coesiva próxima da interface
		Coesiva
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
L₀ [mm]	Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752	Modos de rotura
12,5		Coesiva
		Coesiva
		Coesiva
		Coesiva
25		Coesiva
		Coesiva
		Coesiva
		Coesiva

37,5		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
50		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface
		Coesiva próxima da interface

3.1.4.3 Resistência das juntas

A Figura 46 mostra os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e respectivos desvios padrão, em função de L_0 para as três configurações de adesivos. Verifica-se que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ aumenta de forma aproximadamente linear com o valor de L_0 , independentemente dos adesivos utilizados.

Na Tabela 23 são apresentados os valores médios e respectivos desvios padrão de $P_{m\acute{a}x}$, em kN, para as três configurações de adesivos. Os valores de desvio padrão em porcentagem encontram-se abaixo dos 10%, pelo que são considerados aceitáveis.

A configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 apresenta a maior resistência de junta. Apesar dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ aumentarem com o aumento de L_0 , o incremento da resistência não é tão acentuado quando comparado com as restantes configurações, nomeadamente para $L_0 \geq 25$ mm. Quando comparada com as configurações de adesivos:

- ❖ Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 apresenta uma diferença:
 - Mínima de 6,3% para $L_0=50$ mm;
 - Máxima de 51,4% para $L_0=12,5$ mm.
- ❖ Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 apresenta uma diferença:
 - Mínima de 17,8% para $L_0=12,5$ mm;
 - Máxima de 37,2% para $L_0=25$ mm.

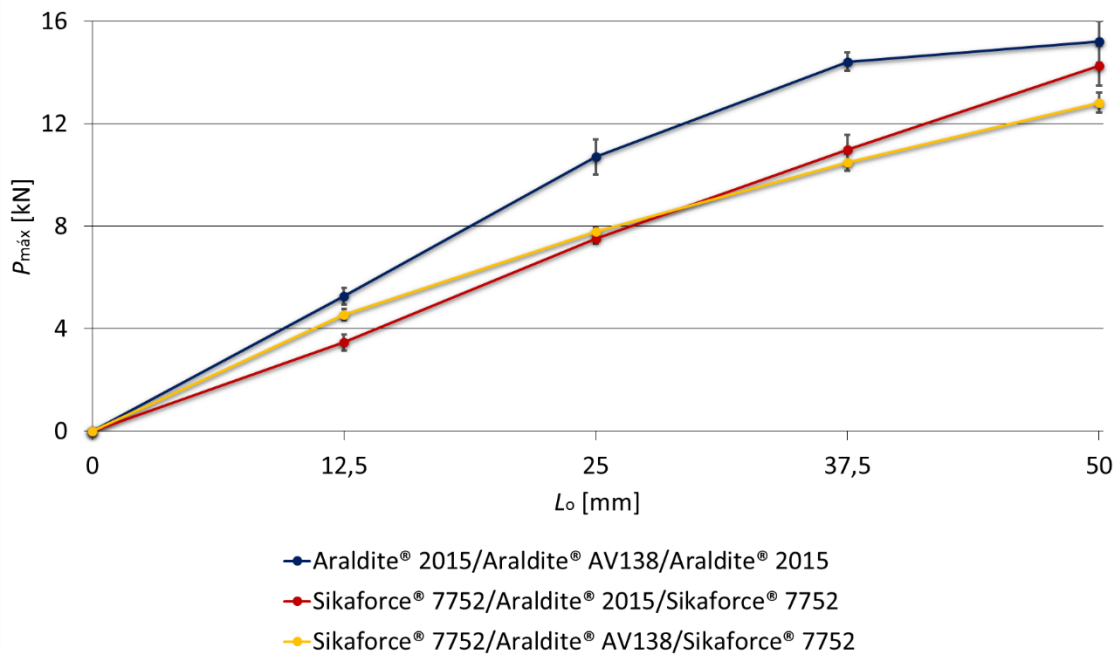


Figura 46: Valores médios de $P_{máx}$ [kN] e respectivos desvios padrão em função de L_o para as três configurações de adesivos.

Tabela 23: Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o para as três configurações de adesivos.

Configurações de adesivos	Araldite® 2015 Araldite® AV138 Araldite® 2015				Sikaforce® 7752 Araldite® 2015 Sikaforce® 7752				Sikaforce® 7752 Araldite® AV138 Sikaforce® 7752				
	L_o [mm]	12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5	50
Média		5,3	10,7	14,4	15,2	3,5	7,5	11,0	14,3	4,5	7,8	10,5	12,8
Desvio Padrão		0,3	0,7	0,4	0,8	0,3	0,2	0,6	0,8	0,2	0,2	0,3	0,4
Desvio Padrão [%]		5,7	6,5	2,8	5,3	8,6	2,7	5,5	5,6	4,4	2,6	2,9	3,1

A configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 apresenta o maior incremento de resistência em função de L_o . Apresenta também melhor resistência de junta do que a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 para $37,5 \text{ mm} \leq L_o \leq 50 \text{ mm}$. A melhoria relativa da configuração Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 comparativamente à configuração Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 é de 4,8% para $L_o=37,5 \text{ mm}$, e 11,7% para $L_o=50 \text{ mm}$. Contudo, os baixos valores de $P_{máx}$ da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 para $L_o \leq 25 \text{ mm}$ faz desta configuração de adesivos a menos resistente para baixos valores de L_o , das seguintes quantidades relativamente às restantes configurações:

- ❖ Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015
 - -34,0% → $L_0=12,5$ mm;
 - -29,9% → $L_0=25$ mm.
- ❖ Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752
 - -22,2% → $L_0=12,5$ mm;
 - -3,8% → $L_0=25$ mm.

A utilização dos adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 é mais adequada para baixos valores de L_0 . Para valores de L_0 elevados, a resistência das juntas com esta configuração de adesivos não é tão satisfatória. Quando comparada com a configuração de adesivos:

- ❖ Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -27,1% para $L_0=25$ mm;
 - Máxima de -15,1% para $L_0=12,5$ mm.
- ❖ Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -10,5% para $L_0=50$ mm;
 - Máxima de 28,6% para $L_0=12,5$ mm.

3.1.4.4 Energias de rotura

Os valores de $E_{m\acute{a}x}$ das juntas adesivas podem ser calculadas a partir das áreas das curvas $P-\delta$ (Figura 47). Estas áreas são obtidas através da multiplicação das forças com as variações dos deslocamentos, obtendo-se a energia máxima necessária para a rotura das juntas.

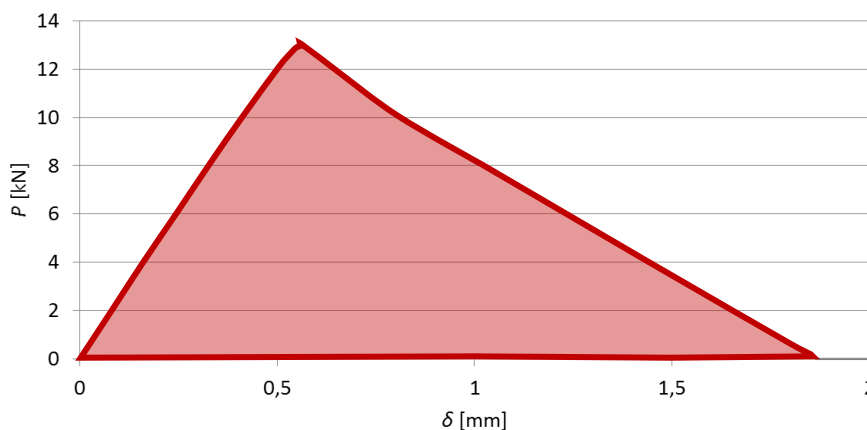


Figura 47: Área da curva $P-\delta$ correspondente ao cálculo de $E_{m\acute{a}x}$.

Na Figura 48 encontram-se representadas os valores médios de $E_{m\acute{a}x}$ e respetivos desvios padrão, em função dos quatro L_0 para as três configurações de adesivos. Verifica-se que o aumento do valor L_0 promove o aumento dos valores de $E_{m\acute{a}x}$, independentemente dos adesivos utilizados.

Na Tabela 24 são apresentados os valores médios e respetivos desvios padrão de $E_{m\acute{a}x}$, em kN.mm, para as três configurações de adesivos. Para o cálculo destas energias foram considerados quatro provetes para cada valor de L_0 . A maioria dos desvios padrão encontram-se abaixo dos 10%. Para os desvios padrão acima dos 10%, o principal motivo deve-se à variação acentuada dos deslocamentos de rotura entre provetes.

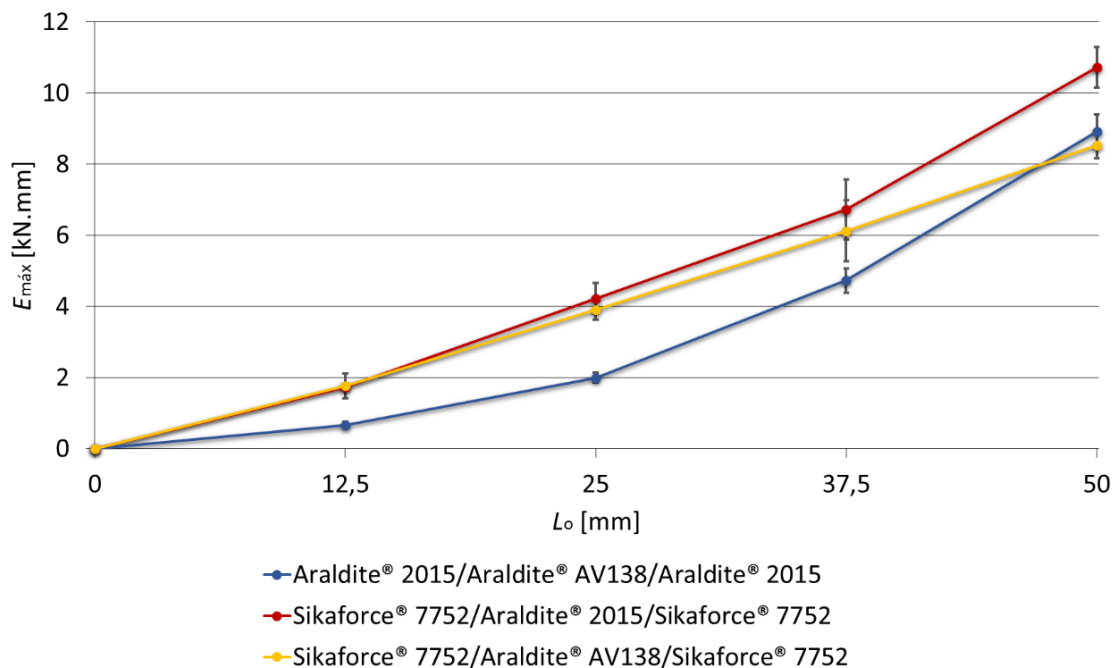


Figura 48: Valores médios de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] e respetivos desvios padrão em função de L_0 para as três configurações de adesivos.

Tabela 24: Valores médios e desvios padrão de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm].

Configurações de adesivos		Araldite® 2015 Araldite® AV138 Araldite® 2015				Sikaforce® 7752 Araldite® 2015 Sikaforce® 7752				Sikaforce® 7752 Araldite® AV138 Sikaforce® 7752			
		L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5
Provetes	1	0,6	1,9	5,0	9,5	1,8	4,7	6,7	10,0	1,9	3,9	7,0	9,0
	2	0,8	1,8	4,3	8,9	1,6	4,5	5,9	10,5	2,0	3,6	5,0	8,1
	3	0,6	2,2	4,6	8,3	1,7	3,7	7,9	11,4	1,2	4,0	6,2	8,6
	4	0,7	2,1	5,1	9,0	1,8	4,1	6,5	10,9	2,0	4,2	6,3	8,6
Média		0,7	2,0	4,7	8,9	1,7	4,2	6,7	10,7	1,8	3,9	6,1	8,5
Desvio Padrão		0,1	0,2	0,3	0,5	0,1	0,4	0,9	0,6	0,4	0,3	0,9	0,4
Desvio Padrão [%]		14,3	10,0	6,4	5,6	5,9	9,5	13,4	5,6	22,2	7,7	14,8	4,7

A configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752 apresenta os valores de $E_{m\acute{a}x}$ mais elevados, exceto para $L_o=12,5$ mm, onde o $E_{m\acute{a}x}$ da configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752 é praticamente coincidente. A configuração Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752 quando comparada com as configurações:

- ❖ Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015 apresenta uma diferença:
 - Mínima de 20,2% para $L_o=50$ mm;
 - Máxima de 142,9% para $L_o=12,5$ mm.
- ❖ Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -5,6% para $L_o=12,5$ mm;
 - Máxima de 25,9% para $L_o=50$ mm.

A configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752, também regista elevados valores de $E_{m\acute{a}x}$, exceto para $L_o=50$ mm, onde a configuração de adesivos Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015 supera ligeiramente. A configuração Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752 promove uma incrementação suave de $E_{m\acute{a}x}$ ao longo de L_o . Quando comparada com as configurações de adesivos:

- ❖ Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -4,5% para $L_o=50$ mm;
 - Máxima de 157,1% para $L_o=12,5$ mm.
- ❖ Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -20,6% para $L_o=50$ mm;
 - Máxima de 5,9% para $L_o=12,5$ mm.

A configuração de adesivos Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015 apresenta os menores valores de $E_{m\acute{a}x}$ para $L_o \leq 37,5$ mm. Quando comparada com as configurações de adesivos:

- ❖ Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -61,1% para $L_o=12,5$ mm;
 - Máxima de 4,7% para $L_o=50$ mm.
- ❖ Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -58,8% para $L_o=12,5$ mm;
 - Máxima de -16,8% para $L_o=50$ mm.

3.1.5 Comparação com resultados de adesivo único

Este subcapítulo destina-se à comparação de resultados entre as juntas mistas e as juntas de adesivo único. No ponto 3.1.5.1 é feita a comparação de resultados da resistência das juntas e no ponto 3.1.5.2 a comparação de resultados de $E_{m\acute{a}x}$.

Nas juntas com adesivo único foram considerados isoladamente os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

3.1.5.1 Resistência das juntas

Na Figura 49 encontram-se representados os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e respetivos desvios padrão em função de L_o , para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas. Desde já, verifica-se que o aumento de L_o afeta a resistência das juntas independentemente do tipo de junta utilizado.

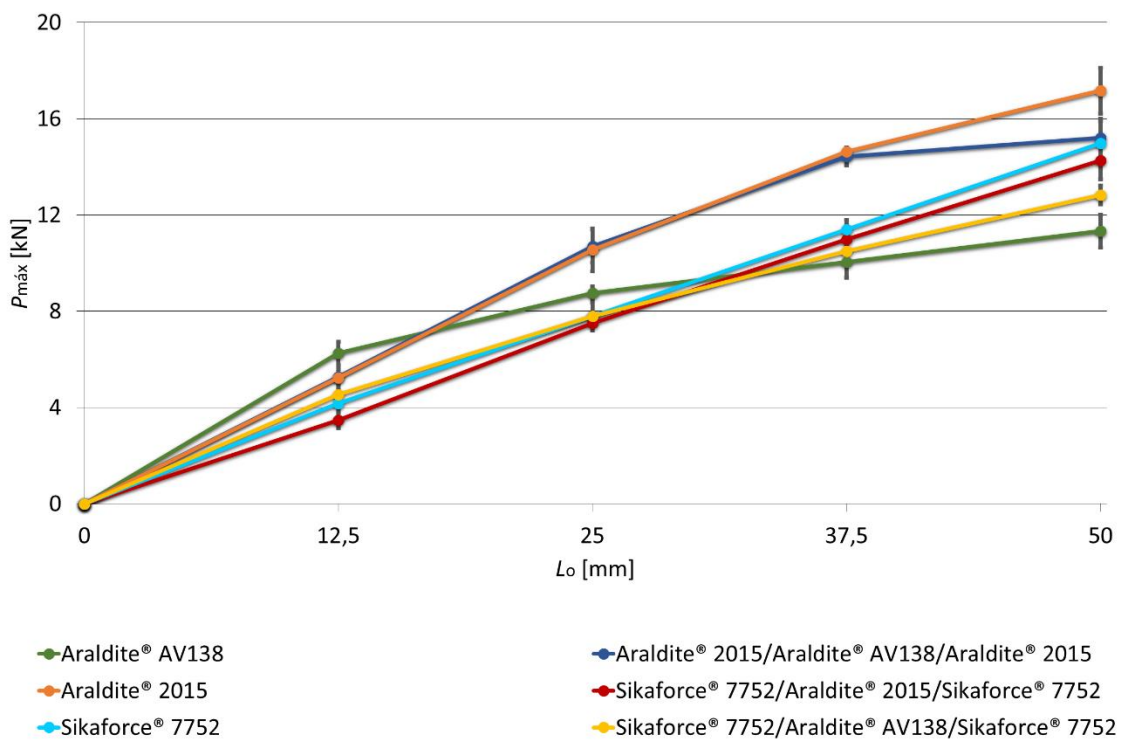


Figura 49: Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] e respetivos desvios padrão em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.

Na Tabela 25 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ e respetivos desvios padrão, em kN, obtidos experimentalmente para as juntas de adesivo único com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. No cálculo das forças médias máximas e nos respetivos desvios padrão foram considerados cinco provetes para cada L_o . Neste caso, os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ também aumentam de forma aproximadamente linear com o

aumento de L_0 . Os desvios padrão encontram-se abaixo dos 10%, sendo de certa forma aceitáveis.

Tabela 25: Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] e respetivos desvios padrão obtidos experimentalmente para as juntas de adesivo único.

Adesivos		Araldite® AV138				Araldite® 2015				Sikaforce® 7752			
L_0 [mm]		12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5	50
Provêtes	1	-----	8,9	-----	11,4	5,4	10,1	14,9	16,4	4,2	7,6	11,7	13,9
	2	6,1	8,5	9,2	-----	-----	10,6	14,5	-----	4,4	8,6	10,8	14,6
	3	6,7	8,8	10,6	11,9	5,4	11,8	14,5	18,5	4,3	7,0	11,4	14,6
	4	5,6	9,1	10,6	11,7	4,5	-----	14,6	16,6	3,7	8,1	11,8	15,7
	5	6,6	8,5	9,8	10,4	5,7	9,7	-----	17,1	4,2	7,6	11,3	16,1
Média		6,3	8,8	10,1	11,3	5,2	10,5	14,6	17,2	4,2	7,8	11,4	15,0
Desvio Padrão		0,5	0,3	0,7	0,7	0,5	0,9	0,2	1,0	0,3	0,6	0,4	0,9
Desvio Padrão [%]		7,9	3,4	6,9	6,2	9,6	8,6	1,4	5,8	7,1	7,7	3,5	6,0

----- Valores não considerados.

A resistência mais elevada para $L_0=12,5$ mm é atribuída à utilização de juntas compostas unicamente pelo adesivo Araldite® AV138. A elevada rigidez deste adesivo faz com que seja necessária uma maior força aplicada para a sua rotura. Com o menor valor de resistência encontra-se a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752. As diferenças relativas da junta mais resistente (Araldite® AV138) comparativamente às outras juntas são as seguintes:

- 18,9% → Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 21,2% → Araldite® 2015;
- 40,0% → Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752;
- 50,0% → Sikaforce® 7752;
- 80,0% → Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752.

Para $L_0=25$ mm, a utilização de juntas mistas já confere maior resistência de junta, com a utilização dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. A ductilidade moderada e a capacidade de plastificação do adesivo Araldite® 2015, quando combinadas com a elevada rigidez do adesivo Araldite® AV138, promovem o aumento da resistência da ligação. A perda de resistência do adesivo Araldite® AV138 a partir deste L_0 deve-se à

sua fraca ductilidade. A configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752 continua a registar o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$. São registadas as seguintes diferenças percentuais entre cada configuração de junta e a configuração ótima:

- 1,9% → Araldite[®] 2015;
- 21,6% → Araldite[®] AV138;
- 37,2% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752;
- 37,2% → Sikaforce[®] 7752;
- 42,7% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752.

Para $L_0=37,5$ mm a utilização única do adesivo Araldite[®] 2015 apresenta a melhor resistência de junta. A capacidade de plastificação do adesivo está na origem dos elevados valores de $P_{m\acute{a}x}$. A perda de resistência da configuração de adesivos Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015 deve-se à baixa deformação de rotura à tração (ϵ_f) do adesivo Araldite[®] AV138. Com o menor valor de resistência encontra-se a utilização única do adesivo Araldite[®] AV138 devido possivelmente ao aumento do gradiente de tensões no adesivo. A melhoria relativa da configuração ótima relativamente a cada uma das outras configurações é:

- 1,4% → Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015;
- 28,1% → Sikaforce[®] 7752;
- 32,7% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752;
- 39,0% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752;
- 44,6% → Araldite[®] AV138.

Para $L_0=50$ mm a utilização de juntas compostas unicamente pelo adesivo Araldite[®] 2015 continua a apresentar a melhor resistência de junta. Tal como no caso anterior, a utilização única do adesivo Araldite[®] AV138 origina a menor resistência de junta. A variação da junta composta unicamente pelo adesivo Araldite[®] 2015 relativamente a cada uma das restantes configurações é de seguida apresentada:

- 13,2% → Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015;
- 14,7% → Sikaforce[®] 7752;
- 20,3% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752;
- 34,4% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752;
- 52,2% → Araldite[®] AV138.

Em suma, nas juntas em degrau, o tipo de adesivo ou combinação de adesivos utilizados na ligação afeta de forma significativa o desempenho da junta. Apesar das juntas mistas representarem uma das técnicas de aumento da resistência das ligações adesivas, a sua utilização só é favorável em casos particulares, uma vez que a combinação de dois adesivos pode conferir ou retirar a resistência da ligação consoante o L_0 . Neste caso em

particular, pode ser concluído que a utilização de juntas mistas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 só é favorável para $25 \text{ mm} \leq L_o < 37,5 \text{ mm}$. Para valores de $L_o \leq 12,5 \text{ mm}$ a utilização única do adesivo Araldite® AV138 é mais satisfatória. Por outro lado, para $37,5 \text{ mm} \leq L_o \leq 50 \text{ mm}$ a utilização única do adesivo Araldite® 2015 é a mais adequada.

Com a utilização de juntas mistas foi obtido um ganho na resistência de 42,6% relativamente às juntas de adesivo único, correspondente à configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 relativamente a uma junta composta unicamente pelo adesivo Araldite® AV138 (para $L_o=37,5 \text{ mm}$). No entanto, foi registado uma perda na resistência de 44,4% para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 relativamente a uma junta composta unicamente pelo adesivo Araldite® AV138 (para $L_o=12,5 \text{ mm}$).

3.1.5.2 Energias de rotura

A Figura 50 mostra os valores médios de $E_{m\acute{a}x}$ e respetivos desvios padrão em função de L_o , para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas. De uma forma geral, observa-se que os adesivos com menor rigidez apresentam valores de $E_{m\acute{a}x}$ mais elevados.

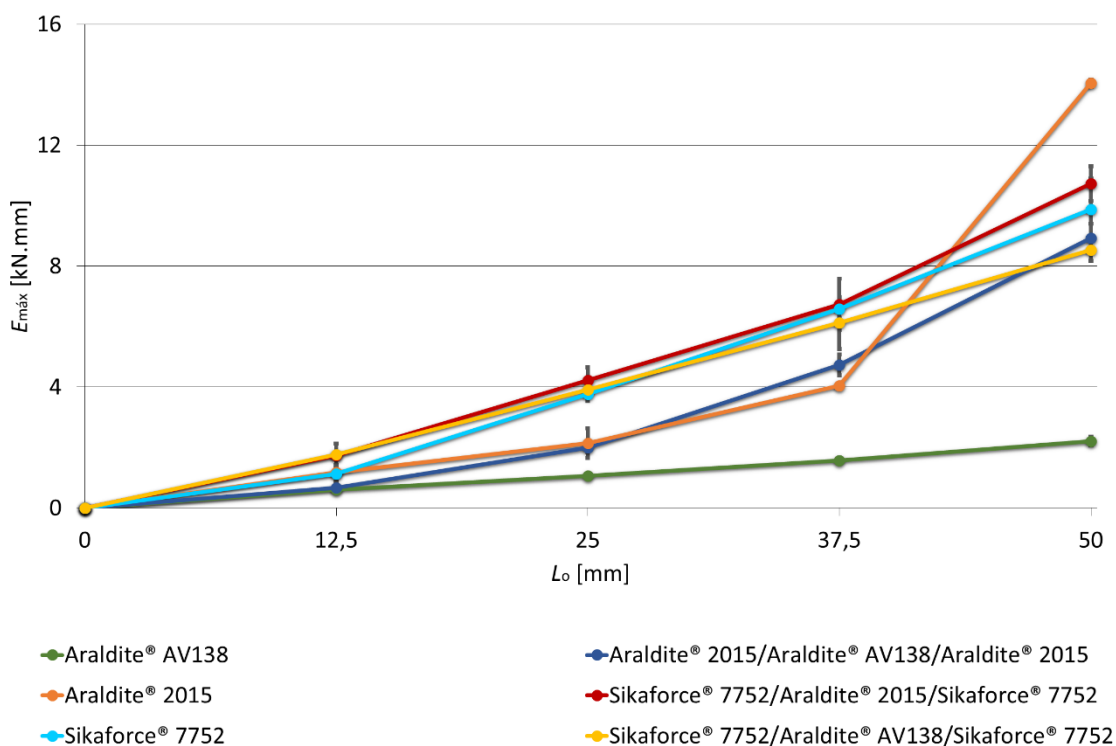


Figura 50: Valores médios de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] e respetivos desvios padrão em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.

Na Tabela 26 encontram-se indicados os valores de $E_{m\acute{a}x}$ e respetivos desvios padr˜ao, em kN.mm, para as juntas de adesivo ˜unico com os adesivos Araldite[®] AV138, Araldite[®] 2015 e Sikaforce[®] 7752. No cˆalculo de $E_{m\acute{a}x}$ e respetivos desvios padr˜ao foram considerados cinco provetes para cada L_o . Os valores mˆedios de $E_{m\acute{a}x}$ tambˆem aumentam de forma aproximadamente linear com o aumento de L_o . A maioria dos desvios padr˜ao encontram-se abaixo dos 10%. Para os desvios padr˜ao acima dos 10%, o principal motivo deve-se ˆa varia˜ao acentuada dos deslocamentos entre provetes.

Tabela 26: Valores mˆedios de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] e respetivos desvios padr˜ao para as juntas de adesivo ˜unico [kN.mm].

Adesivos		Araldite [®] AV138				Araldite [®] 2015				Sikaforce [®] 7752			
		L_o [mm]	12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5	50	12,5	25	37,5
Provetes	1	-----	1,1	-----	2,3	1,2	2,3	4,2	13,9	1,0	3,5	6,3	8,3
	2	0,5	1,1	1,5	-----	-----	2,2	4,0	-----	0,9	4,1	6,3	9,7
	3	0,7	1,0	1,6	2,1	1,3	2,6	4,0	14,1	1,6	3,7	6,7	10,8
	4	0,6	1,1	1,6	2,3	1,0	-----	4,1	14,1	1,1	3,7	6,9	9,9
	5	0,7	1,0	1,5	2,0	1,2	1,5	-----	14,2	1,1	3,8	6,8	10,7
Mˆedia		0,6	1,1	1,6	2,2	1,2	2,1	4,1	14,0	1,1	3,8	6,6	9,9
Desvio Padr˜ao		0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1	0,3	0,2	0,3	1,0
Desvio Padr˜ao [%]		16,7	9,1	6,3	9,1	8,3	23,8	2,3	0,7	27,3	5,3	4,5	10,1

----- Valores nˆao considerados.

O valor de $E_{m\acute{a}x}$ mais elevado para $L_o=12,5$ mm ˆe atribuıdo ˆa utiliza˜ao de juntas mistas com a configura˜ao de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752. A elevada ductilidade do adesivo Sikaforce[®] 7752 promove o aumento do deslocamento de rotura da liga˜ao, o que origina o aumento da ˆarea da curva $P-\delta$. A utiliza˜ao ˜unica do adesivo Araldite[®] AV138 regista o menor valor de $E_{m\acute{a}x}$ devido essencialmente ao seu reduzido deslocamento de rotura. As diferen˜as relativas da junta mais resistente (Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752) comparativamente ˆas outras juntas sˆao as seguintes:

- 5,9% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752;
- 50,0% → Araldite[®] 2015;
- 63,6% → Sikaforce[®] 7752;
- 157,1% → Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015;
- 200,0% → Araldite[®] AV138.

Para $L_o=25$ mm, a junta mista constituída pelos adesivos Araldite[®] 2015 e Sikaforce[®] 7752 apresenta o maior valor de $E_{m\acute{a}x}$. A perda de energia da configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752 deve-se possivelmente ao aumento do gradiente de tensões no adesivo Araldite[®] AV138, diminuindo a sua resistência. A utilização única do adesivo Araldite[®] AV138 continua a registar o menor valor de $E_{m\acute{a}x}$. São registadas as seguintes diferenças percentuais entre cada configuração de junta e a configuração ótima:

- 7,7% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752;
- 10,5% → Sikaforce[®] 7752;
- 100,0% → Araldite[®] 2015;
- 110,0% → Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015;
- 281,8% → Araldite[®] AV138.

Para $L_o=37,5$ mm a configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752 continua a registar o $E_{m\acute{a}x}$ mais elevado. A utilização única do adesivo Sikaforce[®] 7752 regista o segundo $E_{m\acute{a}x}$ mais elevado. Tal como nos casos anteriores, a junta constituída apenas pelo adesivo Araldite[®] AV138 apresenta o menor $E_{m\acute{a}x}$. A melhoria relativa da configuração ótima relativamente a cada uma das outras configurações é:

- 1,5% → Sikaforce[®] 7752;
- 9,8% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752;
- 42,6% → Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015;
- 63,4% → Araldite[®] 2015;
- 318,8% → Araldite[®] AV138.

Para $L_o=50$ mm, a utilização única do Araldite[®] 2015 regista o maior valor de $E_{m\acute{a}x}$. Este aumento acentuado de $E_{m\acute{a}x}$ deve-se ao aparecimento de fenomenos de plastificação nos aderentes. Tal como nos casos anteriores, a junta constituída apenas pelo adesivo Araldite[®] AV138 apresenta o menor $E_{m\acute{a}x}$. A variação da junta composta unicamente pelo adesivo Araldite[®] 2015 relativamente a cada uma das restantes configurações é de seguida apresentada:

- 30,8% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752;
- 41,4% → Sikaforce[®] 7752;
- 57,3% → Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015;
- 64,7% → Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752;
- 536,4% → Araldite[®] AV138.

Em suma, as juntas mistas apresentam maiores valores de $E_{m\acute{a}x}$ quando comparadas com as juntas de adesivo único. Adesivos com baixa rigidez e elevada ductilidade promovem a deslocamentos até à rotura mais elevados. Estes deslocamentos influenciam as áreas das curvas $P-\delta$. Maiores deslocamentos provocam maiores áreas das curvas $P-\delta$, o que

se traduz em valores de $E_{m\acute{a}x}$ elevados. A plastificação dos aderentes também provoca o aumento de $E_{m\acute{a}x}$. Os adesivos de baixa ductilidade quando combinados com adesivos de ductilidade moderada ou elevada sofrem aumentos significativos de $E_{m\acute{a}x}$, uma vez que é aumentado o deslocamento até à rotura da ligação.

No trabalho experimental foi concluído que a resistência das juntas em degrau com dois adesivos é afetada pelo L_0 , o que indica que este tipo de juntas só deve ser utilizado em casos particulares. Com este tipo de juntas foi obtido um ganho na resistência de 42,6% relativamente às juntas de adesivo único. No entanto, foi registado uma perda na resistência de 44,4% relativamente as juntas de adesivo único.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo é feita a abordagem ao trabalho numérico realizado no âmbito da presente dissertação. No ponto 3.2.1 são explicadas as condições da análise numérica necessárias para a simulação das juntas. No ponto 3.2.2 é descrito o modelo de dano utilizado na análise da resistência das juntas e no ponto 3.2.3 a determinação das propriedades de dano. O ponto 3.2.4 é dedicado à análise de tensões nas juntas, onde são analisadas as tensões de arrancamento e de corte das ligações. No ponto 3.2.5 é descrito o estudo da variável de dano para as três configurações de adesivos. O ponto 3.2.6 é dedicado à previsão do comportamento das juntas, onde são apresentadas as curvas $P-\delta$, os modos de rotura, a resistência das juntas e os valores de $E_{m\acute{a}x}$ das juntas. A comparação de resultados das juntas mistas com as juntas de adesivo único é realizada no ponto 3.2.7. O ponto 3.2.8 é dedicado ao estudo de outras configurações de adesivos.

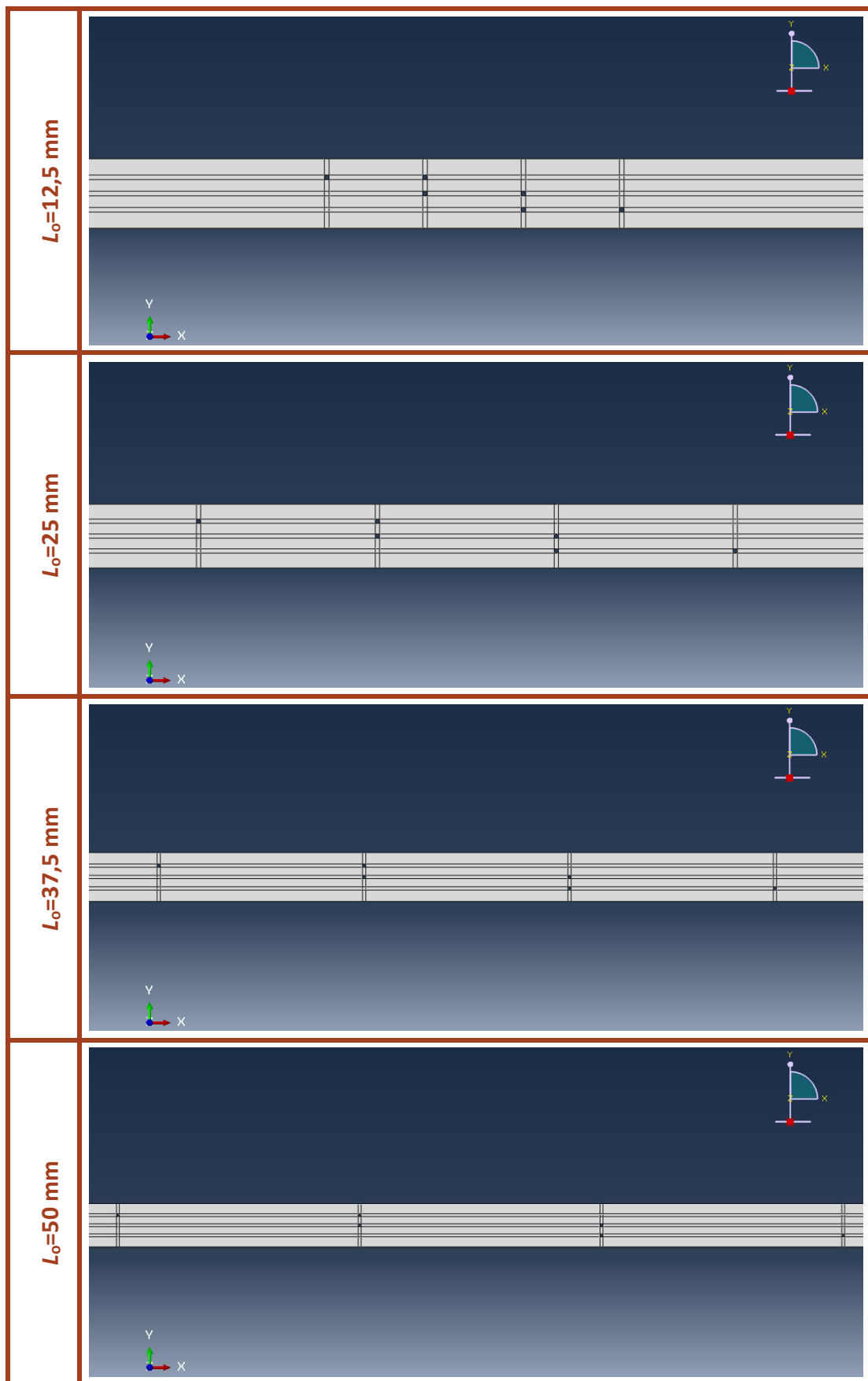
3.2.1 Condições da análise numérica

Para a realização do trabalho numérico foi utilizado o *software* ABAQUS®/CAE 2016.HF2. O *software* ABAQUS® consiste num programa de simulação baseado no MEF, que permite a escolha do modelo de dano para a análise da resistência do modelo pretendido. A simulação e previsão da resistência das juntas adesivas foi realizada através de um módulo integrado de MDC, na qual irá ser explicado no ponto 3.2.2. As condições da análise numérica são descritas na Tabela 27.

Tabela 27: Condições da análise numérica.

Módulo “Part”

No módulo “Part” foi feito o desenho dos limites exteriores e divisão em partições das juntas. Todas as alterações geométricas dos aderentes foram realizadas neste módulo. As figuras seguintes mostram os modelos das juntas para os quatro L_0 .



Módulo "Property"

Este módulo permite a criação de materiais e secções, e a atribuição das secções a corpos ou a partições de corpos criados no módulo "Part".

Como exemplo, as figuras seguintes mostram a definição das propriedades mecânicas para o alumínio AW 6082-T651 e para o adesivo Araldite® AV138. O mesmo se aplica para os restantes adesivos.

Araldite® AV138

The figure displays four screenshots of the 'Edit Material' software interface for Araldite AV138, showing the configuration of mechanical properties.

Top-Left Screenshot: Elastic Properties

Material Behaviors: Quads Damage, Damage Evolution, Damage Stabilization Cohesive, **Elastic**

General | Mechanical | Thermal | Electrical/Magnetic | Other

Elastic Type: Traction

Use temperature-dependent data:

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

No compression: No tension:

	E/Enn	G1/Ess	G2/Ett
1	4890	1560	1560

Top-Right Screenshot: Quads Damage Properties

Material Behaviors: **Quads Damage**, Damage Evolution, Damage Stabilization Cohesive, Elastic

General | Mechanical | Thermal | Electrical/Magnetic | Other

Quads Damage Direction relative to local 1-direction (for XFEM): Normal Parallel

Tolerance: 0.05

Position: Centroid

Use temperature-dependent data:

Number of field variables: 0

	Nominal Stress Normal-only Mode	Nominal Stress First Direction	Nominal Stress Second Direction
1	39.45	30.2	30.2

Bottom-Left Screenshot: Suboption Editor - Damage Evolution

Damage Evolution Type: Energy

Softening: Linear

Degradation: Maximum

Mixed mode behavior: Power Law

Mode mix ratio: Energy

Power: 1

Use temperature-dependent data:

Number of field variables: 0

	Normal Mode Fracture Energy	Shear Mode Fracture Energy First Direction	Shear Mode Fracture Energy Second Direction
1	0.2	0.38	0.38

Bottom-Right Screenshot: Damage Stabilization Cohesive Properties

Material Behaviors: Quads Damage, Damage Evolution, **Damage Stabilization Cohesive**, Elastic

General | Mechanical | Thermal | Electrical/Magnetic | Other

Quads Damage Direction relative to local 1-direction (for XFEM): Normal Parallel

Tolerance: 0.05

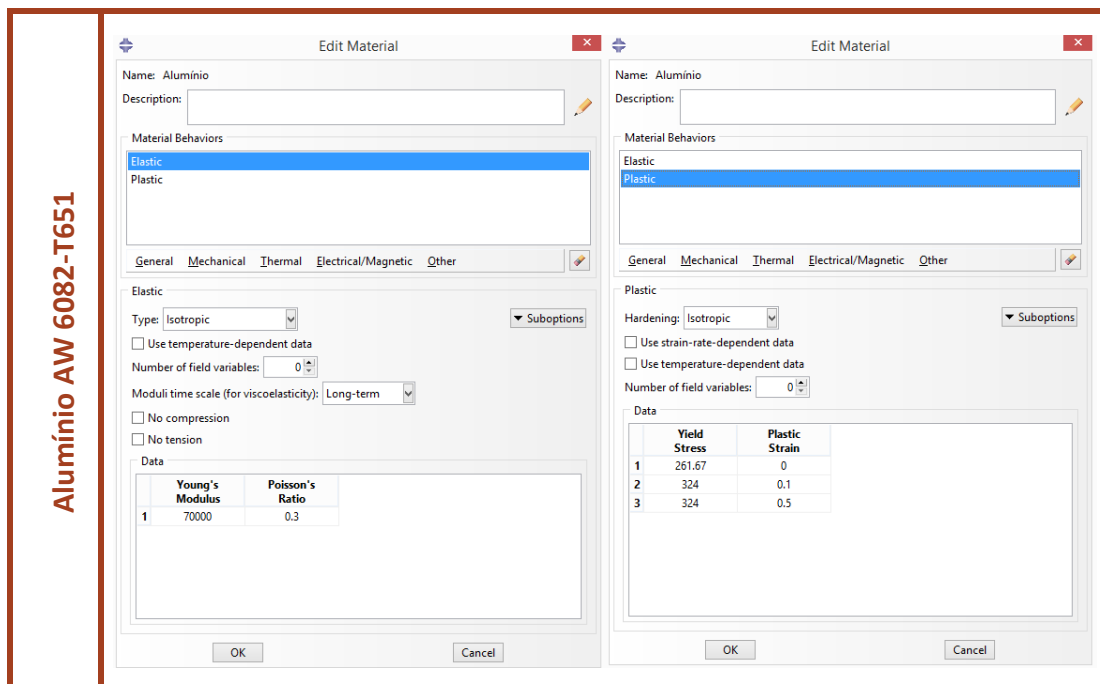
Position: Centroid

Use temperature-dependent data:

Number of field variables: 0

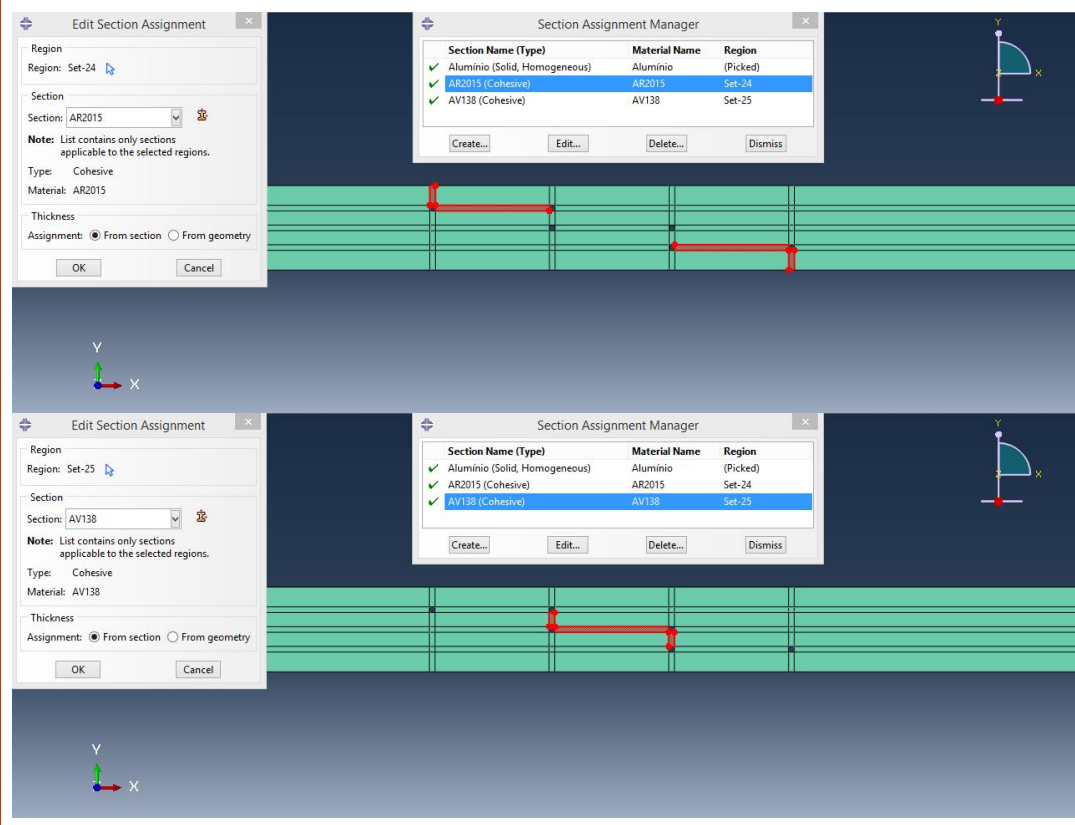
	Nominal Stress Normal-only Mode	Nominal Stress First Direction	Nominal Stress Second Direction
1	39.45	30.2	30.2

Suboption Editor: Damage Stabilization Cohesive Viscosity coefficient: 5E-005

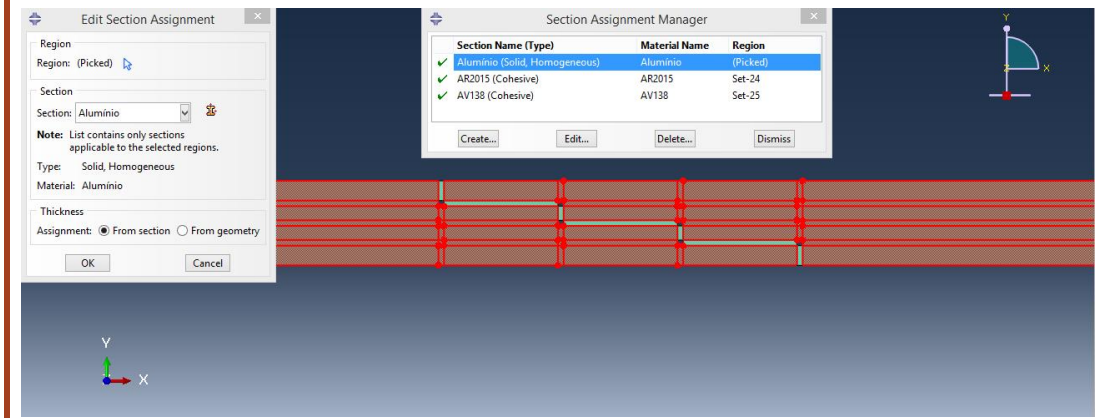


Concluída esta etapa, é necessária a atribuição das propriedades às partições da junta. Para os adesivos foi atribuída uma secção do tipo coesiva e para os aderentes uma secção do tipo sólido homogéneo.

Atribuição da secção do tipo coesiva para os adesivos.



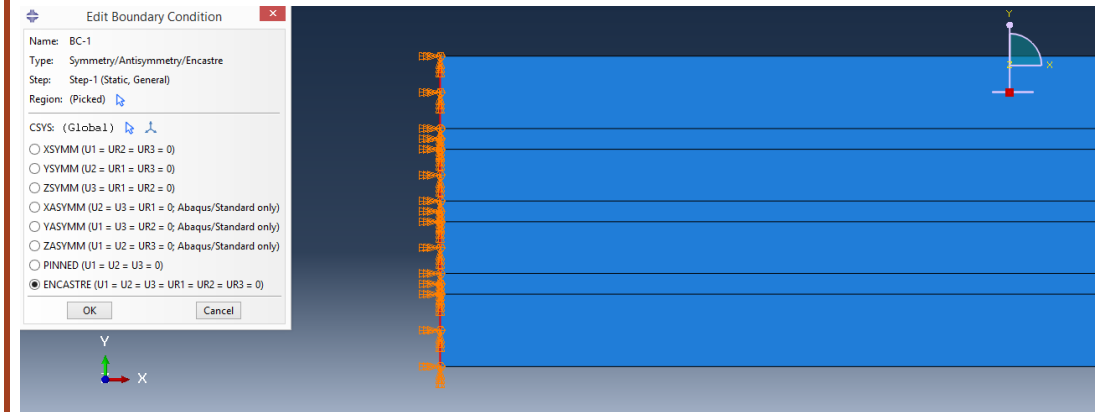
Atribuição da secção do tipo sólido homogéneo para os aderentes.



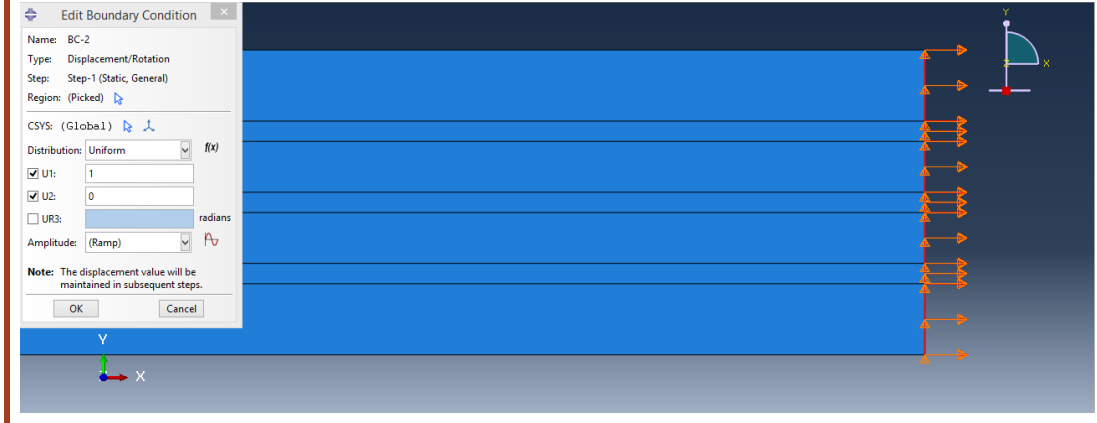
Módulo "Load"

O módulo "Load" permite aplicação das condições fronteira dos modelos. Foi aplicada a condição de encastramento numa das faces dos aderentes e a condição de deslocamento na face oposta.

Condição de encastramento (U1:direção x, U2:direção y, U3:direção z).

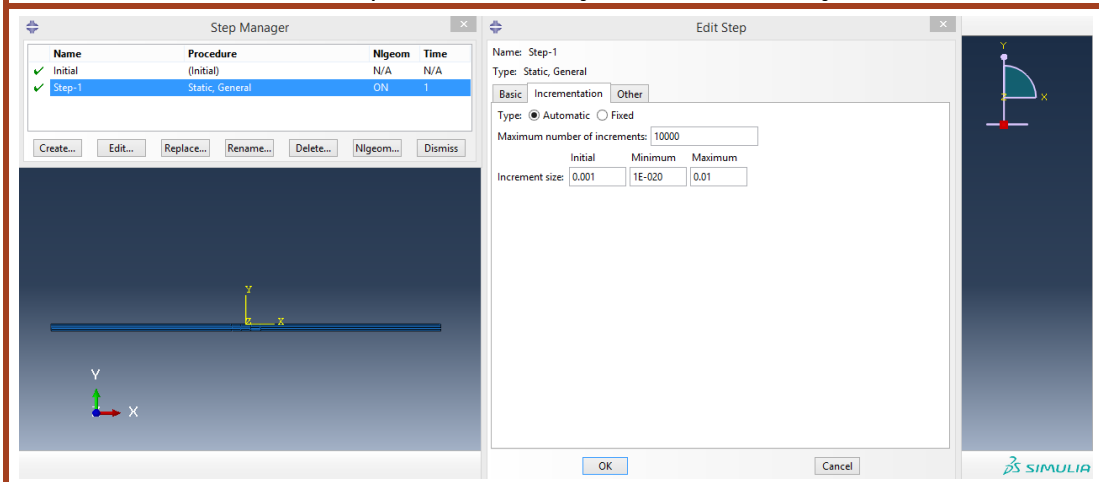


Condição de deslocamento (U1:direção x, U2:direção y).



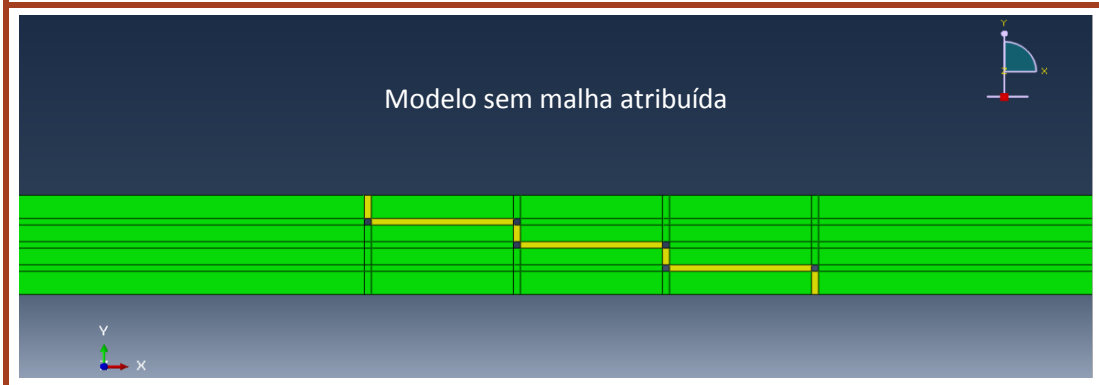
Módulo “Step”

No módulo “Step” são definidas as condições da análise, como o tipo de análise (estática, dinâmica, térmica, entre outras), a incrementação e o método de análise. Um dos fatores a ter em conta na construção dos modelos é o número de máximo de incrementos que o modelo pode atingir e os seus limites. Na definição da incrementação do modelo é necessário atribuir um limite mínimo e máximo. O limite mínimo permite ao *software* reduzir o tamanho do incremento no caso de se resistirem problemas de convergência na zona de propagação do dano. O limite superior assegura que o tamanho do incremento não ultrapassa um valor limite estabelecido. Este módulo permite a definição da incrementação do modelo [68].



Módulo “Mesh”

Para a simulação é necessária a atribuição de uma malha ao modelo, definida pelo módulo “Mesh”. A malha é usada na divisão do modelo num número finito de elementos. Existem vários factores que devem ser considerados na preparação da malha de uma junta adesiva, como o tipo de elemento e a densidade da malha. A escolha dos elementos tem um efeito muito importante nos resultados finais. Cada tipo de elemento tem vantagens e desvantagens, dependendo da aplicação [2, 68]. Para cada material foi atribuída uma tipologia de malha, “Sweep” para os adesivos e “Structured” para os aderentes. Na malha foram usados elementos quadriláteros com 0,2 mm de lado.



The figure consists of four vertically stacked screenshots illustrating the meshing process for a stepped adhesive joint model. Each screenshot shows a portion of the software interface and a 2D cross-section of the model.

- Top Screenshot:** The "Mesh Controls" dialog box is shown with "Element Shape" set to "Quad" and "Technique" set to "Sweep". The text "Atribuição do elemento de forma 'Sweep' para os adesivos" (Assignment of the 'Sweep' element shape for the adhesives) is displayed. The model shows a green adhesive layer with a red sweep path.
- Second Screenshot:** The "Mesh Controls" dialog box is shown with "Element Shape" set to "Quad" and "Technique" set to "Structured". The "Algorithm Options" section has "Minimize the mesh transition" checked. The text "Atribuição do elemento de forma 'Structured' para os aderentes" (Assignment of the 'Structured' element shape for the adherents) is displayed. The model shows a brown adherent layer with a red structured grid.
- Third Screenshot:** The "Global Seeds" dialog box is shown with "Sizing Controls" set to "Approximate global size: 0.2". The "Curvature control" section has "Maximum deviation factor" set to 0.1. The "Minimum size control" section has "By fraction of global size" selected with a value of 0.1. The text "Definição do tamanho das 'sementes'" (Definition of the size of the 'seeds') is displayed. The model shows a green adhesive layer with yellow seeds.
- Bottom Screenshot:** The final meshed model is shown with a cyan quadrilateral mesh. The text "Modelo com malha atribuída" (Model with assigned mesh) is displayed.

3.2.2 Modelo de dano utilizado

3.2.2.1 Modelo de dano coesivo

Os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subseqüentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura [69].

3.2.2.2 Modelo de dano triangular

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas, de forma a obter resultados mais precisos [70]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [71], linear parabólico [72], exponencial [73], polinomial [74] e trapezoidal [75]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [76]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 51, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

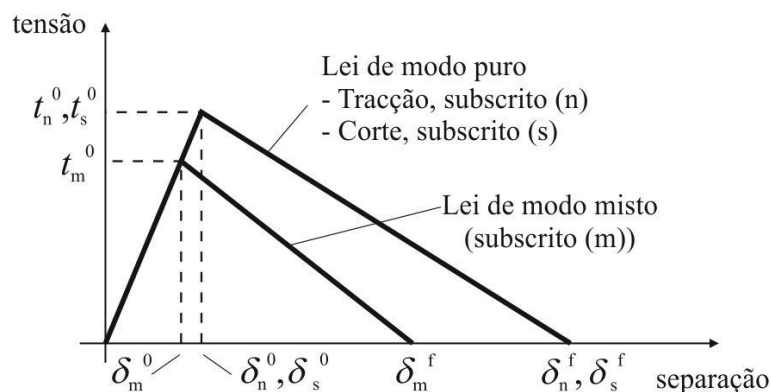


Figura 51: Lei triangular do MDC [31].

Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores de tensão são anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões energéticas para combinar a tensão e corte [77]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de tração e outra de corte, que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz \mathbf{K}_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte nos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

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

onde t_n e t_s são as tensões coesivas atuais à tração e ao corte, respetivamente, ε_n e ε_s representam as deformações de tração e corte, respetivamente. Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja usada uma formulação local, esta permite simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [78]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

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

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Com a inclusão destes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [77]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão:

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

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [79]. Quando a resistência coesiva em modo misto (t_m^0) é atingida (Figura 51), pela igualdade da equação anterior, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 51) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} :

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

3.2.3 Determinação das propriedades de dano

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios de tração [80, 81]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [82-84]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição

destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

3.2.3.1 Araldite® AV138

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [85]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente ao mais indicado, e foi utilizado para o adesivo Araldite® 2015, conforme se exemplificará de seguida. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de tração e de corte (*thick-adherend shear test* (TAST)), respetivamente, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (JSS com $L_0=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente com ensaios de tração e ensaios de corte (TAST). No trabalho referido [86] concluiu-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. A Tabela 28 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto [86].

3.2.3.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, as leis coesivas da camada de adesivo Araldite® 2015 foram determinadas num trabalho anterior [85] por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Num estudo anterior [87], é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios *double-cantilever beam* (DCB) e *end-notched flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 e t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 e t_s^0 é então definido pela utilização de um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 28 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei

coesiva em modo misto [87]. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [88] e ensaios TAST, respetivamente [89].

3.2.3.3 Sikaforce® 7752

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo distinto. Para a determinação da lei coesiva ao corte, seguiu-se um método inverso, correspondente à determinação do valor de G_{IIC} por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [63]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de t_s^0 e G_{IIC} obtidos na referência [63], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de G_{IC} foi obtido por ensaios de fratura DCB [90], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [91]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular da sollicitação à tração, o valor de t_n^0 não tem influência digna de registo para variações de t_n^0 até 25% do valor obtido por método inverso (variação para os 2 sentidos) [91], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [67]. A Tabela 28 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto [63].

Tabela 28: Parâmetros coesivos em tração e corte para as camadas dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, com $t_A=0,2$ mm [63, 86, 87].

Parâmetros\Adesivos	Araldite® AV138	Araldite® 2015	Sikaforce® 7752
E [MPa]	4890	1850	1890
G [MPa]	1560	650	727
t_n^0 [MPa]	39,45	21,63	28,60
t_s^0 [MPa]	30,2	17,9	20
G_{IC} [N/mm]	0,2	0,43	1,18
G_{IIC} [N/mm]	0,38	4,7	8,72

3.2.4 Análise de tensões nas juntas

As distribuições de tensões numa junta adesiva raramente são uniformes. As concentrações de tensões são muitas vezes inesperadas e podem determinar a máxima resistência da junta. As tensões de arrancamento e de clivagem são o principal inimigo das juntas adesivas. A clivagem é definida como a tensão que ocorre quando forças nas extremidades de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos. As tensões de arrancamento são semelhantes às de clivagem, mas aplicam-se no caso onde um ou ambos os substratos serem flexíveis. As juntas sob clivagem ou arrancamento são muito menos resistentes do que aquelas sujeitas ao corte, porque esta tensão está concentrada numa área muito pequena. As extremidades das juntas apresentam as maiores tensões. Os adesivos frágeis e dúcteis são particularmente sensíveis às forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões mais uniforme, o que origina uma maior resistência na ligação. As tensões de corte aparecem quando forças aplicadas no plano do adesivo tendem a separar os substratos. As juntas adesivas são geralmente mais resistentes quando solicitadas ao corte, uma vez que toda a área com adesivo contribui e é relativamente fácil manter os substratos alinhados. A distribuição de tensões depende da rigidez do adesivo e dos substratos [2].

Na análise de tensões nas juntas, foram consideradas as distribuições das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}), normalizadas pela média dos valores da tensão de corte ($\tau_{\text{médio}}$) do L_0 respetivo, ou seja, $\sigma_y/\tau_{\text{médio}}$ e $\tau_{xy}/\tau_{\text{médio}}$. Também foi necessário proceder à normalização de L_0 , ou seja, x/L_0 em que x representa a posição da tensão normalizada (Figura 52). Estas distribuições de tensões são obtidas no plano médio da espessura do adesivo, uma vez que as distribuições de tensões neste plano são simétricas. Outro dos motivos é a ocorrência da rotura ideal. O estudo destas tensões é realizado no estágio inicial de carregamento, correspondente ao domínio elástico dos adesivos e dos aderentes.

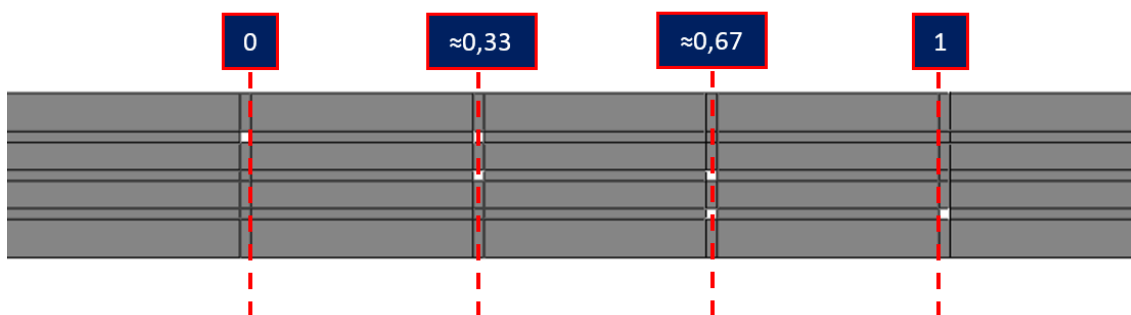


Figura 52: Esquema representativo da normalização de L_0 para as juntas em degrau.

3.2.4.1 Tensões de arrancamento

A análise das tensões σ_y consiste no estudo de $\sigma_y/\tau_{\text{médio}}$ em função de x/L_o ($0 \leq L_o \leq 1$). Da Figura 53 à Figura 55 são apresentadas as distribuições de tensões σ_y obtidas a meio da espessura da camada adesiva em função de L_o , para as três configurações de adesivos.

Configuração 1: Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015

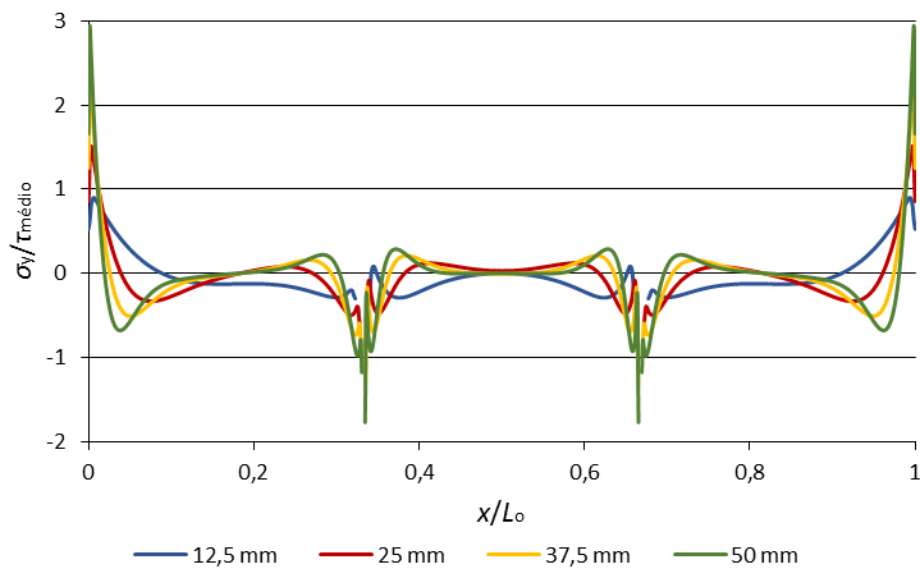


Figura 53: Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 em função de L_o .

Configuração 2: Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752

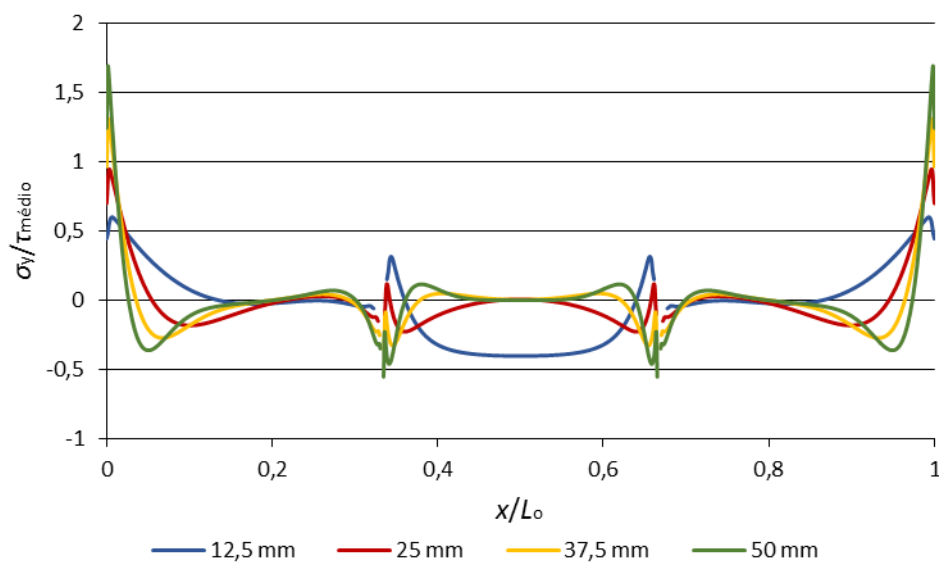


Figura 54: Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 em função de L_o .

Configuração 3: Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752

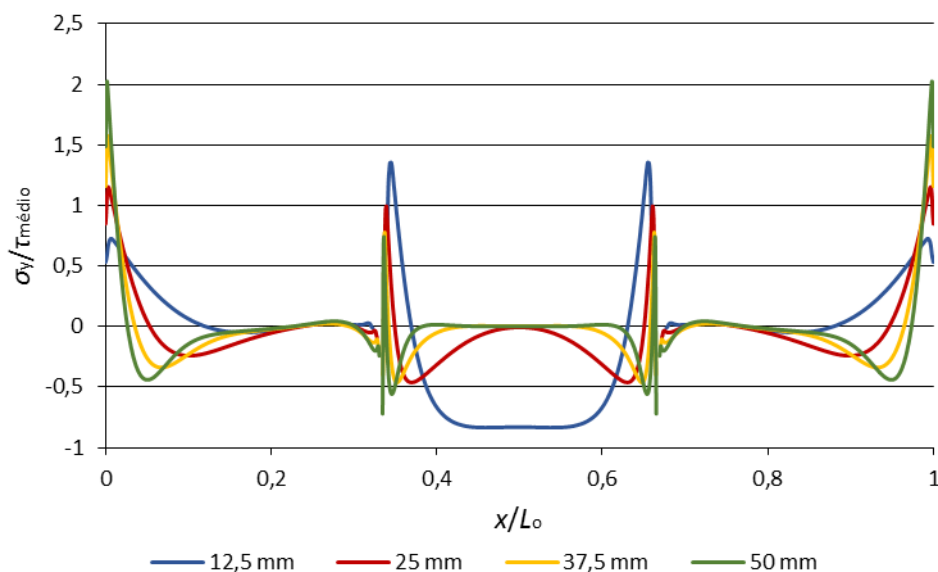


Figura 55: Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 em função de L_0 .

Desde já constata-se que, independentemente de L_0 , a tensão σ_y é bastante inferior à tensão $\tau_{\text{médio}}$, exceto nas extremidades dos degraus e nas transições entre degraus. Os picos de concentrações de tensões estão localizados nas extremidades das juntas ($x/L_0=0$ e $x/L_0=1$) e nas transições entre degraus ($x/L_0 \approx 0,33$ e $x/L_0 \approx 0,67$). Verifica-se também que os picos de tensão nas extremidades das juntas encontram-se à tração, e nas transições entre degraus à compressão e à tração. Tal como nas JSS, os picos de tensões mais elevados localizam-se nas extremidades das juntas. Estes picos de tensão originam um momento fletor que promove o arrancamento das extremidades, juntamente com fenómenos de compressão na região central da ligação [24, 92].

Também se verifica que o aumento de L_0 provoca o aumento dos picos de tensão tanto à tração como à compressão, uma vez que o aumento da área da ligação faz com que seja necessária uma maior força aplicada para a rotura da ligação.

A escolha do tipo de adesivo também influencia os picos de tensão da ligação. A Figura 55, quando comparada com a Figura 53, mostra que a utilização de um adesivo de ductilidade elevada nos degraus exteriores, como o adesivo Sikaforce® 7752, reduz os picos de tensão nas extremidades da ligação, uma vez que permite um efeito acentuado de plastificação sem rotura nas extremidades do adesivo durante o carregamento progressivo da junta, permitindo uma maior resistência da ligação. A Figura 54, quando comparada com a Figura 55, mostra que a utilização de um adesivo frágil no centro da junta, como o adesivo Araldite® AV138, promove o aumento dos picos de tensão nas transições entre degraus, devido à elevada rigidez e à inexistente capacidade de plastificação deste adesivo.

3.2.4.2 Tensões de corte

A análise das tensões τ_{xy} consiste no estudo de $\tau_{xy}/\tau_{m\u00e9dio}$ em fun\u00e7\u00e3o de x/L_0 ($0 \leq L_0 \leq 1$). Da Figura 56 \u00e0 Figura 58 s\u00e3o apresentadas as distribui\u00e7\u00f5es de tens\u00f5es τ_{xy} obtidas a meio da espessura da camada adesiva em fun\u00e7\u00e3o de L_0 , para as tr\u00eas configura\u00e7\u00f5es de adesivos.

Configura\u00e7\u00e3o 1: Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015

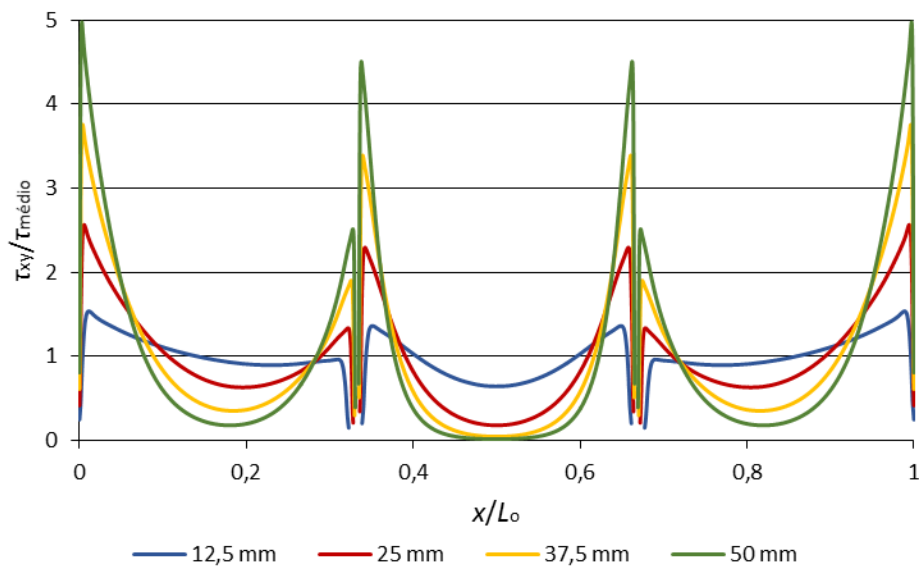


Figura 56: Distribui\u00e7\u00e3o de tens\u00f5es τ_{xy} para a configura\u00e7\u00e3o de adesivos Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015 em fun\u00e7\u00e3o de L_0 .

Configura\u00e7\u00e3o 2: Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752

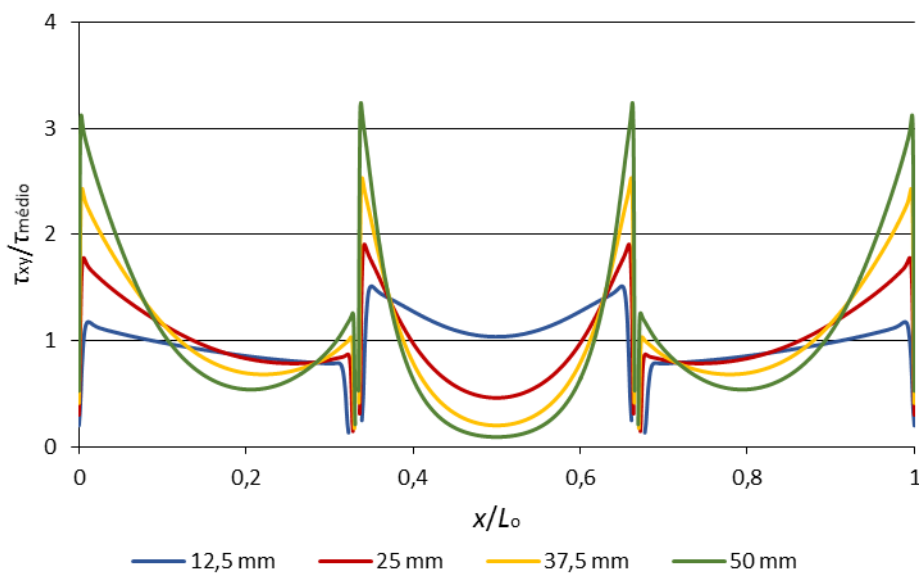


Figura 57: Distribui\u00e7\u00e3o de tens\u00f5es τ_{xy} para a configura\u00e7\u00e3o de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752 em fun\u00e7\u00e3o de L_0 .

Configuração 3: Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752

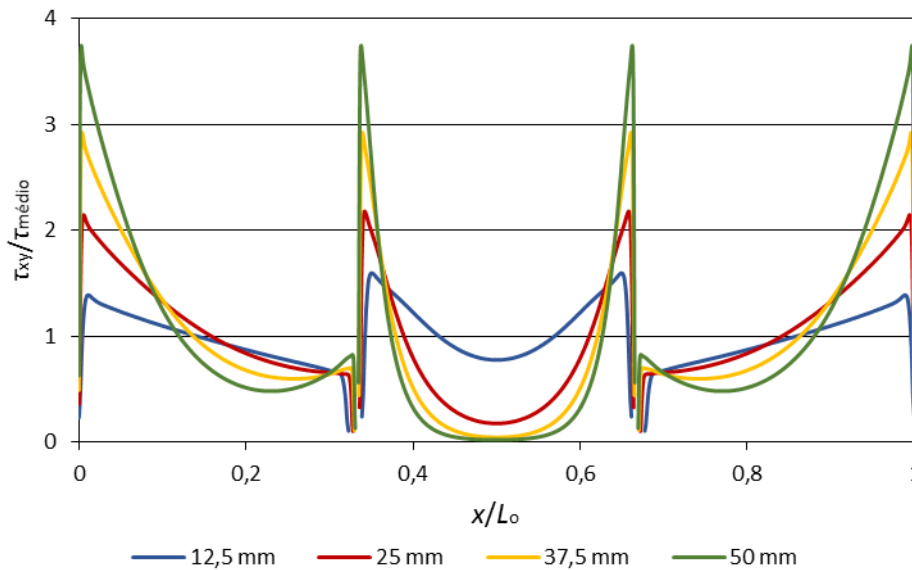


Figura 58: Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 em função de L_0 .

As figuras anteriores mostram que as distribuições de tensões τ_{xy} variam significativamente em cada um dos três degraus. Tal como nas JSS, os picos de tensões são mais elevados nas extremidades da sobreposição. Estas distribuições de tensões ocorrem devido à deformação axial variável dos aderentes em cada degrau. Esta deformação torna-se menor na direção da redução da espessura dos aderentes induzidos pelos degraus. A sobreposição de dois aderentes em degrau com deformações axiais opostas resulta em picos de tensão τ_{xy} nas extremidades da ligação. Nas transições entre degraus, os dois degraus externos apresentam menores picos de tensão τ_{xy} do que o degrau interno, embora essa variação não seja muito acentuada.

Também se verifica que o aumento de L_0 promove o aumento dos picos de tensão τ_{xy} , essencialmente devido ao aumento dos gradientes de deformação axial nos aderentes dentro de cada degrau para $L_0=50$ mm. Caso seja utilizado um adesivo frágil, estas alterações nas tensões ao longo da ligação podem afetar severamente o desempenho da ligação. A falha pode ocorrer quando for atingido $P_{\text{máx}}$ no ponto mais carregado do comprimento de ligação, ponto este que se situa nas extremidades da ligação. Caso seja utilizado um adesivo dúctil, estes fenómenos deixam de ser críticos, devido à elevada capacidade de plastificação destes adesivos quando atingidas as tensões de pico.

A comparação da Figura 56 com a Figura 58 mostra que a utilização de um adesivo de ductilidade elevada nos dois degraus externos, neste caso o adesivo Sikaforce® 7752, reduz os picos de tensão τ_{xy} nas extremidades dos três degraus. A comparação da Figura 57 com a Figura 58 mostra que a utilização do adesivo Araldite® AV138 no centro da junta promove o aumento dos picos de tensão τ_{xy} nas extremidades dos três degraus, também devido à elevada rigidez e à inexistente capacidade de plastificação deste adesivo.

3.2.5 Estudo da variável de dano

Este subcapítulo destina-se ao estudo da variável de dano, também conhecida como *Stiffness degradation* (SDEG), dos elementos coesivos que modelam o adesivo. No ponto 3.2.5.1 é apresentado o dano para força máxima das três configurações de adesivo. O ponto 3.2.5.2 destina-se ao estudo da evolução do dano durante o carregamento das juntas.

A variável de dano permite o estudo dos fenómenos de degradação das juntas adesivas nas diversas fases do seu carregamento, a partir dos MDC implementados em técnicas de EF. Os valores de SDEG variam entre 0 e 1. Valores de SDEG=0 indicam que os elementos coesivos, neste caso do adesivo, não sofreram qualquer degradação, ou seja, o adesivo não sofreu qualquer dano. Em contrapartida, valores de SDEG=1 indicam que os elementos coesivos sofreram degradação máxima, ou seja, o adesivo sofreu rotura. Para valores de $0 < \text{SDEG} < 1$ os elementos coesivos encontram-se em fase de degradação.

3.2.5.1 Dano para força máxima

O dano para força máxima consiste no instante em que a variável de dano SDEG atinge $P_{\text{máx}}$. Estes dados permitem identificar o dano ocorrido na ligação no instante em que é atingida o valor de $P_{\text{máx}}$ sustentado pela junta. O dano ocorrido para as três configurações de adesivos em estudo é mostrado na Figura 59, Figura 60 e Figura 61.

Configuração 1: Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015

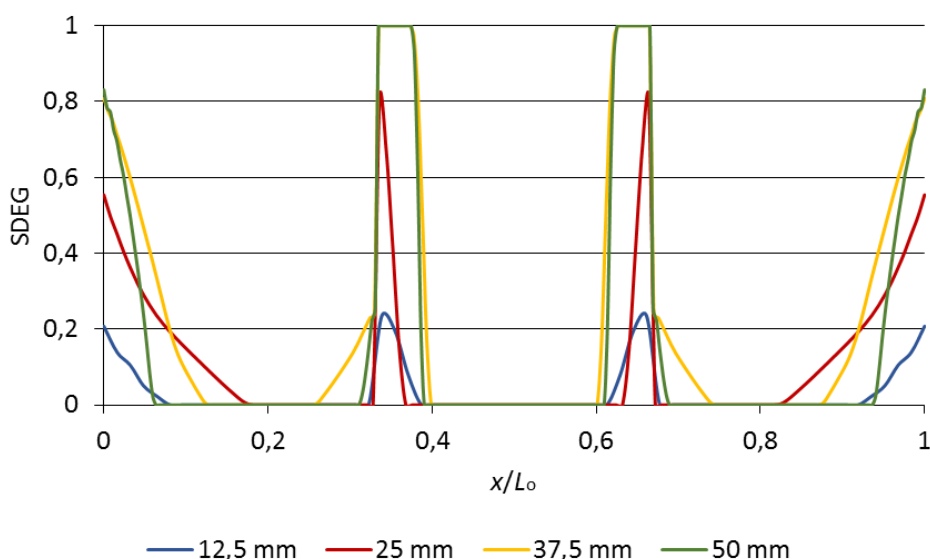


Figura 59: Estudo da variável de dano SDEG em função de L_0 , no instante de $P_{\text{máx}}$, para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015.

Configuração 2: Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752

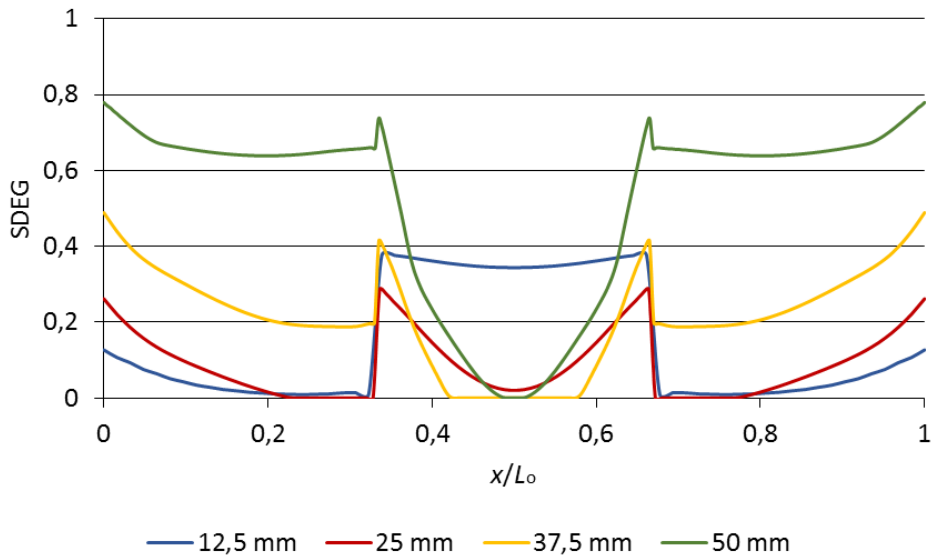


Figura 60: Estudo da variável de dano SDEG em função de L_0 , no instante de P_{\max} , para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752.

Configuração 3: Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752

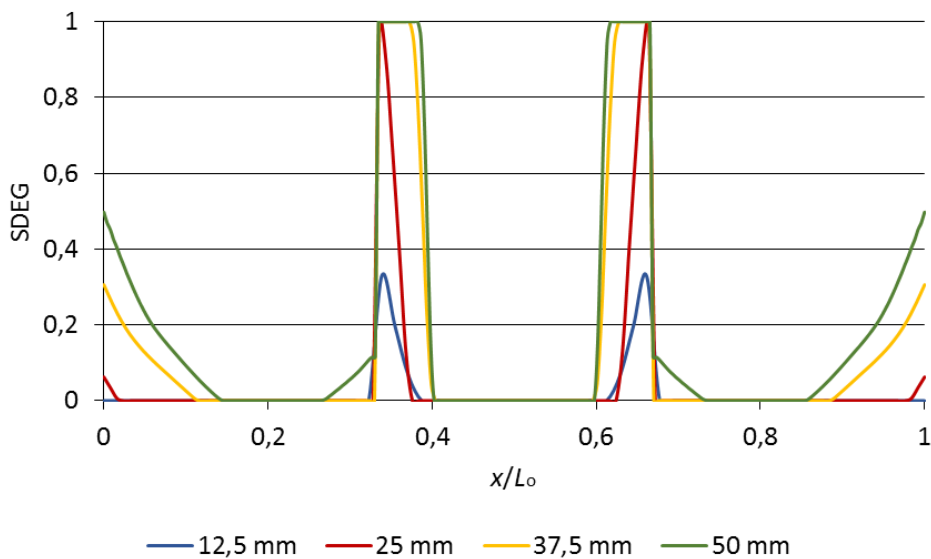


Figura 61: Estudo da variável de dano SDEG em função de L_0 , no instante de P_{\max} , para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752.

A análise da Figura 59 mostra que o aumento de L_0 promove o aumento significativo do dano. Verifica-se a existência de picos de dano elevados nas extremidades das juntas, devido aos esforços de arrancamento, e nos degraus interiores. Também se observa rotura (SDEG=1) no degrau interior no instante de P_{\max} para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm. As

transições abruptas do dano entre degraus estão relacionadas com a falta de capacidade de plastificação do adesivo Araldite® AV138.

Os degraus compostos pelo adesivo Araldite® 2015 revelam menor dano do que o degrau composto pelo adesivo Araldite® AV138. Este efeito está relacionado com a ductilidade do adesivo. O aumento da ductilidade do adesivo faz com que a camada adesiva sofra deformações plásticas significativas antes da rotura completa da ligação, promovendo a uma suavização da evolução do dano. Este facto é visível nas extremidades das juntas. Esta análise indica que o aumento de L_o se traduz numa degradação do estado de tensão e de dano, na medida em que estes apresentam gradientes cada vez maiores nas zonas críticas, o que pode indicar um aumento reduzido de $P_{m\acute{a}x}$ com L_o , especialmente tratando de uma junta com um adesivo frágil.

A Figura 60 mostra que a utilização de dois adesivos com capacidade de plastificação, neste caso o adesivo Araldite® 2015 e o adesivo Sikaforce® 7752, reduz significativamente o dano. Os valores de $0 < SDEG < 1$ indicam que os adesivos não sofreram rotura completa no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em nenhuma zona da junta. Tal como no caso anterior, as extremidades das juntas e os degraus interiores continuam a apresentar picos de dano elevados. Verifica-se que, para $L_o=12,5$ mm, ocorreu uma maior rotura do adesivo aplicado no degrau interior do que os adesivos aplicados nos degraus exteriores, uma vez que o adesivo aplicado nos degraus exteriores não chegou a ser solicitado. Com o aumento de L_o , os adesivos aplicados nos degraus exteriores passam a ser solicitados, reduzindo o dano no degrau interior, promovendo o aumento da resistência da ligação.

Tal como na Figura 59, a Figura 61 mostra que o adesivo Araldite® AV138 sofreu rotura completa nas transições entre degraus para $L_o=25$ mm, $L_o=37,5$ mm e $L_o=50$ mm. Os picos de dano mais elevados continuam a situar-se no degrau interior. Nesta configuração de adesivos, a utilização do adesivo Sikaforce® 7752 diminuiu significativamente o dano nas extremidades da ligação, sendo esta a configuração de adesivos com menor dano verificado nas extremidades. Também é constatado que o aumento de L_o promove o aumento do dano, tanto no degrau interior como nos degraus exteriores. O aumento de L_o traduz-se numa degradação do estado de tensão e de dano, uma vez que estes apresentam gradientes cada vez maiores nas zonas críticas, promovendo um aumento reduzido de $P_{m\acute{a}x}$ com L_o , fenómeno característico de uma junta com um adesivo frágil.

Em suma, o aumento de L_o promove o aumento do dano, nomeadamente nos degraus interiores, devido essencialmente à concentração de tensões. Os picos de dano mais elevados localizam-se sobretudo no degrau interior e nas extremidades da ligação. Estes feitos devem-se ao aumento combinado das tensões σ_y e dos efeitos da deformação diferencial dos aderentes. As características dos adesivos também influenciam o dano. Os adesivos mais frágeis apresentam maior dano, devido à sua falta de capacidade de plastificação, o que se traduz numa perda de resistência da ligação.

3.2.5.2 Evolução do dano com o carregamento aplicado

A evolução do dano com o carregamento aplicado pode ser observado através da representação gráfica das curvas SDEG para diferentes rácios de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ [%], onde δ representa o deslocamento para um dado incremento e $\delta P_{\text{máx}}$ o deslocamento correspondente a $P_{\text{máx}}$. O rácio $\delta/\delta P_{\text{máx}}=100\%$ corresponde ao dano para $P_{\text{máx}}$.

De forma a simplificar este estudo, foi feita apenas a análise para $L_o=12,5$ mm e $L_o=50$ mm. Para os restantes L_o , os valores da evolução do dano com o carregamento aplicado encontram-se dentro intervalo $12,5 \text{ mm} < L_o < 50 \text{ mm}$. Da Figura 62 à Figura 64 encontra-se representada a evolução do dano com o carregamento aplicado para as três configurações de adesivos e para $L_o=12,5$ mm e $L_o=50$ mm.

A Figura 62 mostra que o aumento de L_o promove significativamente a evolução do dano. Para ambos os casos ($L_o=12,5$ mm e $L_o=50$ mm), o dano iniciou-se pelas extremidades das juntas ($\delta/\delta P_{\text{máx}}=91\%$ para $L_o=12,5$ mm e $\delta/\delta P_{\text{máx}}=62\%$ para $L_o=50$ mm) pelo adesivo Araldite® 2015, e prolongou-se até ao degrau interior. Para $L_o=12,5$ mm foi verificado um aumento significativo dos valores do pico de dano do degrau interior após ser atingido $P_{\text{máx}}$, nomeadamente para $\delta/\delta P_{\text{máx}}=100,09\%$. O dano máximo da ligação foi atingido para $\delta/\delta P_{\text{máx}}=248\%$.

Para $L_o=50$ mm, os picos de dano máximo ocorrem no degrau interior após ser atingido $P_{\text{máx}}$, e prolongam-se até à rotura total do adesivo Araldite® AV138. No entanto, o dano ocorrido nos degraus exteriores foi menor, devido essencialmente ao aparecimento de fenómenos de plastificação dos aderentes. Por este motivo, a curva de evolução do dano para $\delta/\delta P_{\text{máx}}=840\%$ nunca atinge na sua totalidade o dano máximo (SDEG=1). Verifica-se também que a antecipação da iniciação do dano é mais crítica para $L_o=50$ mm ($\delta/\delta P_{\text{máx}}=91\%$ para $L_o=12,5$ mm e $\delta/\delta P_{\text{máx}}=62\%$ para $L_o=50$ mm).

A análise da Figura 63 mostra que, na configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752, para $L_o=12,5$ mm o dano iniciou-se no degrau interior, ou seja, iniciou-se pelo adesivo Araldite® 2015 ($\delta/\delta P_{\text{máx}}=84\%$), evoluindo de uma forma constante. Nas extremidades da junta foi registado um menor dano devido essencialmente à ductilidade elevada do adesivo Sikaforce® 7752. A combinação destes dois adesivos fez com que a rotura total da ligação ocorresse para $\delta/\delta P_{\text{máx}}=1029\%$, o que indica que adesivos com elevada ductilidade promovem deslocamentos até à rotura mais elevados.

Para $L_o=50$ mm o dano também iniciou-se nas extremidades das juntas passando posteriormente para o degrau interior ($\delta/\delta P_{\text{máx}}=76\%$). O dano do degrau interior é mais acentuado para $100\% \leq \delta/\delta P_{\text{máx}} \leq 101\%$, e chega ao seu valor máximo para $\delta/\delta P_{\text{máx}}=243\%$. Tal como no caso anterior, a comparação da evolução do dano entre os dois L_o mostra que o aumento de L_o provoca a antecipação da iniciação do dano ($\delta/\delta P_{\text{máx}}=84\%$ para $L_o=12,5$ mm e $\delta/\delta P_{\text{máx}}=76\%$ para $L_o=50$ mm) e uma diminuição do rácio correspondente

ao dano máximo ($\delta/\delta P_{\text{máx}}=1029\%$ para $L_0=12,5$ mm e $\delta/\delta P_{\text{máx}}=243\%$ para $L_0=50$ mm). Este comportamento deve-se ao facto das juntas de L_0 elevado apresentarem maiores concentrações de tensões.

Configuração 1: Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015

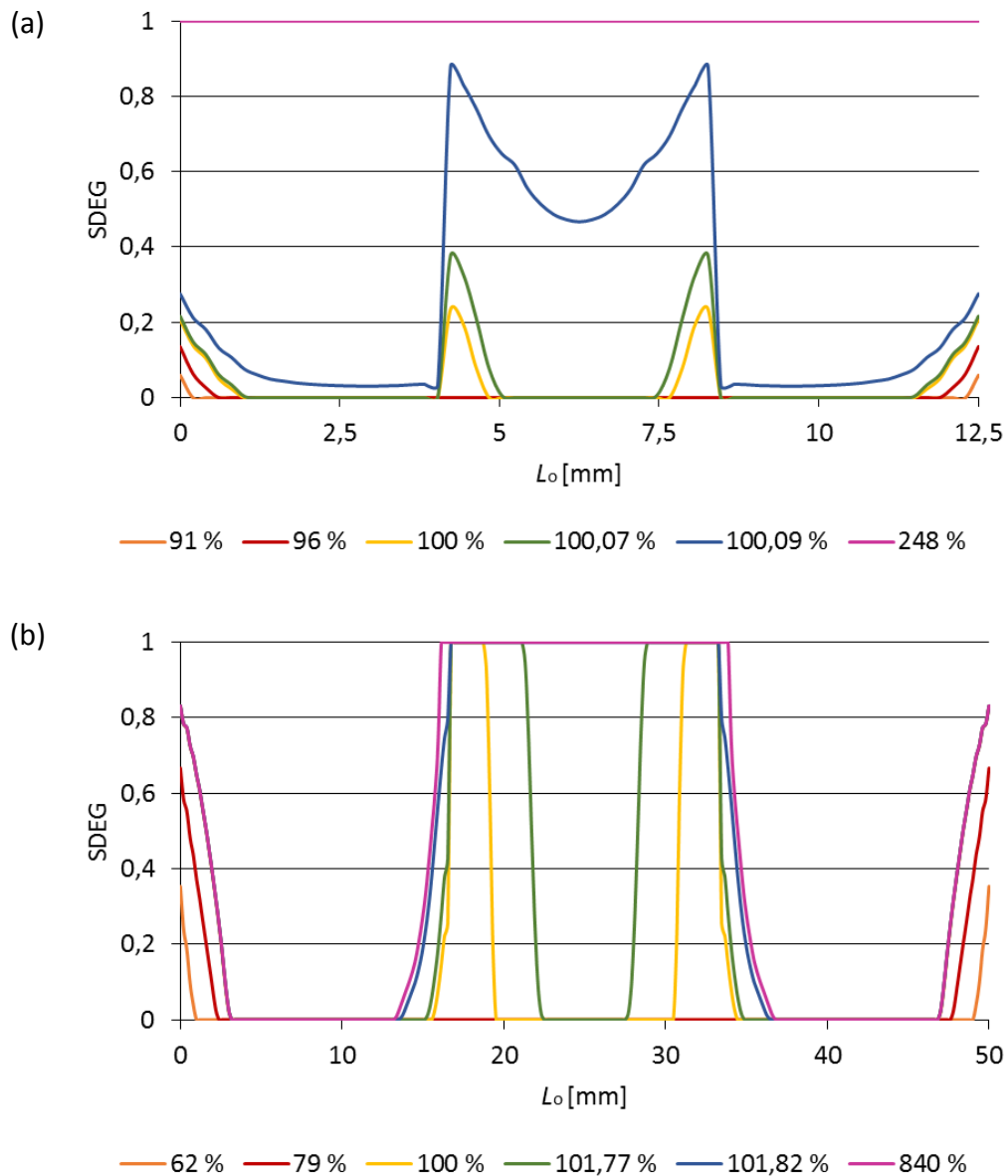


Figura 62: Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015, para (a) $L_0=12,5$ mm e (b) $L_0=50$ mm.

Configuração 2: Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752

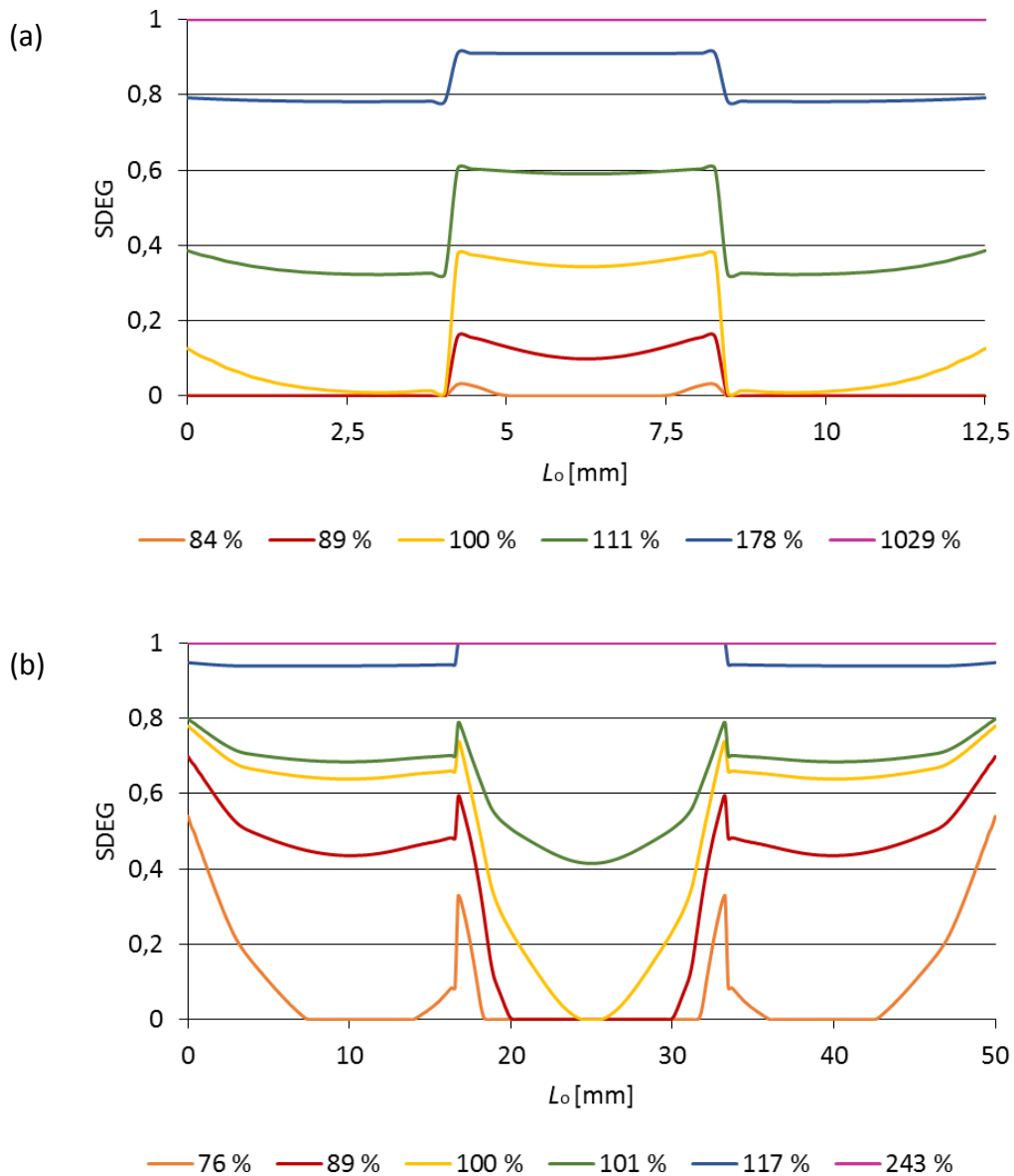


Figura 63: Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752, para (a) $L_o=12,5$ mm e (b) $L_o=50$ mm.

Através da análise da Figura 64 constata-se que a combinação do adesivo Araldite® AV138 com o adesivo Sikaforce® 7752, para $L_o=12,5$ mm, reduz significativamente a ocorrência do dano nas extremidades da junta. Os picos de dano mais elevados localizam-se no degrau interior, devido à fragilidade do adesivo Araldite® AV138. Nesta configuração de adesivos o dano iniciou-se para $\delta/\delta P_{\text{máx}}=97\%$ e atingiu rotura para $\delta/\delta P_{\text{máx}}=1129\%$. A evolução mais acentuada do dano é verificada após $P_{\text{máx}}$, para $100\% \leq \delta/\delta P_{\text{máx}} \leq 101\%$. Para $L_o=50$ mm, as evoluções do dano são mais acentuadas. Os picos máximos do dano ocorreram no degrau interior para $83\% \leq \delta/\delta P_{\text{máx}} \leq 325\%$. Os

degraus exteriores também apresentam maior dano, principalmente nas extremidades da junta. Tal como nos casos anteriores, a comparação da evolução do dano entre os dois L_o mostra que o aumento de L_o provoca a antecipação da iniciação do dano ($\delta/\delta P_{\text{máx}}=97\%$ para $L_o=12,5$ mm e $\delta/\delta P_{\text{máx}}=83\%$ para $L_o=50$ mm) e uma diminuição do rácio correspondente ao dano máximo ($\delta/\delta P_{\text{máx}}=1129\%$ para $L_o=12,5$ mm e $\delta/\delta P_{\text{máx}}=325\%$ para $L_o=50$ mm), devido à maior concentração de tensões nas juntas com L_o elevado.

Configuração 3: Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752

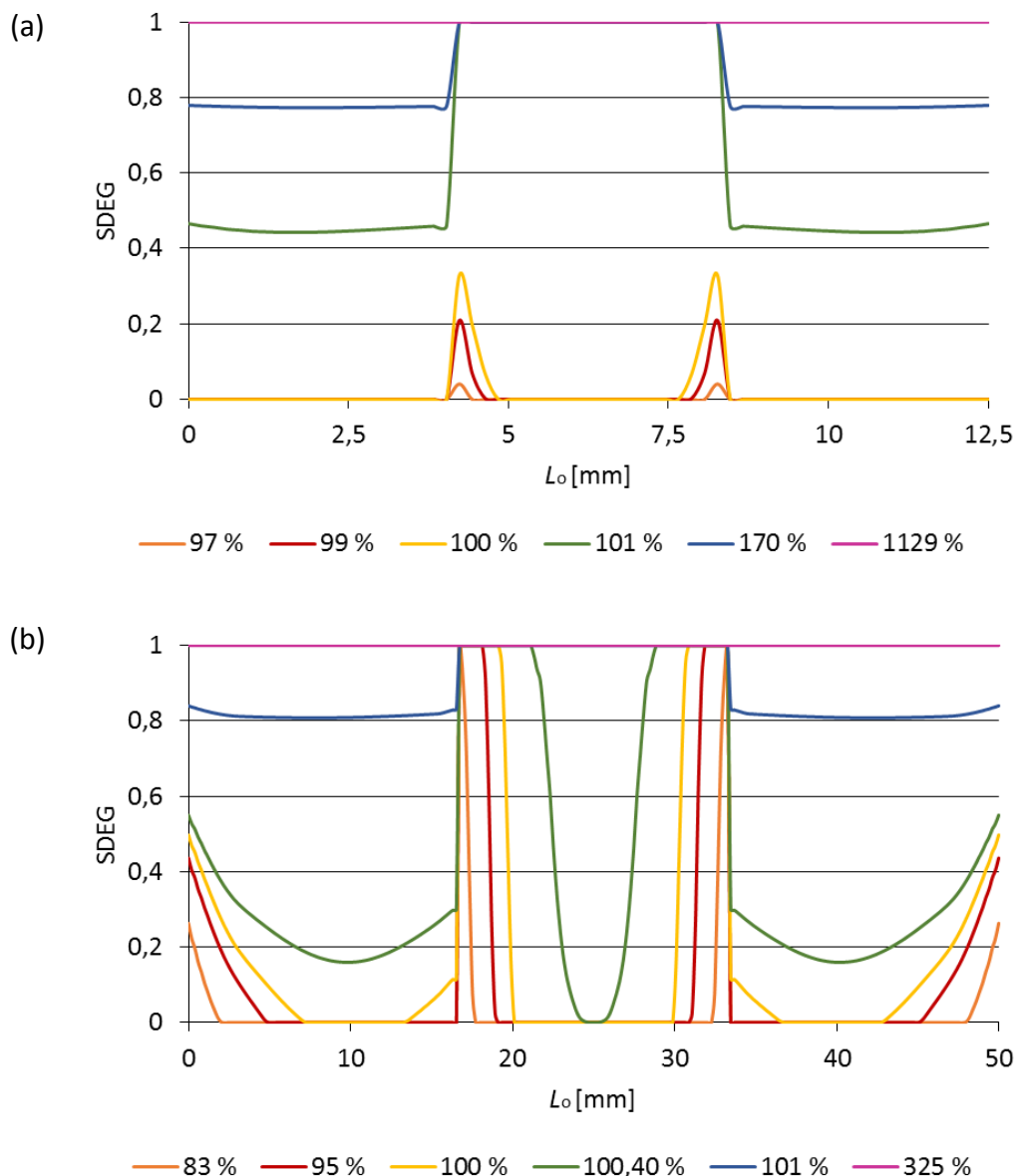


Figura 64: Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta P_{\text{máx}}$ para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752, para (a) $L_o=12,5$ mm e (b) $L_o=50$ mm.

3.2.6 Previsão do comportamento

De forma a avaliar a previsão do comportamento das juntas adesivas em degrau com dois adesivos através dos MDC, foram consideradas as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas, os modos de rotura, a comparação do $P_{\text{máx}}$ numérico com o experimental, e a comparação do $E_{\text{máx}}$ numérico com o experimental.

3.2.6.1 Curvas $P-\delta$

Da Figura 65 à Figura 67 encontram-se representadas as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as três configurações de adesivos. De uma forma geral, os valores $P_{\text{máx}}$ numéricos encontram-se próximos dos experimentais. No entanto, são verificadas variações dos deslocamentos entre os dois trabalhos.

Os deslocamentos até à rotura experimentais são menores do que os deslocamentos até à rotura numéricos, devido essencialmente ao escorregamento dos provetes e a pequenas oscilações da máquina de ensaios durante o carregamento das juntas.

Configuração 1: Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015

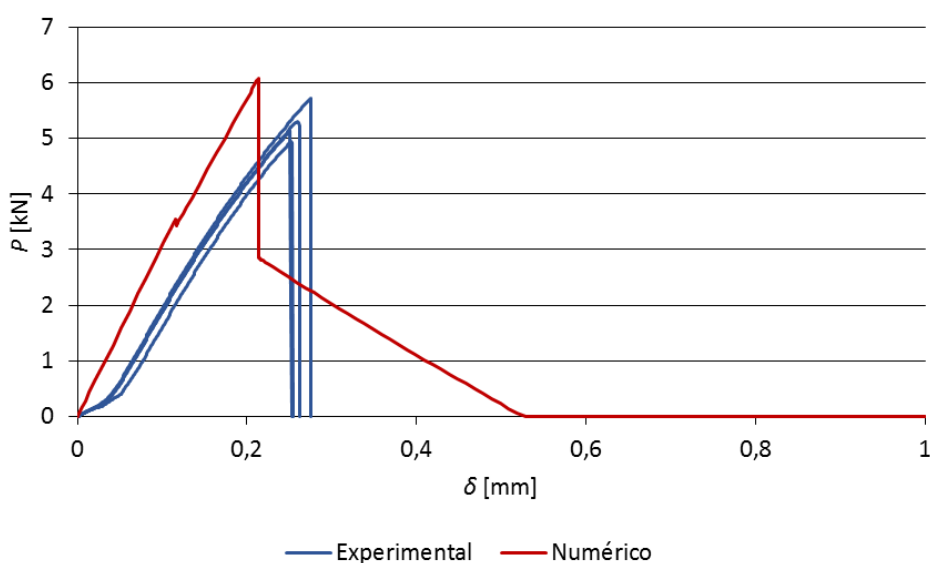


Figura 65: Curvas $P-\delta$ experimentais e numérica da configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 para $L_0=12,5$ mm.

A Figura 65 mostra as curvas $P-\delta$ experimentais e numérica da configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 para $L_0=12,5$ mm. Os valores $P_{\text{máx}}$ de ambos os trabalhos encontram-se bastante próximos. A variação dos deslocamentos de rotura deve-se sobretudo ao escorregamento dos provetes e a pequenas oscilações da máquina de ensaios durante o carregamento das juntas, fatores estes não considerados no trabalho numérico. O mesmo acontece para os restantes L_0 .

A curva P - δ numérica indica ainda qual dos dois adesivos atingiu primeiro a rotura, ou seja, o valor $P_{\text{máx}}$ corresponde à rotura do adesivo com maior rigidez. Portanto, nesta configuração de adesivos, a rotura iniciou-se pelo adesivo Araldite® AV138, seguido da rotura do adesivo Araldite® 2015. A curva P - δ numérica, quando comparada com a experimental, mostra um elevado deslocamento até à rotura do adesivo Araldite® 2015. Esta diferença entre deslocamentos deve-se ao MDC escolhido na modelação.

Os picos de concentração de tensões localizados nas extremidades das juntas e nas transições do degrau interior originam um momento fletor que promove o arrancamento das extremidades, juntamente com fenómenos de compressão na região central da ligação. Estes picos de tensão criados pelos esforços de arrancamento originam picos de dano elevados nas extremidades das juntas e no degrau interior. Como nesta configuração de adesivos, o dano é maior no degrau interior, a rotura da ligação inicia-se pelo adesivo Araldite® AV138.

Os degraus compostos pelo adesivo Araldite® 2015 revelam menor dano do que o degrau composto pelo adesivo Araldite® AV138, efeito este relacionado com a ductilidade do adesivo. O aumento da ductilidade do adesivo faz com que a camada adesiva sofra deformações plásticas significativas antes da rotura completa da ligação, promovendo a uma suavização da evolução do dano.

Configuração 2: Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752

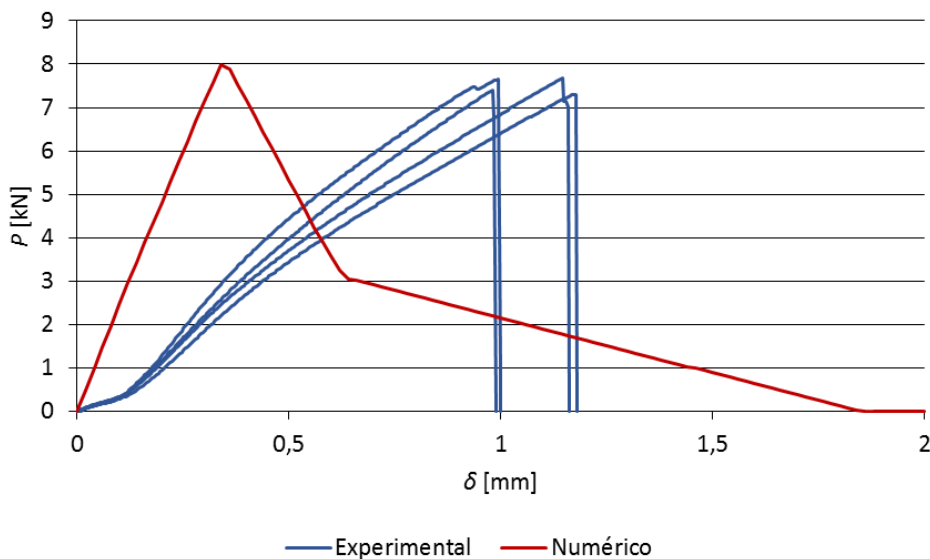


Figura 66: Curvas P - δ experimentais e numérica da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 para $L_0=25$ mm.

Na Figura 66 encontram-se representadas as curvas P - δ experimentais e numérica da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 para $L_0=25$ mm. Os valores de $P_{\text{máx}}$ também encontram-se bastante próximos, e a variação dos

deslocamentos até à rotura acontece pelos mesmos motivos já mencionados anteriormente. Também se verifica que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ e δ nesta configuração de adesivos são mais elevados devido à combinação da ductilidade moderada do adesivo Araldite® 2015 com a elevada ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752. O mesmo acontece para os restantes L_0 .

Nesta configuração de adesivos a rotura iniciou-se pelo adesivo Araldite® 2015 seguido do adesivo Sikaforce® 7752. A curva P - δ numérica, quando comparada com a experimental, mostra um elevado deslocamento até à rotura do adesivo Sikaforce® 7752. Esta diferença entre deslocamentos deve-se ao aparecimento de rotura após plastificação das juntas, não sendo capturada com precisão pelo MDC triangular aplicado no estudo numérico.

A utilização do adesivo Sikaforce® 7752 nos degraus exteriores reduz os picos de tensão nas extremidades da ligação, uma vez que permite o efeito acentuado de plastificação sem rotura nas extremidades do adesivo durante o carregamento progressivo da junta, permitindo uma maior resistência da ligação.

Configuração 3: Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752

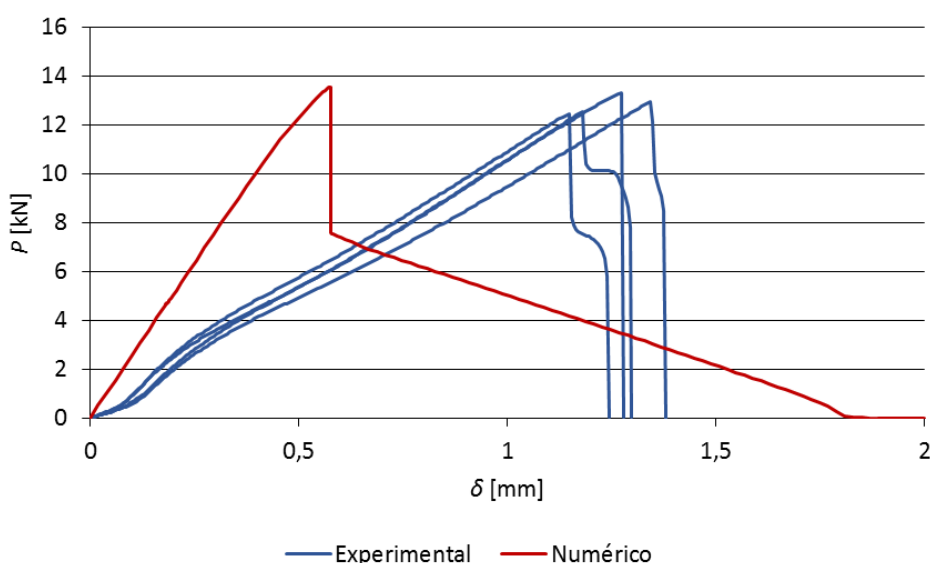


Figura 67: Curvas P - δ experimentais e numérica da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 para $L_0=50$ mm.

As curvas P - δ da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 para $L_0=50$ mm, representadas na Figura 67, mostram que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos também se encontram próximos. Tal como nos casos anteriores, existe uma variação dos valores de δ entre o experimental e o numérico pelos mesmos motivos mencionados anteriormente. A ductilidade elevada do adesivo Sikaforce® 7752

e a elevada rigidez do adesivo Araldite[®] AV138 promovem valores de $P_{\text{máx}}$ e δ mais elevados. O mesmo acontece para os restantes L_0 .

Para esta configuração de adesivos, a rotura iniciou-se pelo adesivo Araldite[®] AV138 seguido do adesivo Sikaforce[®] 7752. Tal como no caso anterior, o elevado deslocamento até à rotura do adesivo Sikaforce[®] 7752 da curva P - δ numérica deve-se ao aparecimento de rotura após plastificação das juntas, não sendo capturada com precisão pelo MDC triangular.

A utilização do adesivo Sikaforce[®] 7752 nos degraus exteriores reduz os picos de tensão nas extremidades da ligação. Esta diminuição dos picos de tensão permite o efeito acentuado de plastificação sem rotura nas extremidades do adesivo durante o carregamento progressivo da junta, o que origina um aumento da resistência da ligação.

3.2.6.2 Modos de rotura

Normalmente, no método experimental, os modos de rotura são analisados quando a ligação atinge a rotura total. No método numérico, a rotura da ligação pode ser acompanhada durante todo o seu carregamento, permitindo assim a visualização dos caminhos de rotura desde o início do carregamento até à rotura final da ligação.

Os caminhos de rotura também podem ser visualizados nos métodos experimentais caso sejam utilizados dispositivos óticos para o seu registo. No entanto, para a presente dissertação não se encontravam disponíveis tais equipamentos.

Na análise dos modos de rotura pelo método numérico, foi necessária a utilização da variável SDEG de forma a ser possível identificar os caminhos de rotura das juntas. De modo a facilitar a identificação dos caminhos de rotura, apresentam-se na Tabela 29 os tipos de rotura observados numericamente. Na Tabela 30 são apresentados os caminhos de rotura obtidos numericamente para as três configurações de adesivos em função de L_0 . Estes modos de rotura são apresentados durante várias fases do carregamento das juntas, permitindo assim a localização da iniciação e propagação do dano da camada adesiva.

Os tipos de rotura observados foram os seguintes:

- A. Rotura nas transições do degrau interior;**
- B. Rotura nas transições dos degraus exteriores e interior;**
- C. Rotura do degrau interior e transições do degrau interior;**
- D. Rotura do degrau interior e transições dos degraus;**
- E. Rotura do degrau interior e exteriores;**
- F. Plastificação dos aderentes.**

Tabela 29: Modos de rotura numéricos.

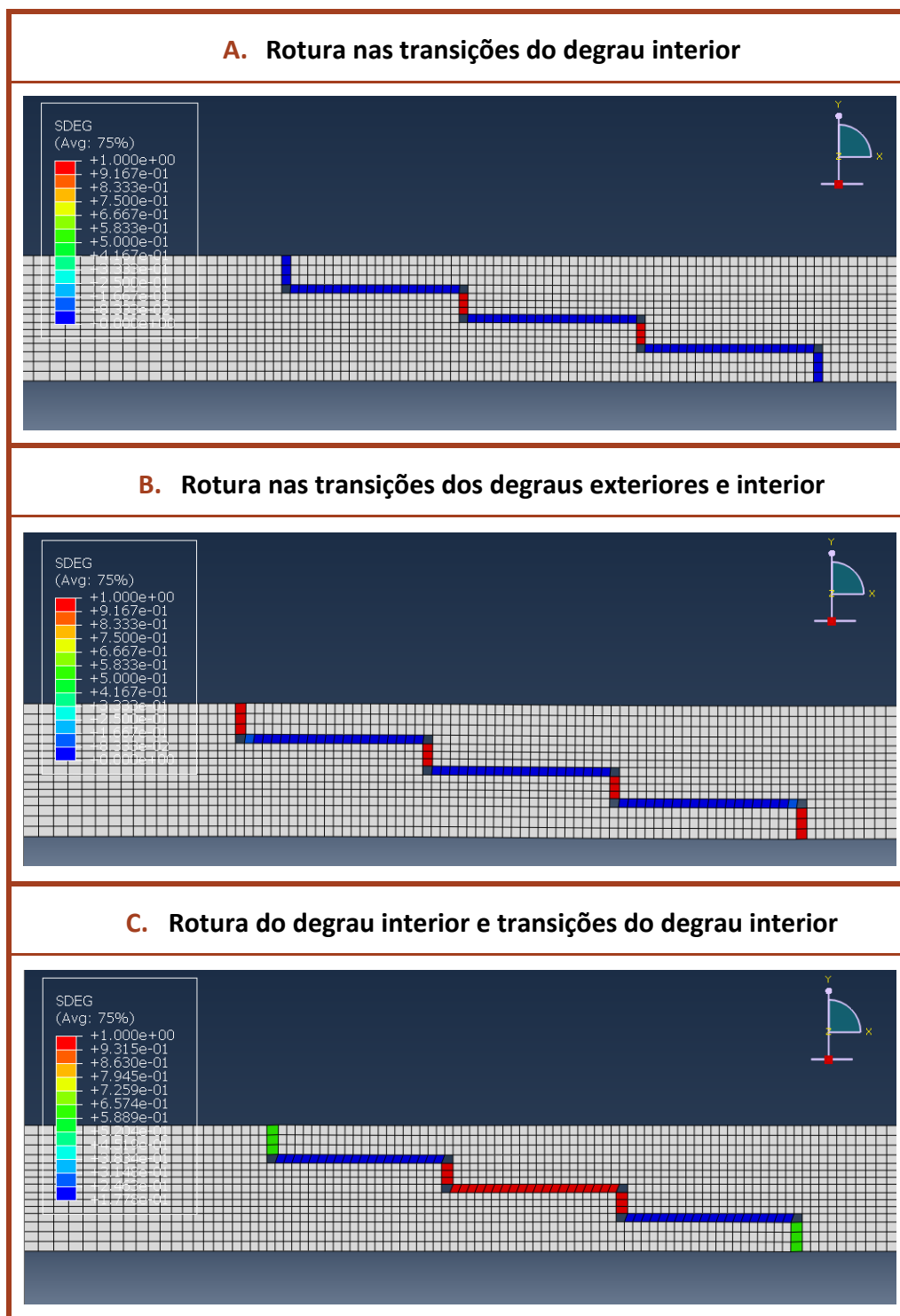


Tabela 30: Caminhos de rotura para as três configurações de adesivos.

Adesivos\Lo [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® 2015 Araldite® AV138 Araldite® 2015	A-B-D-E	A-B-D-E	A-B-D-E	B-D-F
Sikaforce® 7752 Araldite® 2015 Sikaforce® 7752	A-B-D-E	A-B-D-E	A-B-D-E	A-B-D-E
Sikaforce® 7752 Araldite® AV138 Sikaforce® 7752	A-C-D-E	A-C-D-E	A-C-D-E	A-C-D-E

Com base nos dados fornecidos pela Tabela 30, na maioria dos casos a rotura das juntas iniciou-se na camada adesiva nas transições do degrau interior, seguida da rotura da camada adesiva nas transições dos degraus exteriores, seguida da rotura da camada adesiva do degrau interior e posteriormente dos degraus exteriores.

A configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 apresenta modos de rotura ligeiramente diferentes. A rotura iniciou-se na camada adesiva nas transições do degrau interior, seguida da rotura da camada adesiva do mesmo degrau, passando depois para a camada adesiva nas transições dos degraus exteriores e terminou com a rotura da camada adesiva dos degraus exteriores. Este tipo de rotura deve-se à diferença de ductilidades entre ambos adesivos. Como o adesivo Araldite® AV138 apresenta baixa ductilidade, faz com que o seu deslocamento até à rotura seja menor, o que leva à sua rotura antecipada. Em contrapartida, a ductilidade elevada do adesivo Sikaforce® 7752 faz com que o seu deslocamento de rotura seja superior ao do adesivo Araldite® AV138.

Registam-se algumas exceções para $L_0=50$ mm, nomeadamente para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015. Para esta configuração de adesivos, a rotura iniciou-se na camada adesiva nas transições dos degraus exteriores e interior, seguida da rotura da camada adesiva do degrau interior e terminou com plastificações dos aderentes, com 21,54% de plastificação, devido à deformação de rotura à tração do alumínio ser atingida.

3.2.6.3 Resistência das juntas

Na Tabela 31 é realizada a comparação da resistência das juntas do trabalho numérico com o trabalho experimental, em função de L_o , para as três configurações de adesivos.

A comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ entre o trabalho experimental e o trabalho numérico para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 mostra que ambas as curvas exibem um comportamento semelhante, e os valores $P_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos se encontram bastante próximos. A diferença entre o trabalho numérico e o trabalho experimental é sempre por excesso.

Relativamente à configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752, também se verifica que ambas as curvas exibem um comportamento semelhante, e os valores $P_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos se encontram também bastante próximos. A diferença entre o trabalho numérico e o trabalho experimental é sempre por excesso.

Tal como nos casos anteriores, as curvas de resistência da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 exibem um comportamento semelhante. Os valores $P_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos encontram-se praticamente coincidentes para $12,5\text{ mm} \leq L_o \leq 37,5\text{ mm}$. Os resultados numéricos oscilam entre excesso ($25\text{ mm} \leq L_o \leq 50\text{ mm}$) e defeito ($L_o = 12,5\text{ mm}$).

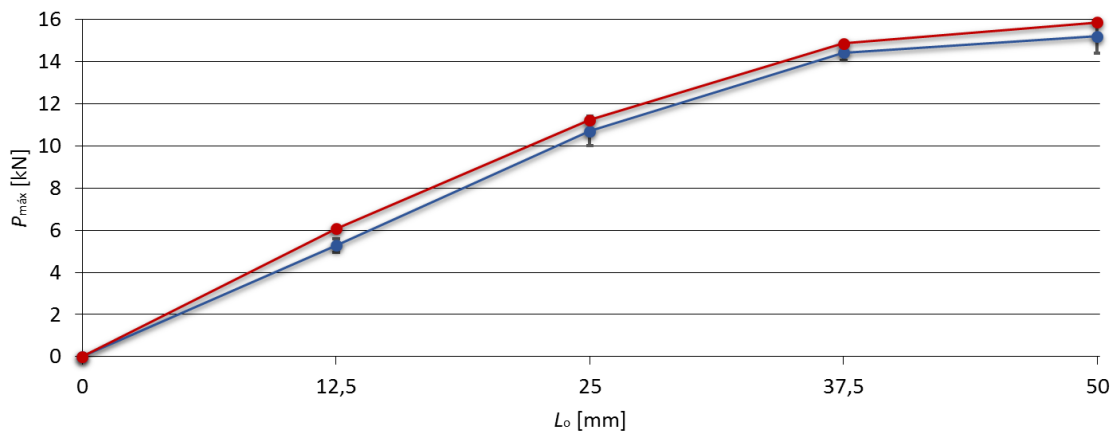
A Tabela 32 mostra a diferença percentual de $P_{m\acute{a}x}$ entre o trabalho experimental e o trabalho numérico, para as três configurações de adesivos. Para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 registam-se diferenças de 15,1% para $L_o = 12,5\text{ mm}$, 4,7% para $L_o = 25\text{ mm}$, 3,5% para $L_o = 37,5\text{ mm}$ e 4,6% para $L_o = 50\text{ mm}$.

Na configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 registam-se diferenças de 17,1% para $L_o = 12,5\text{ mm}$, 6,7% para $L_o = 25\text{ mm}$, 6,4% para $L_o = 37,5\text{ mm}$ e 7,0% para $L_o = 50\text{ mm}$.

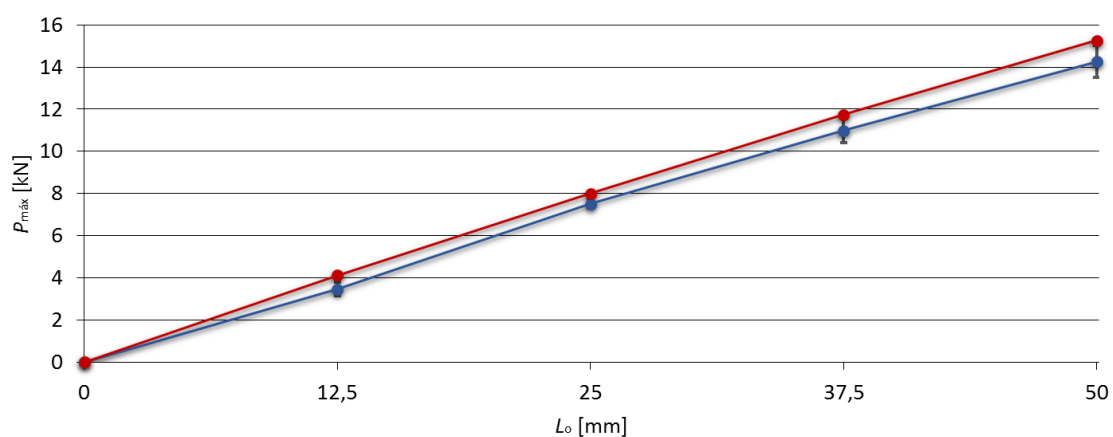
Para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 obtiveram-se diferenças de -2,2% para $L_o = 12,5\text{ mm}$, 1,3% para $L_o = 25\text{ mm}$, 1,9% para $L_o = 37,5\text{ mm}$ e 5,5% para $L_o = 50\text{ mm}$. Esta configuração de adesivos regista a menor diferença percentual das três configurações de adesivos.

Tabela 31: Comparação de $P_{\text{máx}}$ [kN] entre o trabalho experimental e o numérico, em função de L_0 para as três configurações de adesivos.

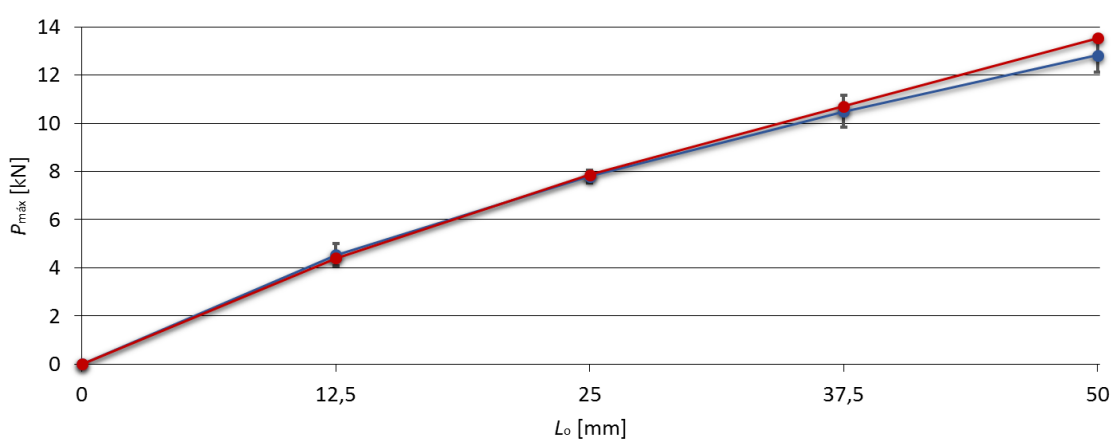
Configuração 1: Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015



Configuração 2: Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752



Configuração 3: Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752



Legenda:

—●— Experimental

—●— Numérico

Tabela 32: Valores de $P_{\text{máx}}$ [kN] do trabalho experimental e numérico, em função de L_0 para as três configurações de adesivos.

Configurações de adesivos		L_0 [mm]	Experimental	Numérico	Diferença %
Configuração 1	Araldite® 2015 Araldite® AV138 Araldite® 2015	12,5	5,3±0,3	6,1	15,1
		25	10,7±0,7	11,2	4,7
		37,5	14,4±0,4	14,9	3,5
		50	15,2±0,8	15,9	4,6
Configuração 2	Sikaforce® 7752 Araldite® 2015 Sikaforce® 7752	12,5	3,5±0,3	4,1	17,1
		25	7,5±0,2	8,0	6,7
		37,5	11,0±0,6	11,7	6,4
		50	14,3±0,8	15,3	7,0
Configuração 3	Sikaforce® 7752 Araldite® AV138 Sikaforce® 7752	12,5	4,5±0,2	4,4	-2,2
		25	7,8±0,2	7,9	1,3
		37,5	10,5±0,3	10,7	1,9
		50	12,8±0,4	13,5	5,5

A Figura 68 mostra os valores de $P_{\text{máx}}$ numéricos em função de L_0 , para as três configurações de adesivos. De uma forma geral, os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos no trabalho numérico são bastante idênticos aos do trabalho experimental.

Tal como no trabalho experimental, a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 apresenta a maior resistência de junta. Apesar dos valores de $P_{\text{máx}}$ aumentarem com o aumento de L_0 , o incremento da resistência não é tão acentuado quando comparado com as restantes configurações, nomeadamente para $L_0 \geq 25$ mm.

A configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 apresenta o maior incremento de resistência em função de L_0 . A utilização destes adesivos promove um maior desempenho das juntas para L_0 elevados. Contudo, os baixos valores de $P_{\text{máx}}$ para $L_0 = 12,5$ mm faz desta configuração de adesivos a menos resistente para baixos valores de L_0 .

A utilização dos adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 é mais adequada para baixos valores de L_0 . Para valores de L_0 elevados, a resistência das juntas com esta configuração de adesivos não é tão satisfatória.

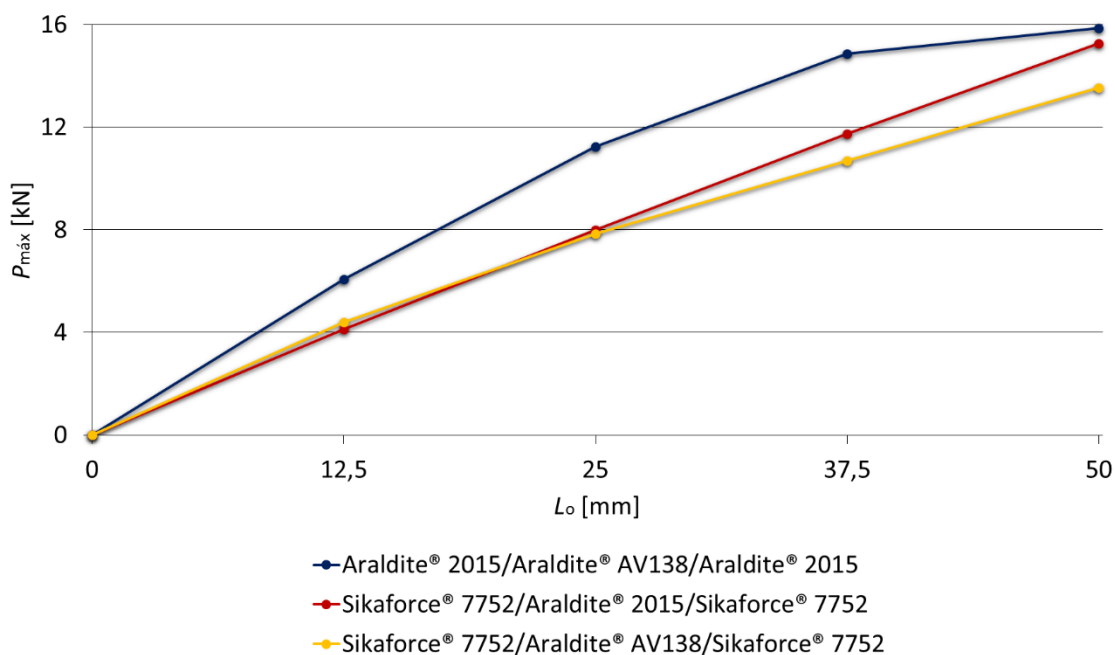


Figura 68: Valores de $P_{máx}$ [kN] obtidos no trabalho numérico, em função de L_0 para as três configurações de adesivos.

Quanto maior for a rigidez do adesivo, maior será a força necessária para a sua rotura e menor será o seu deslocamento. Dos três adesivos utilizados, o adesivo Araldite® AV138 apresenta o maior módulo de elasticidade, ou seja, é o mais rígido, seguido do adesivo Araldite® 2015 e do adesivo Sikaforce® 7752. O Araldite® AV138 é um adesivo de elevada rigidez e de muito fraca ductilidade, uma vez que não apresenta plastificação e redistribuição de tensões após atingir a rotura. O adesivo Araldite® 2015 apresenta ductilidade moderada, o que possibilita a redistribuição de tensões nas zonas mais concentradas, tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes. Por isso, a elevada rigidez do Araldite® AV138 combinada com a ductilidade moderada e capacidade de plastificação do Araldite® 2015, possibilita um maior deslocamento até à rotura juntamente com forças elevadas, fazendo desta combinação adesivos a mais resistente para todos os L_0 .

O adesivo Sikaforce® 7752, quando comparado com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, apresenta uma menor resistência ao corte e à tração, mas exibe maior ductilidade. Este adesivo promove elevada resistência das ligações, uma vez que combina uma resistência aceitável com elevada ductilidade, permitindo tensões elevadas na camada de adesivo e um efeito acentuado de plastificação sem rotura nas extremidades do adesivo durante o carregamento da junta, o que origina elevada

resistência na ligação. A sua elevada flexibilidade combinada com a elevada rigidez do adesivo Araldite® AV138 ou com a ductilidade moderada do Araldite® 2015 possibilita um maior deslocamento da ligação até à sua rotura sem que a resistência da ligação seja comprometida.

O principal motivo da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 apresentar melhor desempenho do que a configuração Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, deve-se à plastificação do adesivo Araldite® 2015 quando sujeito a cargas elevadas. No entanto, para $L_0 \leq 25$ mm, a configuração Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 origina melhores resultados do que a configuração Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752, uma vez que o adesivo Araldite® AV138 funciona melhor para baixos valores de L_0 , devido à existência de um menor gradiente de tensões no degrau. Em contrapartida, para L_0 elevados este adesivo não apresenta um comportamento satisfatório, uma vez que o gradiente de tensões é maior.

Como as tensões τ_{xy} são maiores nas extremidades das juntas, nas juntas mistas deve ser usado um adesivo dúctil e flexível nas extremidades, e um adesivo rígido e menos dúctil no centro da junta (Figura 69). Esta técnica de aumento de resistência faz com que a tensão de corte do adesivo aplicado nas extremidades da ligação seja superior à do adesivo aplicado no centro, sendo necessária uma força mais elevada para levar à rotura da ligação.

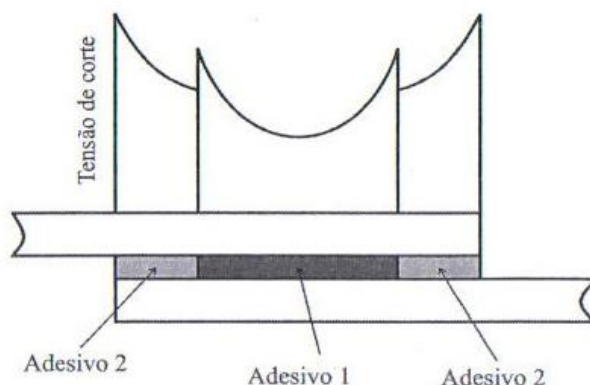


Figura 69: Esquema representativo das tensões τ_{xy} numa junta adesiva mista [2].

Com base na Tabela 32, as diferenças máximas percentuais de $P_{m\acute{a}x}$ são de:

- 15,1% para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 17,1% para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752;
- 5,5% para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752.

A diferença percentual de $P_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos é bastante reduzida, destacando-se assim a fiabilidade dos métodos numéricos na determinação do comportamento das juntas adesivas.

3.2.6.4 Energias de rotura

Na Tabela 33 é realizada a comparação dos valores de $E_{m\acute{a}x}$ do trabalho numérico com o trabalho experimental, em função de L_o para as três configurações de adesivos.

A comparação dos valores de $E_{m\acute{a}x}$ entre o trabalho experimental e o trabalho numérico para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 mostra que ambas as curvas exibem um comportamento semelhante, e os valores $E_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos encontram-se bastante próximos. A diferença entre o trabalho numérico e o trabalho experimental é sempre por excesso.

Relativamente à configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752, ambas as curvas também exibem um comportamento semelhante, e os valores $E_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos encontram-se próximos. A diferença entre o trabalho numérico e o trabalho experimental é sempre por excesso.

Tal como nos casos anteriores, os valores de $E_{m\acute{a}x}$ de ambas as curvas da configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752, apresentam um comportamento idêntico e encontram-se bastante próximos. A diferença entre o trabalho numérico e o trabalho experimental é sempre por excesso.

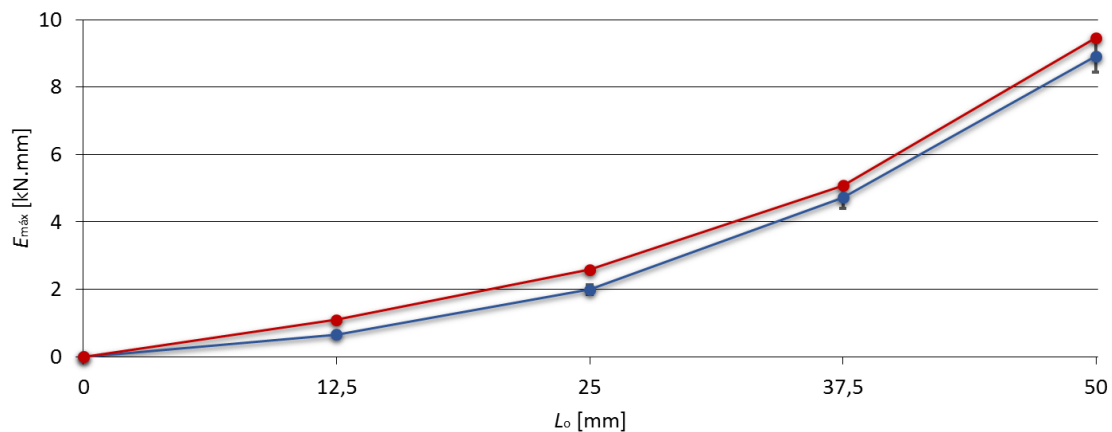
A Tabela 34 mostra a diferença percentual de $E_{m\acute{a}x}$ entre o trabalho experimental e o trabalho numérico, para as três configurações de adesivos. Para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 registam-se diferenças de 57,1% para $L_o=12,5$ mm, 30,0% para $L_o=25$ mm, 8,5% para $L_o=37,5$ mm e 6,7% para $L_o=50$ mm.

Na configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 registam-se diferenças de 47,1% para $L_o=12,5$ mm, 16,7% para $L_o=25$ mm, 10,4% para $L_o=37,5$ mm e 5,6% para $L_o=50$ mm.

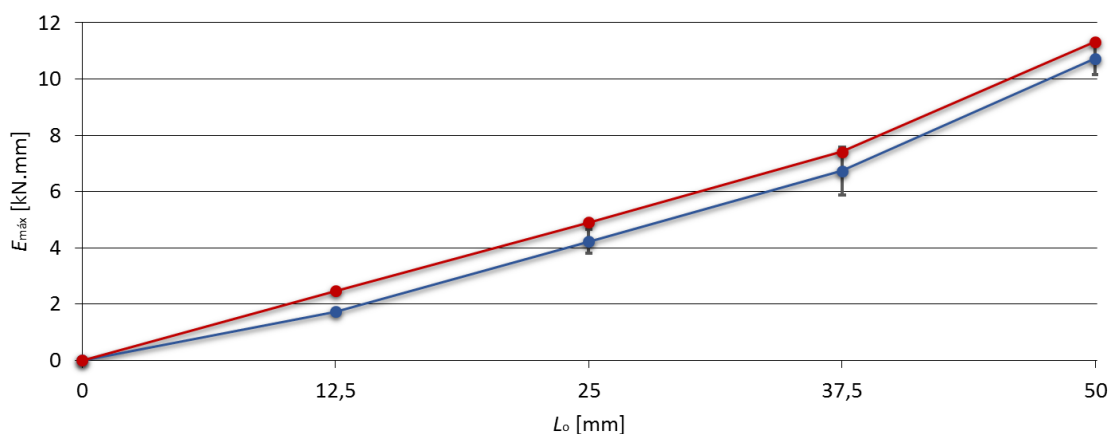
Para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 obtiveram-se diferenças de 16,7% para $L_o=12,5$ mm, 7,7% para $L_o=25$ mm, 4,9% para $L_o=37,5$ mm e 4,7% para $L_o=50$ mm. Esta configuração de adesivos continua a apresentar a menor diferença percentual das três configurações de adesivos.

Tabela 33: Comparação de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] entre o trabalho experimental e o numérico, em função de L_0 para as três configurações de adesivos.

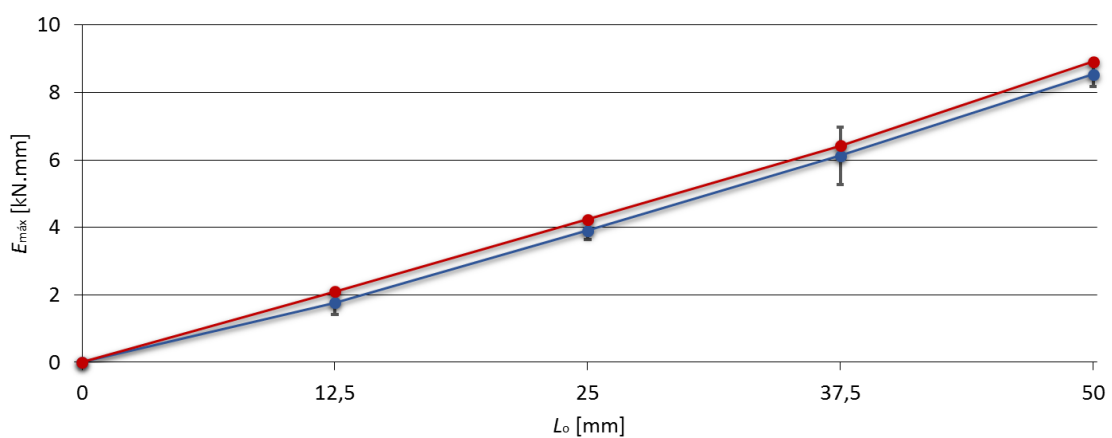
Configuração 1: Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015



Configuração 2: Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752



Configuração 3: Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752



Legenda:

● Experimental

● Numérico

Tabela 34: Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] do trabalho experimental e numérico, em função de L_0 para as três configurações de adesivos.

Configurações de adesivos		L_0 [mm]	Experimental	Numérico	Diferença %
Configuração 1	Araldite® 2015	12,5	0,7±0,1	1,1	57,1
		25	2,0±0,2	2,6	30,0
		37,5	4,7±0,3	5,1	8,5
		50	8,9±0,5	9,5	6,7
Configuração 2	Sikaforce® 7752	12,5	1,7±0,1	2,5	47,1
		25	4,2±0,4	4,9	16,7
	Sikaforce® 7752	37,5	6,7±0,9	7,4	10,4
		50	10,7±0,6	11,3	5,6
Configuração 3	Sikaforce® 7752	12,5	1,8±0,4	2,1	16,7
		25	3,9±0,3	4,2	7,7
	Sikaforce® 7752	37,5	6,1±0,9	6,4	4,9
		50	8,5±0,4	8,9	4,7

Os valores de $E_{m\acute{a}x}$ numéricos em função de L_0 para as três configurações de adesivos encontram-se representados na Figura 70. De uma forma geral, os valores de $E_{m\acute{a}x}$ obtidos no trabalho numérico são bastante idênticos aos do trabalho experimental.

Tal como no trabalho experimental, a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 apresenta o maior valor de $E_{m\acute{a}x}$, seguida da configuração Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 e, com as menores energias de rotura, tem-se a configuração Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 (exceto para $L_0=50$ mm).

A utilização de dois adesivos com módulos de elasticidade elevados promove baixos valores de $E_{m\acute{a}x}$, como é o caso da combinação dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Devido à elevada rigidez e inexistência de plastificação após rotura do adesivo Araldite® AV138, o deslocamento até à sua rotura, quando comparado com o adesivo Araldite® 2015, é menor, o que origina baixos valores de $E_{m\acute{a}x}$. No entanto, para 37,5

mm $\leq L_o \leq 50$ mm verifica-se um aumento acentuado de $E_{m\acute{a}x}$, efeito explicado pelo aparecimento do fenómeno de plastificação dos aderentes.

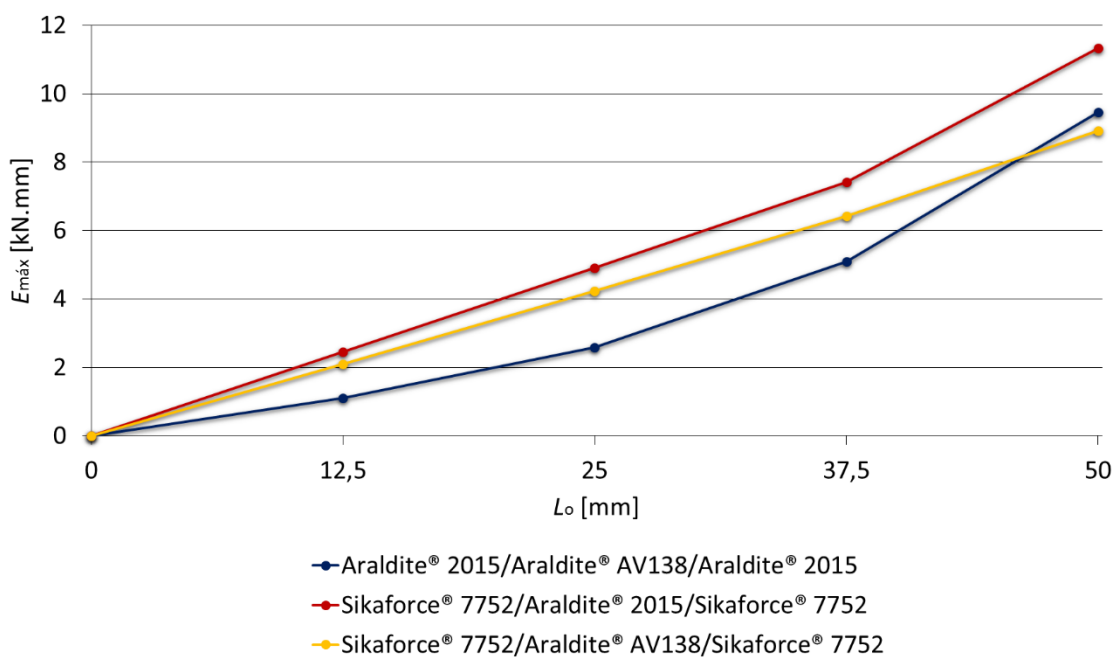


Figura 70: Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] obtidos no trabalho numérico em função de L_o para as três configurações de adesivos.

A combinação do adesivo Araldite® AV138 com o adesivo Sikaforce® 7752 já provoca um aumento dos valores de $E_{m\acute{a}x}$, uma vez que o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta ductilidade extremamente elevada, o que permite a plastificação completa da camada do adesivo e, conseqüentemente, o aumento do deslocamento de rotura atingido pela junta. Contudo, para $L_o=50$ mm, a combinação dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 apresenta maior $E_{m\acute{a}x}$, porque o adesivo Araldite® 2015 começa a plastificar juntamente com plastificação dos aderentes. Como tal, os deslocamentos sofridos pela junta aumentam significativamente, traduzindo-se em valores de $E_{m\acute{a}x}$ mais elevados. Salienta-se que a utilização dos adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 promove o incremento de $E_{m\acute{a}x}$ de uma forma linear com o aumento de L_o , devido essencialmente à evolução linear de $E_{m\acute{a}x}$ em função de L_o do adesivo Sikaforce® 7752.

A configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 origina os maiores valores de $E_{m\acute{a}x}$ das três configurações. A ductilidade moderada do adesivo Araldite® 2015 combinada com a ductilidade elevada do adesivo Sikaforce® 7752 faz com que os deslocamentos até à rotura desta configuração de adesivos sejam mais elevados quando comparados com as restantes configurações, nomeadamente para $L_o \geq 25$ mm. Para $L_o=12,5$ mm a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 e a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 apresentam valores de $E_{m\acute{a}x}$ bastante próximos. A pequena variação de $E_{m\acute{a}x}$ entre estas juntas deve-se à diferença do deslocamento de rotura do

adesivo aplicado no degrau interior. Como o adesivo Araldite® AV138 apresenta menor $E_{m\acute{a}x}$ do que o adesivo Araldite® 2015, a configuração composta pelos adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 também regista menor $E_{m\acute{a}x}$ do que a configuração Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752.

Com base na Tabela 34, as diferenças máximas percentuais de $E_{m\acute{a}x}$, são de:

- 57,1% para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 47,1% para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752;
- 16,7% para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752.

3.2.7 Comparação com resultados de adesivo único

Este subcapítulo destina-se à comparação de resultados entre as juntas mistas e as juntas de adesivo único. No ponto 3.2.7.1 é feita a comparação de resultados da resistência das juntas do trabalho experimental com o trabalho numérico. O ponto 3.2.7.2 destina-se à comparação de resultados de $E_{m\acute{a}x}$ do trabalho experimental com o trabalho numérico. Nas juntas com adesivo único foram considerados isoladamente os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

3.2.7.1 Resistência das juntas

Na Tabela 35 é realizada a comparação da resistência das juntas do trabalho numérico com o trabalho experimental, em função de L_0 , para as juntas com adesivo único.

A comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ entre o trabalho experimental e o trabalho numérico para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, mostra que ambas as curvas exibem um comportamento semelhante, e que os valores $P_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos se encontram bastante próximos. A diferença entre o trabalho numérico e o trabalho experimental é sempre por excesso.

Para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, também se verifica que ambas as curvas exibem um comportamento semelhante, e que os valores $P_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos se encontram bastante próximos. A diferença entre o trabalho numérico e o trabalho experimental é sempre por excesso.

Nas juntas com o adesivo Sikaforce® 7752, ambas as curvas também exibem um comportamento semelhante. No entanto, os resultados experimentais são superiores aos numéricos. Esta diferença entre resultados deve-se ao facto da rotura ocorrer após plastificação significativa do adesivo, que não é capturada com precisão pelo MDC triangular aplicado no estudo numérico. De facto, este modelo promove a depreciação das tensões imediatamente a seguir ao início do dano, quando na realidade existe uma

zona de patamar, o que leva à obtenção de valores $P_{m\acute{a}x}$ inferiores. Para resultados mais precisos, poderiam ser usados MDC trapezoidais nos EF. Contudo, consideram-se estes resultados satisfatórios [93].

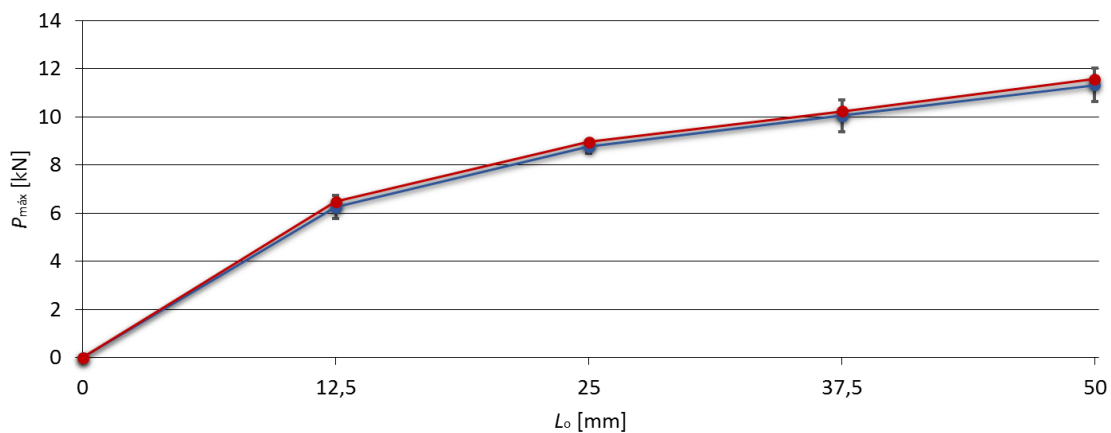
A Tabela 36 mostra a diferença percentual de $P_{m\acute{a}x}$ entre o trabalho experimental e o trabalho numérico, para as juntas de adesivo único. Para as juntas compostas pelo adesivo Araldite® AV138 foi obtida uma diferença de 3,2% para $L_0=12,5$ mm, 2,3% para $L_0=25$ mm, 1,0% para $L_0=37,5$ mm e 2,7% para $L_0=50$ mm.

Nas juntas compostas pelo adesivo Araldite® 2015, foi registada uma diferença de 1,9% para $L_0=12,5$ mm, 1,0% para $L_0=25$ mm, 2,7% para $L_0=37,5$ mm e 1,7% para $L_0=50$ mm.

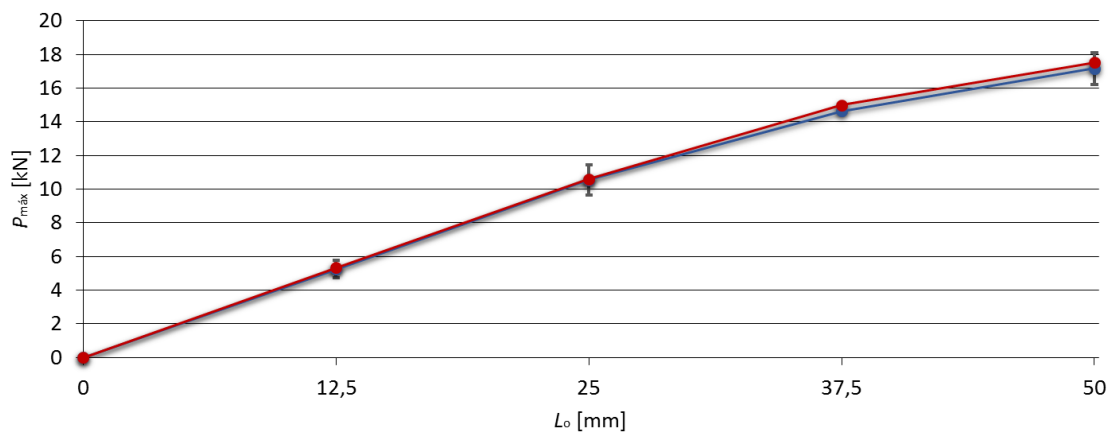
As juntas com o adesivo Sikaforce® 7752, a diferença entre ambos os trabalhos é de -11,9% para $L_0=12,5$ mm, -12,8% para $L_0=25$ mm, -13,2% para $L_0=37,5$ mm e -14,0% para $L_0=50$ mm.

Tabela 35: Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] entre o trabalho experimental e o numérico, em função de L_0 para as juntas de adesivo único.

Adesivo 1: Araldite® AV138



Adesivo 2: Araldite® 2015



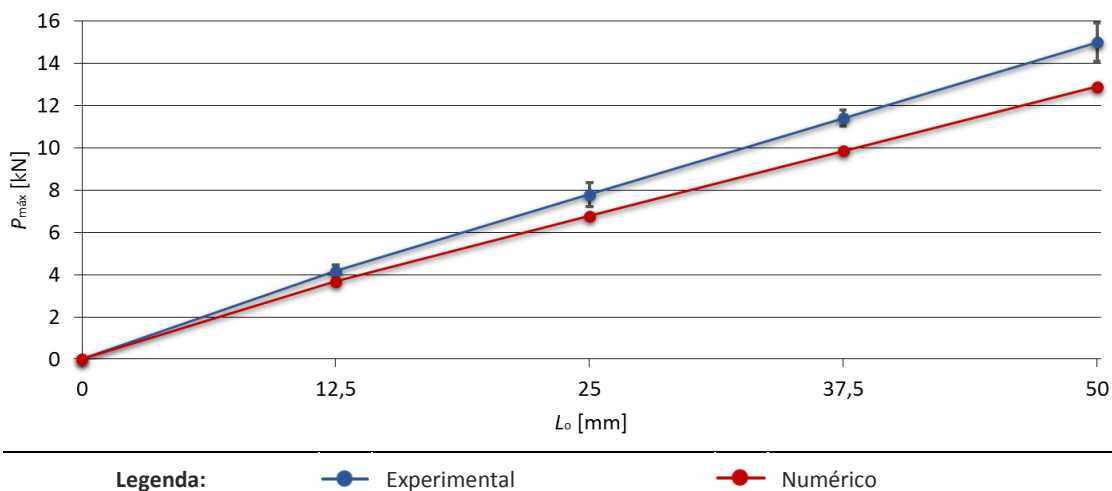
Adesivo 3: Sikaforce® 7752

Tabela 36: Valores de $P_{máx}$ [kN] do trabalho experimental e numérico, em função de L_0 para as juntas de adesivo único.

Adesivos	L_0 [mm]	Experimental	Numérico	Diferença %
Adesivo 1	12,5	6,3±0,5	6,5	3,2
	25	8,8±0,3	9,0	2,3
	37,5	10,1±0,7	10,2	1,0
	50	11,3±0,7	11,6	2,7
Adesivo 2	12,5	5,2±0,5	5,3	1,9
	25	10,5±0,9	10,6	1,0
	37,5	14,6±0,2	15,0	2,7
	50	17,2±1,0	17,5	1,7
Adesivo 3	12,5	4,2±0,3	3,7	-11,9
	25	7,8±0,6	6,8	-12,8
	37,5	11,4±0,4	9,9	-13,2
	50	15,0±0,9	12,9	-14,0

Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas encontram-se representados na Figura 71. Tal como no trabalho experimental, verifica-se que o aumento de L_o afeta a resistência das juntas, independentemente do tipo de junta utilizado.

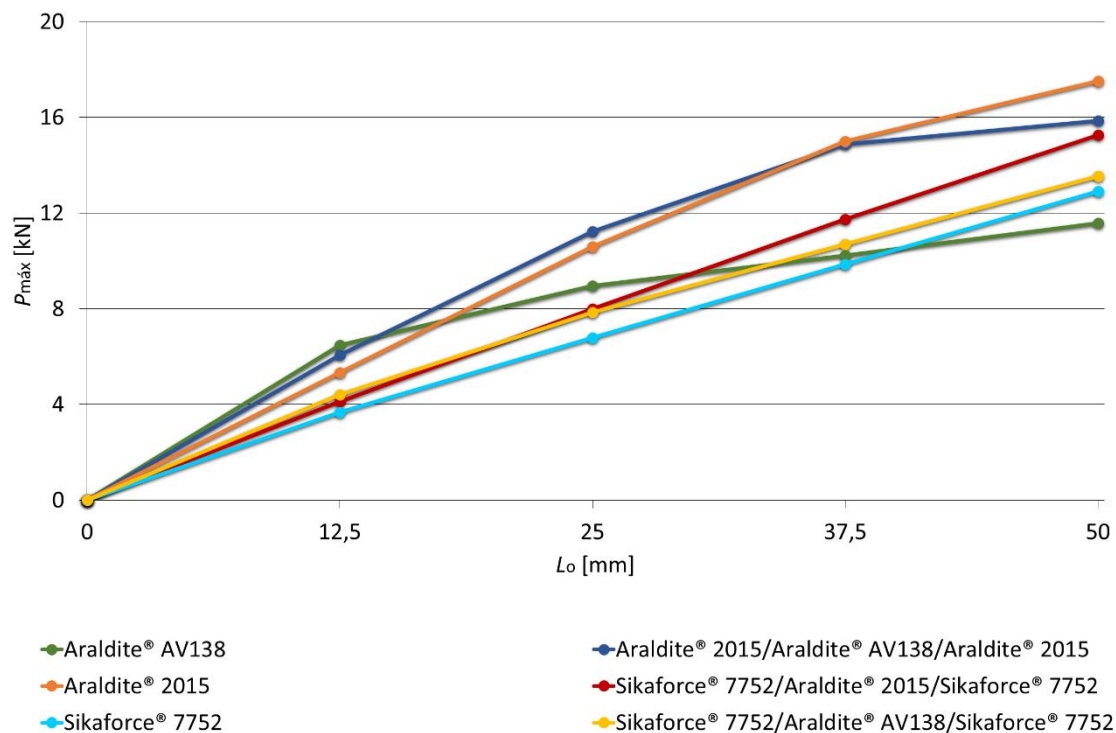


Figura 71: Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] numéricos em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.

A resistência mais elevada para $L_o=12,5$ mm  atribuída à utilização de juntas compostas unicamente pelo adesivo Araldite® AV138. A elevada rigidez deste adesivo faz com que seja necessária uma maior força aplicada para a sua rotura. Contudo, a partir deste L_o a fraca ductilidade e o aumento do gradiente de tensões no adesivo originam uma perda de eficiência desta configuração de junta. Com o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$ encontra-se a utilização única do adesivo Sikaforce® 7752, pelos motivos técnicos já explicados anteriormente. As diferenças relativas da junta mais resistente (Araldite® AV138) comparativamente às outras juntas são as seguintes:

- 6,6% → Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 22,6% → Araldite® 2015;
- 47,7% → Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752;
- 58,5% → Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752;
- 75,7% → Sikaforce® 7752.

Para $L_o=25$ mm, a utilização de juntas mistas já confere maior resistência de junta, com a utilização dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. A segunda maior resistência

é atribuída à utilização única do adesivo Araldite® 2015. A ductilidade moderada e a capacidade de plastificação deste adesivo, quando combinadas com a elevada rigidez do adesivo Araldite® AV138, promovem o aumento da resistência da ligação. O adesivo Araldite® AV138 continua a registar perda de resistência. A partir deste L_o , a junta mista constituída pelos adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 perde eficiência, devido essencialmente ao baixo valor de ε_f e ao aumento do gradiente de tensões do adesivo Araldite® AV138. As juntas compostas unicamente pelo adesivo Sikaforce® 7752 continuam a apresentar a menor resistência. São registadas as seguintes diferenças percentuais entre cada configuração de junta e a configuração ótima:

- 5,7% → Araldite® 2015;
- 24,4% → Araldite® AV138;
- 40,0% → Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752;
- 41,8% → Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752;
- 64,7% → Sikaforce® 7752.

Para $L_o=37,5$ mm, a utilização única do adesivo Araldite® 2015 apresenta a melhor resistência de junta. A capacidade de plastificação do adesivo está na origem dos elevados valores de $P_{m\acute{a}x}$. Este efeito também é verificado na configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752. A perda de resistência da configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 deve-se ao baixo valor de ε_f do adesivo Araldite® AV138 e ao aumento do gradiente de tensões no adesivo. As juntas compostas unicamente pelo adesivo Sikaforce® 7752 continuam a apresentar a menor resistência. A melhoria relativa da configuração ótima relativamente a cada uma das outras configurações é:

- 0,7% → Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 28,2% → Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752;
- 40,2% → Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752;
- 47,1% → Araldite® AV138;
- 51,5% → Sikaforce® 7752.

Para $L_o=50$ mm, as juntas compostas unicamente pelo adesivo Araldite® 2015 continuam a apresentar a melhor resistência de junta. A plastificação dos aderentes também contribui para o elevado valor de $P_{m\acute{a}x}$. Também se verifica uma perda significativa de resistência da junta mista composta pelos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Com a menor resistência encontra-se a utilização de juntas constituídas unicamente pelo adesivo Araldite® AV138, devido principalmente ao elevado gradiente de tensões deste adesivo quando aplicado em L_o elevados. A variação da junta composta unicamente pelo adesivo Araldite® 2015 relativamente a cada uma das restantes configurações é de seguida apresentada:

- 10,1% → Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 14,4% → Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752;
- 29,6% → Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752;
- 35,7% → Sikaforce® 7752;
- 50,9% → Araldite® AV138.

Globalmente, os resultados numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ encontram-se bastante próximos dos experimentais. No caso das juntas de adesivo único, a maior diferença percentual registada foi de 3,2% ($L_o=12,5$ mm) para o adesivo Araldite® AV138, e a menor foi de -14,0% ($L_o=50$ mm) para o adesivo Sikaforce® 7752.

No trabalho numérico, foram obtidas as seguintes diferenças percentuais das juntas mistas relativamente às juntas de adesivo único:

- Mínima = -36,9% para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 relativamente à junta com o adesivo Araldite® AV138 (para $L_o=12,5$ mm);
- Máxima = 64,9% para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 relativamente à junta com o adesivo Sikaforce® 7752 (para $L_o=12,5$ mm).

No trabalho experimental, foram obtidas as seguintes diferenças percentuais das juntas mistas relativamente às juntas de adesivo único:

- Mínima = -44,4% para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 relativamente a uma junta com o adesivo Araldite® AV138 ($L_o=12,5$ mm);
- Máxima = 42,6% para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 relativamente a uma junta com o adesivo Araldite® AV138 ($L_o=37,5$ mm).

3.2.7.2 Energias de rotura

Na Tabela 37 é realizada a comparação dos valores de $E_{m\acute{a}x}$ do trabalho numérico com o trabalho experimental, em função de L_o , para as juntas de adesivo único.

A comparação dos valores de $E_{m\acute{a}x}$ entre o trabalho experimental e o trabalho numérico para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, mostra que existe uma variação de $E_{m\acute{a}x}$ entre as duas curvas ao longo de L_o . No entanto, os resultados consideram-se aceitáveis. A diferença entre o trabalho numérico e o trabalho experimental é sempre por excesso.

Relativamente às juntas com o adesivo Araldite® 2015, verifica-se que ambas as curvas exibem um comportamento semelhante, e que os valores $E_{m\acute{a}x}$ de ambos os trabalhos se encontram também bastante próximos. Para $L_o=50$ mm observa-se a influência dos fenómenos de plastificação dos aderentes em $E_{m\acute{a}x}$. A diferença entre o trabalho numérico e o trabalho experimental é sempre por excesso.

Nas juntas com o adesivo Sikaforce® 7752, os resultados numéricos oscilam entre excesso e defeito. Observa-se que, para $L_o=12,5$ mm, o $E_{m\acute{a}x}$ numérico encontra-se acima do experimental. No entanto, para $L_o \geq 25$ mm, o $E_{m\acute{a}x}$ experimental aumenta de forma significativa em relação ao numérico. Estas variações estão relacionadas com a ocorrência da rotura após a plastificação das juntas, não sendo capturada com precisão pelo MDC triangular aplicado no estudo numérico.

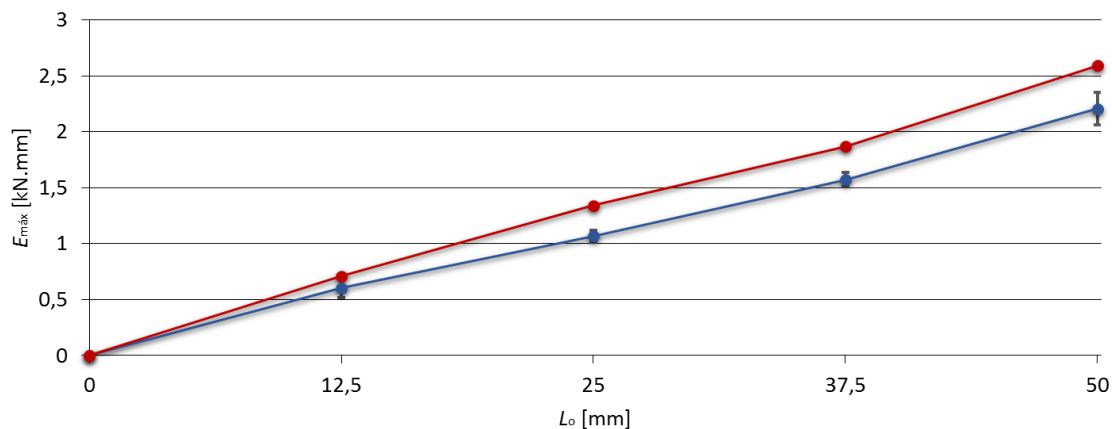
Na Tabela 38 é apresentada a diferença percentual dos valores de $E_{m\acute{a}x}$ entre o trabalho experimental e o trabalho numérico para as juntas de adesivo único. Para as juntas compostas pelo adesivo Araldite® AV138 foi obtida uma diferença de 16,7% para $L_o=12,5$ mm, 18,2% para $L_o=25$ mm, 18,8% para $L_o=37,5$ mm e 18,2% para $L_o=50$ mm.

Nas juntas compostas pelo adesivo Araldite® 2015, foi registada uma diferença de 16,7% para $L_o=12,5$ mm, 33,3% para $L_o=25$ mm, 22,0% para $L_o=37,5$ mm e 7,1% para $L_o=50$ mm.

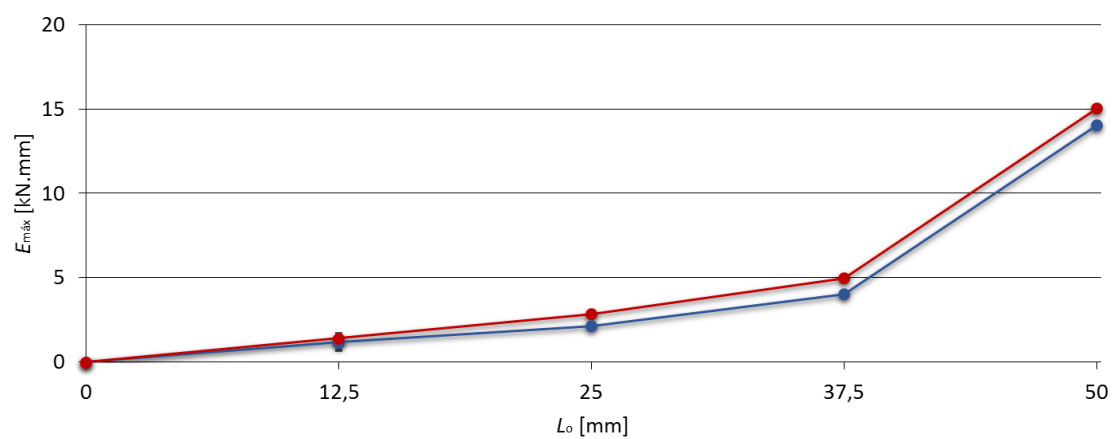
As juntas com o adesivo Sikaforce® 7752, a diferença entre ambos os trabalhos é de 63,6% para $L_o=12,5$ mm, -7,9% para $L_o=25$ mm, -21,2% para $L_o=37,5$ mm e -29,3% para $L_o=50$ mm.

Tabela 37: Comparação de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] entre o trabalho experimental e o numérico, em função de L_0 para as juntas de adesivo único.

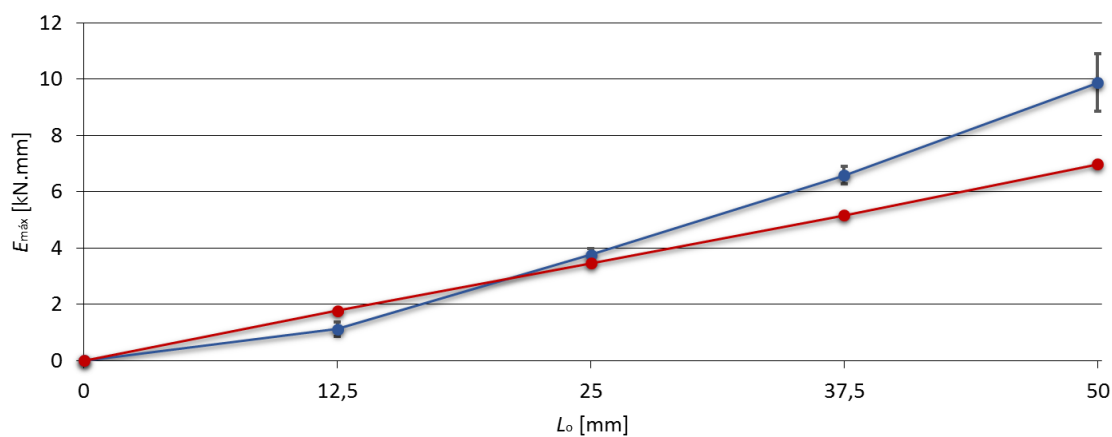
Adesivo 1: Araldite® AV138



Adesivo 2: Araldite® 2015



Adesivo 3: Sikaforce® 7752



Legenda:

—●— Experimental

—●— Numérico

Tabela 38: Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] do trabalho experimental e numérico, em função de L_o para as juntas de adesivo único.

	Adesivos	L_o [mm]	Experimental	Numérico	Diferença %
Adesivo 1	Araldite® AV138	12,5	0,6±0,1	0,7	16,7
		25	1,1±0,1	1,3	18,2
		37,5	1,6±0,1	1,9	18,8
		50	2,2±0,2	2,6	18,2
Adesivo 2	Araldite® 2015	12,5	1,2±0,1	1,4	16,7
		25	2,1±0,5	2,8	33,3
		37,5	4,1±0,1	5,0	22,0
		50	14,0±0,1	15,0	7,1
Adesivo 3	Sikaforce® 7752	12,5	1,1±0,3	1,8	63,6
		25	3,8±0,2	3,5	-7,9
		37,5	6,6±0,3	5,2	-21,2
		50	9,9±1,0	7,0	-29,3

Os valores de $E_{m\acute{a}x}$ para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas encontram-se representados na Figura 72. De uma forma geral, as juntas mistas com maior ductilidade apresentam elevados valores de $E_{m\acute{a}x}$.

Ao contrário do verificado no ponto 3.1.5.2, o valor de $E_{m\acute{a}x}$ mais elevado para $L_o=12,5$ mm é atribuído à utilização de juntas mistas com a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752. A utilização única do adesivo Araldite® AV138 regista o menor valor de $E_{m\acute{a}x}$ devido essencialmente ao seu reduzido deslocamento de rotura. As diferenças relativas da junta mais resistente (Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752) comparativamente às outras juntas são as seguintes:

- 19,0% → Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752;
- 38,9% → Sikaforce® 7752;
- 78,6% → Araldite® 2015;
- 127,3% → Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 257,1% → Araldite® AV138.

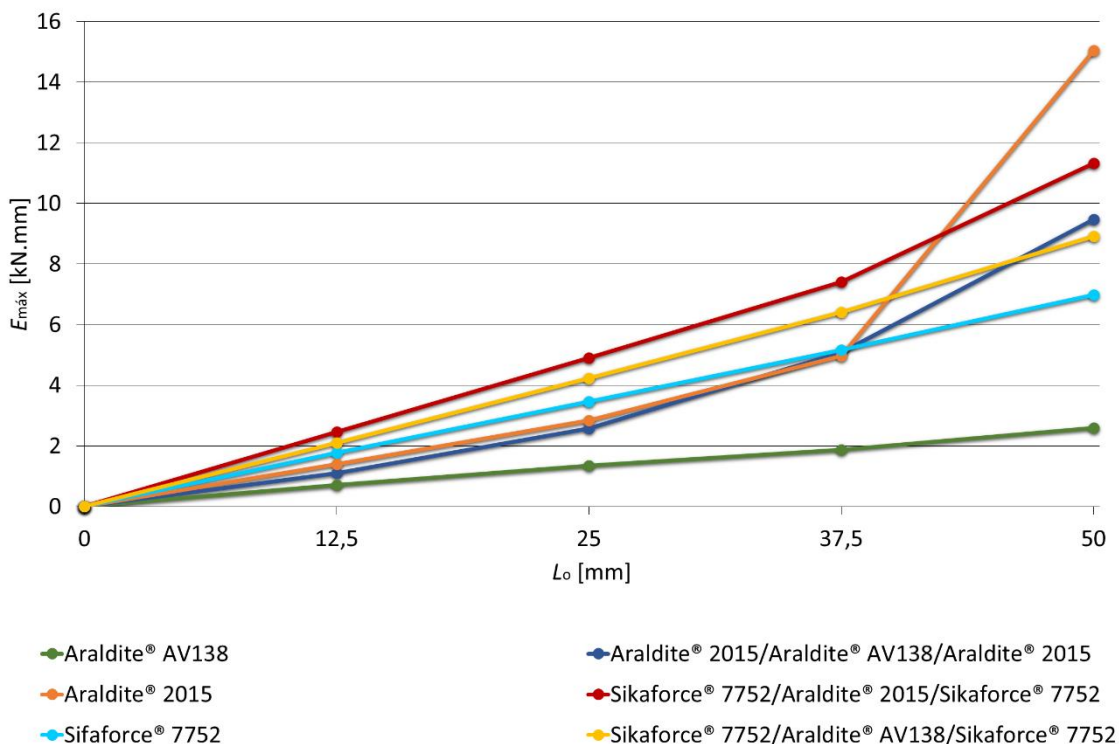


Figura 72: Valores de $E_{máx}$ [kN.mm] numéricos em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.

Para $L_o=25$ mm, a junta mista constituída pelos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 continua a registar o maior valor de $E_{máx}$. A partir deste L_o , o $E_{máx}$ da junta composta unicamente pelo adesivo Araldite® 2015, e da junta mista composta pelos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, começa a aumentar, devido à capacidade de plastificação do adesivo Araldite® 2015. A utilização única do adesivo Araldite® AV138 continua a registar o menor valor de $E_{máx}$. São registadas as seguintes diferenças percentuais entre cada configuração de junta e a configuração ótima:

- 16,7% → Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752;
- 40,0% → Sikaforce® 7752;
- 75,0% → Araldite® 2015;
- 88,5% → Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 276,9% → Araldite® AV138.

Para $L_o=37,5$ mm, a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 continua a registar o $E_{máx}$ mais elevado. Os valores de $E_{máx}$ das juntas constituídas apenas pelo adesivo Araldite® 2015 e pelo adesivo Sikaforce® 7752, e a junta mista Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015, encontram-se bastante próximos. Tal como nos casos anteriores, a junta constituída apenas pelo adesivo Araldite® AV138 apresenta o menor $E_{máx}$. A melhoria relativa da configuração ótima relativamente a cada uma das outras configurações é:

- 15,6% → Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752;
- 42,3% → Sikaforce® 7752;
- 45,1% → Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 48,0% → Araldite® 2015;
- 289,5% → Araldite® AV138.

Para $L_0=50$ mm, a utilização única do adesivo Araldite® 2015 regista o maior valor de $E_{máx}$. Este aumento acentuado de $E_{máx}$ deve-se ao aparecimento de fenómenos de plastificação nos aderentes. O aumento acentuado de $E_{máx}$ da junta mista Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 deve-se também a fenómenos de plastificação dos aderentes. Tal como nos casos anteriores, as juntas constituídas apenas pelo adesivo Araldite® AV138 apresentam o menor $E_{máx}$. A variação da junta composta unicamente pelo adesivo Araldite® 2015 relativamente a cada uma das restantes configurações é de seguida apresentada:

- 32,7% → Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752;
- 57,9% → Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015;
- 68,5% → Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752;
- 114,3% → Sikaforce® 7752;
- 476,9% → Araldite® AV138.

Apesar da existência de algumas variações de resultados entre o trabalho experimental e o numérico, de uma forma geral, os resultados numéricos de $E_{máx}$ encontram-se dentro do esperado. No caso das juntas de adesivo único, a maior diferença percentual registada foi de 63,6% ($L_0=12,5$ mm) para o adesivo Sikaforce® 7752, e a menor foi de -29,3% ($L_0=50$ mm) também para o adesivo Sikaforce® 7752.

No trabalho numérico, foram obtidas as seguintes diferenças percentuais das juntas mistas relativamente às juntas de adesivo único:

- Mínima = -40,7% para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 relativamente a uma junta com o adesivo Araldite® 2015 (para $L_0=50$ mm);
- Máxima = 334,6% para a configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 relativamente a uma junta com o adesivo Araldite® AV138 (para $L_0=50$ mm).

No trabalho experimental, foram obtidas as seguintes diferenças percentuais das juntas mistas relativamente às juntas de adesivo único:

- Mínima = -47,4% para a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 relativamente a uma junta com o adesivo Sikaforce® 7752 (para $L_0=25$ mm);

- Máxima = 386,4% para a configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752 relativamente a uma junta com o adesivo Araldite[®] AV138 (para $L_0=50$ mm).

3.2.8 Outras configurações

Este subcapítulo é dedicado ao estudo numérico da resistência das juntas com outras configurações de adesivos. Foram utilizados os adesivos RTV106 e DP8005 juntamente com os adesivos Araldite[®] AV138 e Araldite[®] 2015. Estes adesivos não foram estudados no trabalho experimental uma vez que apresentam menor resistência dos que os adesivos Araldite[®] AV138, Araldite[®] 2015 e Sikaforce[®] 7752. No entanto, achou-se relevante apresentar o estudo numérico dos mesmos, de forma a comparar a sua resistência com os adesivos estudados anteriormente. Foram consideradas as configurações:

- **Configuração 4:** RTV106/Araldite[®] AV138/RTV106;
- **Configuração 5:** DP8005/Araldite[®] AV138/DP8005;
- **Configuração 6:** RTV106/Araldite[®] 2015/RTV106;
- **Configuração 7:** DP8005/Araldite[®] 2015/DP8005.

As propriedades mecânicas e de fratura dos adesivos RTV106 e DP8005 são indicadas na Tabela 39.

Tabela 39: Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo RTV106 e DP8005 [94].

Propriedades	RTV106	DP8005
Módulo de Young, E [MPa]	1,6	590
Módulo de elasticidade transversal, G [MPa]	0,86	159
Resistência coesiva à tração, t_n^0 [MPa]	2,3	6,3
Resistência coesiva ao corte, t_s^0 [MPa]	1,97	8,4
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	2,73	1,1
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	5	6

3.2.8.1 Curvas $P-\delta$

Da Figura 73 à Figura 76 encontram-se representadas as curvas $P-\delta$ de cada configuração de adesivos, em função de L_0 .

As curvas $P-\delta$ correspondentes à configuração de adesivos RTV106/Araldite[®] AV138/RTV106 (Figura 73) mostram que o adesivo Araldite[®] AV138 é o primeiro adesivo a sofrer rotura, seguido do adesivo RTV106. Os elevados valores de δ do adesivo RTV106 mostram que este adesivo apresenta elevada plastificação. Em contrapartida, os valores

de $P_{\text{máx}}$ são inferiores, quando comparados com os observados na altura da rotura do adesivo Araldite® AV138.

A Figura 74 mostra as curvas P - δ da configuração de adesivos DP8005/Araldite® AV138/DP8005. Desde já, verifica-se um aumento acentuado de $P_{\text{máx}}$ do adesivo Araldite® AV138. Os deslocamentos do adesivo DP8005, quando comparados com os deslocamentos do adesivo RTV106, são inferiores, o que indica que o adesivo DP8005 é mais rígido do que o adesivo RTV106.

Na Figura 75 encontram-se representadas as curvas P - δ da configuração de adesivos RTV106/Araldite® 2015/RTV106. Esta configuração de adesivos, quando comparada com a configuração de adesivos RTV106/Araldite® AV138/RTV106, mostra um aumento de $P_{\text{máx}}$ para $37,5 \text{ mm} \leq L_0 \leq 50 \text{ mm}$. Os deslocamentos da rotura total das ligações são praticamente os mesmos.

As curvas P - δ da configuração de adesivos DP8005/Araldite® 2015/DP8005, representadas na Figura 76, mostram que esta combinação de adesivos apresenta maior resistência do que a configuração de adesivos RTV106/Araldite® 2015/RTV106 (Figura 75). No entanto, os deslocamentos da rotura total das ligações são menores.

Configuração 4: RTV106/Araldite® AV138/RTV106

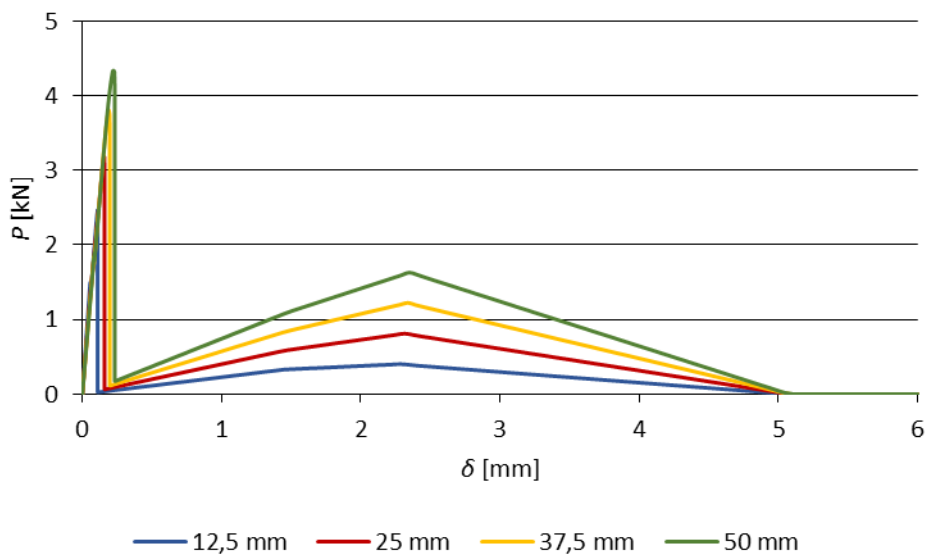
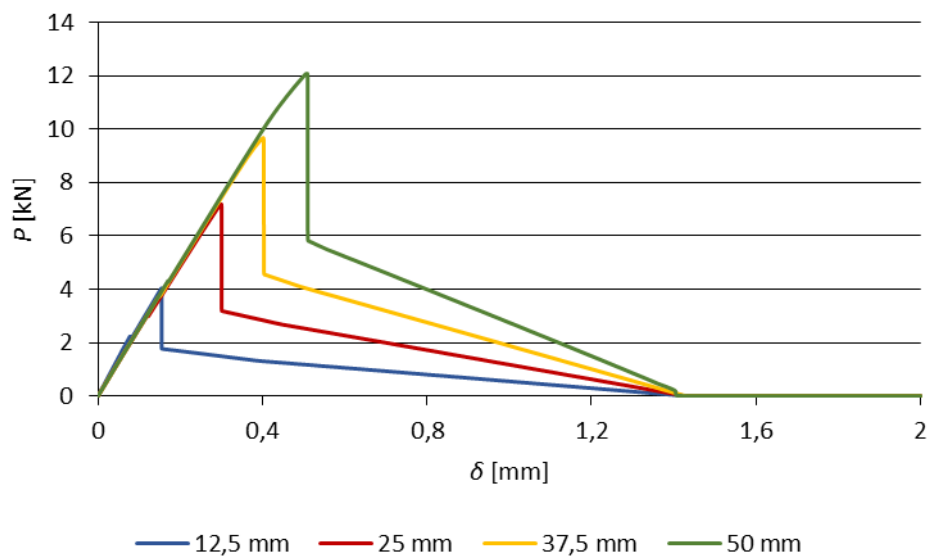
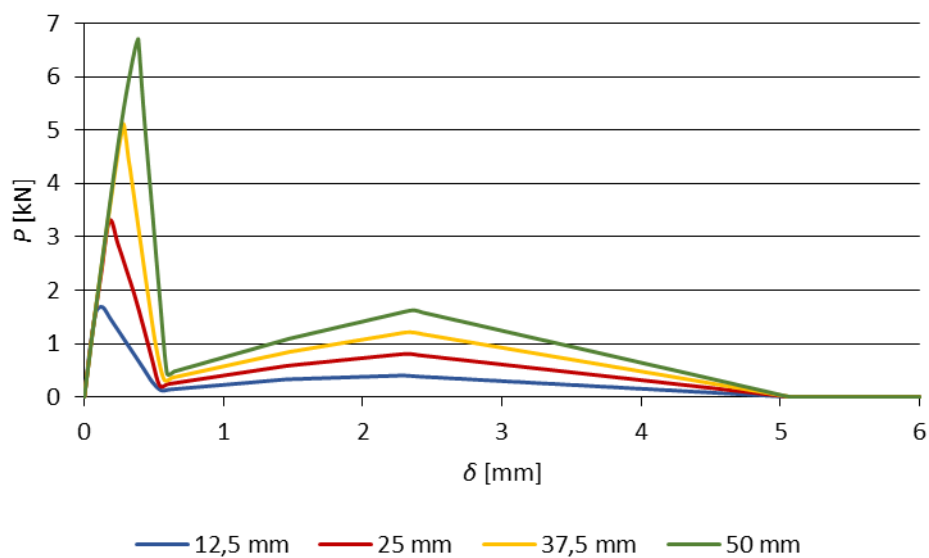


Figura 73: Curvas P - δ numéricas para a configuração de adesivos RTV106/Araldite® AV138/RTV106.

Configuração 5: DP8005/Araldite® AV138/DP8005Figura 74: Curvas P - δ numéricas para a configuração de adesivos DP8005/Araldite® AV138/DP8005.**Configuração 6: RTV106/Araldite® 2015/RTV106**Figura 75: Curvas P - δ numéricas para a configuração de adesivos RTV106/Araldite® 2015/RTV106.

Configuração 7: DP8005/Araldite® 2015/DP8005

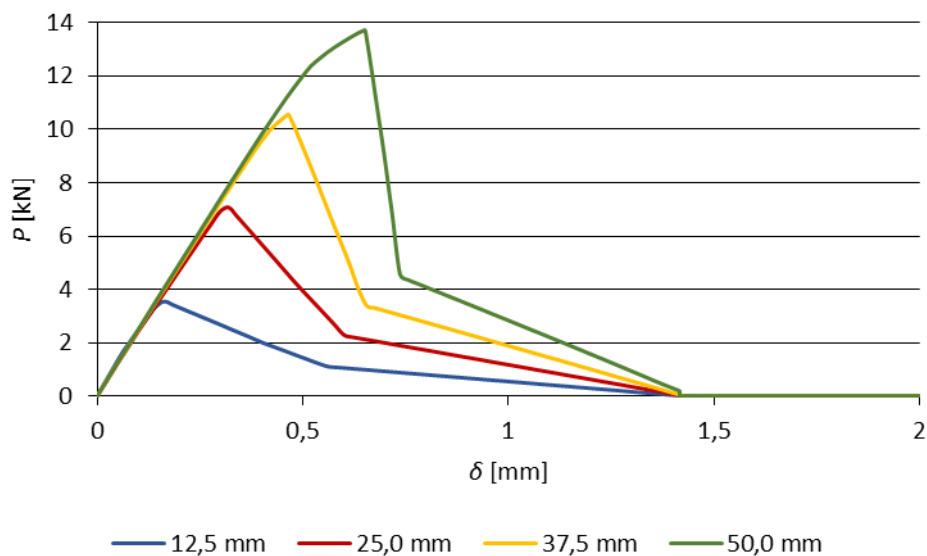


Figura 76: Curvas P - δ numéricas para a configuração de adesivos DP8005/Araldite® 2015/DP8005.

3.2.8.2 Resistência das juntas

A Figura 77 mostra os valores de $P_{\text{máx}}$ em função de L_o para as quatro configurações de adesivos.

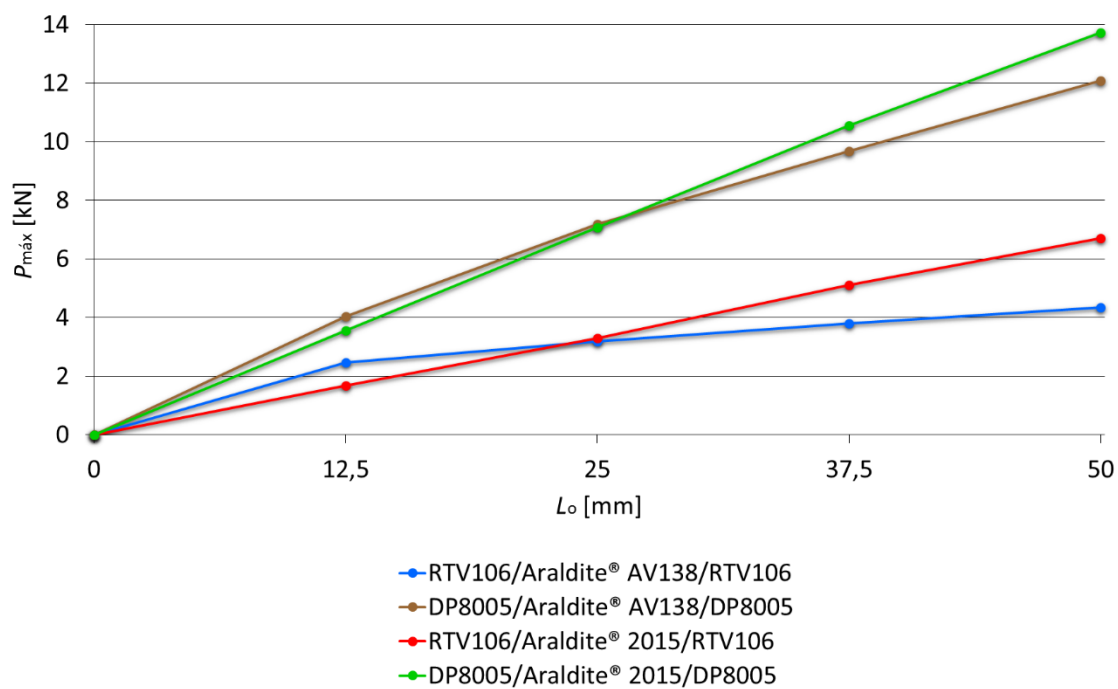


Figura 77: Valores de $P_{\text{máx}}$ [kN] em função de L_o para as quatro configurações de adesivos.

Na Tabela 40 são apresentados os valores de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para as quatro configurações de adesivos. As maiores resistências são atribuídas às configurações de adesivos DP8005/Araldite® 2015/DP8005 e DP8005/Araldite® AV138/DP8005.

Com as menores resistências encontram-se as configurações RTV106/Araldite® AV138/RTV106 e RTV106/Araldite® 2015/RTV106. Verifica-se assim que o adesivo DP8005 apresenta melhores características para este tipo de ligação do que o adesivo RTV106, promovendo o aumento da resistência da ligação.

Tabela 40: Valores de $P_{\text{máx}}$ [kN] em função de L_0 para as quatro configurações de adesivos.

Adesivos\ L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
RTV106 Araldite® AV138 RTV106	2,5	3,2	3,8	4,3
DP8005 Araldite® AV138 DP8005	4,0	7,2	9,7	12,1
RTV106 Araldite® 2015 RTV106	1,7	3,3	5,1	6,7
DP8005 Araldite® 2015 DP8005	3,5	7,1	10,6	13,7

A configuração de adesivos DP8005/Araldite® 2015/DP8005 apresenta o maior incremento de resistência em função de L_0 . O seu crescimento dá-se de forma acentuada, e apresenta a melhor resistência de junta para $37,5 \text{ mm} \leq L_0 \leq 50 \text{ mm}$. Esta configuração de adesivos apresenta a segunda melhor resistência para $12,5 \text{ mm} \leq L_0 \leq 25 \text{ mm}$. Quando comparada com a configuração de adesivos:

- ❖ DP8005/Araldite® AV138/DP8005 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -12,5% para $L_0=12,5 \text{ mm}$;
 - Máxima de 13,2% para $L_0=50 \text{ mm}$.
- ❖ RTV106/Araldite® AV138/RTV106 apresenta uma diferença:
 - Mínima de 40,0% para $L_0=12,5 \text{ mm}$;
 - Máxima de 218,6% para $L_0=50 \text{ mm}$.
- ❖ RTV106/Araldite® 2015/RTV106 apresenta uma diferença:
 - Mínima de 104,5% para $L_0=50 \text{ mm}$;
 - Máxima de 115,2% para $L_0=25 \text{ mm}$.

A configuração de adesivos DP8005/Araldite® AV138/DP8005 regista a melhor resistência de junta para $12,5 \text{ mm} \leq L_0 \leq 25 \text{ mm}$. Esta configuração de adesivos apresenta

a segunda maior resistência para $37,5 \text{ mm} \leq L_o \leq 50 \text{ mm}$. Quando comparada com a configuração de adesivos:

- ❖ DP8005/Araldite® 2015/DP8005 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -11,7% para $L_o=50 \text{ mm}$;
 - Máxima de 14,3% para $L_o=12,5 \text{ mm}$.
- ❖ RTV106/Araldite® AV138/RTV106 apresenta uma diferença:
 - Mínima de 60,0% para $L_o=12,5 \text{ mm}$;
 - Máxima de 181,4% para $L_o=50 \text{ mm}$.
- ❖ RTV106/Araldite® 2015/RTV106 apresenta uma diferença:
 - Mínima de 80,6% para $L_o=50 \text{ mm}$;
 - Máxima de 135,3% para $L_o=12,5 \text{ mm}$.

A utilização dos adesivos RTV106/Araldite® AV138/RTV106 é mais adequada para L_o reduzidos, nomeadamente para $L_o=12,5 \text{ mm}$. Para L_o elevados, a resistência das juntas com esta configuração de adesivos não é tão satisfatória. Quando comparada com a configuração de adesivos:

- ❖ DP8005/Araldite® 2015/DP8005 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -68,6% para $L_o=50 \text{ mm}$;
 - Máxima de -28,6% para $L_o=12,5 \text{ mm}$.
- ❖ DP8005/Araldite® AV138/DP8005 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -64,5% para $L_o=50 \text{ mm}$;
 - Máxima de -37,5% para $L_o=12,5 \text{ mm}$.
- ❖ RTV106/Araldite® 2015/RTV106 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -35,8% para $L_o=50 \text{ mm}$;
 - Máxima de 47,1% para $L_o=12,5 \text{ mm}$.

A junta mista composta pelos adesivos RTV106/Araldite® 2015/RTV106 apresenta a menor resistência de junta para $L_o=12,5 \text{ mm}$. Quando comparada com a configuração de adesivos:

- ❖ DP8005/Araldite® 2015/DP8005 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -53,5% para $L_o=25 \text{ mm}$;
 - Máxima de -51,1% para $L_o=50 \text{ mm}$.
- ❖ DP8005/Araldite® AV138/DP8005 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -57,5% para $L_o=12,5 \text{ mm}$;
 - Máxima de -44,6% para $L_o=50 \text{ mm}$.
- ❖ RTV106/Araldite® AV138/RTV106 apresenta uma diferença:
 - Mínima de -32,0% para $L_o=12,5 \text{ mm}$;
 - Máxima de 55,8% para $L_o=50 \text{ mm}$.

3.2.8.3 Comparação com resultados de adesivo único

Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas encontram-se representados na Figura 78. De uma forma geral, as juntas mistas com a configuração de adesivos RTV106/Araldite® AV138/RTV106 e RTV106/Araldite® 2015/RTV106 apresentam maior resistência do que as juntas compostas unicamente pelo adesivo RTV106.

As juntas mistas com a configuração de adesivos DP8005/Araldite® AV138/DP8005 e DP8005/Araldite® 2015/DP8005 também apresentam maior resistência do que as juntas compostas unicamente pelo adesivo DP8005. No entanto, as juntas compostas apenas pelo adesivo Araldite® 2015 apresentam maior resistência do que as juntas RTV106/Araldite® 2015/RTV106 e DP8005/Araldite® 2015/DP8005.

A utilização única do adesivo Araldite® AV138 registra maior resistência do que as juntas mistas para $L_o=12,5$ mm e $L_o=25$ mm, exceto para $L_o=37,5$ mm e $L_o=50$ mm, onde as juntas mistas apresentam melhores resultados. Também se observa que as juntas constituídas unicamente pelo adesivo Sikaforce® 7752 apresentam praticamente a mesma resistência das juntas DP8005/Araldite® 2015/DP8005 para $L_o=12,5$ mm e $L_o=25$ mm, e das juntas DP8005/Araldite® AV138/DP8005 para $12,5 \text{ mm} \leq L_o \leq 37,5$ mm.

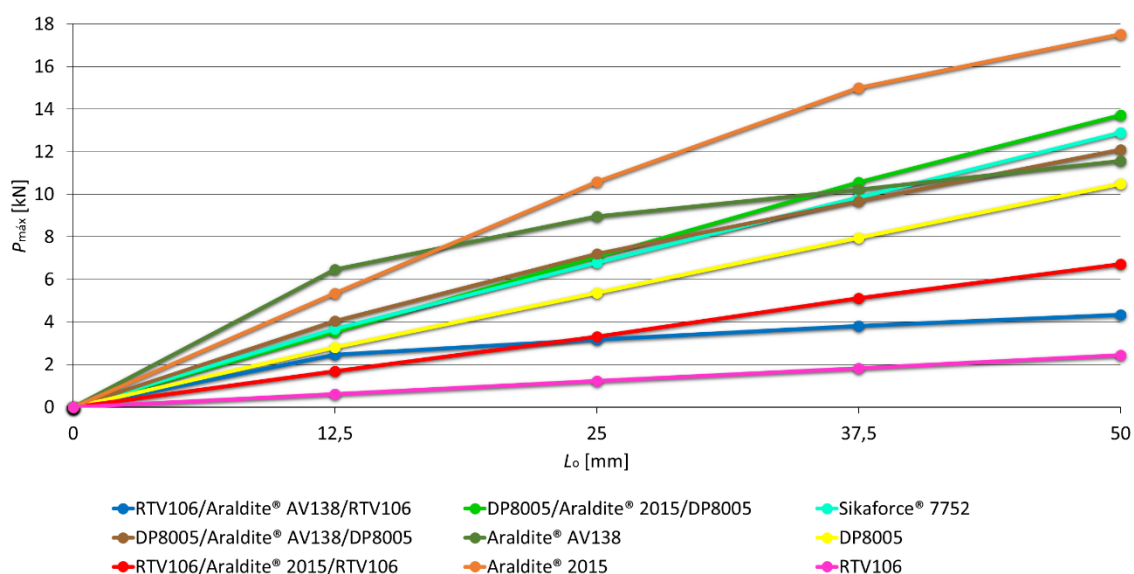


Figura 78: Valores $P_{m\acute{a}x}$ [kN] numéricos em função de L_o para as juntas de adesivo único e para as juntas mistas.

Na Tabela 41 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_o para as juntas com adesivo único. Verifica-se que os adesivos DP8005 e RTV106 apresentam menor resistência do que os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

Tabela 41: Valores de $P_{\text{máx}}$ [kN] em função de L_0 para as juntas de adesivo único.

Adesivos \ L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	6,5	9,0	10,2	11,6
Araldite® 2015	5,3	10,6	15,0	17,5
Sikaforce® 7752	3,7	6,8	9,9	12,9
DP8005	2,8	5,4	7,9	10,5
RTV106	0,6	1,2	1,8	2,4

A análise da Figura 78 mostra que, para:

- ❖ **$L_0=12,5$ mm:** $P_{\text{máx}} \rightarrow$ **Araldite® AV138**. As diferenças relativas da junta mais resistente (Araldite® AV138) comparativamente às outras juntas são as seguintes:
 - 22,6% \rightarrow Araldite® 2015;
 - 62,5% \rightarrow DP8005/Araldite® AV138/DP8005;
 - 75,7% \rightarrow Sikaforce® 7752;
 - 85,7% \rightarrow DP8005/Araldite® 2015/DP8005;
 - 132,1% \rightarrow DP8005;
 - 160,0% \rightarrow RTV106/Araldite® AV138/RTV106;
 - 282,4% \rightarrow RTV106/Araldite® 2015/RTV106;
 - 983,3% \rightarrow RTV106.

- ❖ **$L_0=25$ mm:** $P_{\text{máx}} \rightarrow$ **Araldite® 2015**. São registadas diferenças percentuais entre cada configuração de junta e a configuração ótima:
 - 17,8% \rightarrow Araldite® AV138;
 - 47,2% \rightarrow DP8005/Araldite® AV138/DP8005;
 - 49,3% \rightarrow DP8005/Araldite® 2015/DP8005;
 - 55,9% \rightarrow Sikaforce® 7752;
 - 96,3% \rightarrow DP8005;
 - 221,2% \rightarrow RTV106/Araldite® 2015/RTV106;
 - 231,3% \rightarrow RTV106/Araldite® AV138/RTV106;
 - 783,3% \rightarrow RTV106.

- ❖ **$L_0=37,5$ mm: $P_{\text{máx}}$ → Araldite® 2015.** A melhoria relativa da configuração ótima relativamente a cada uma das outras configurações é:
- 41,5% → DP8005/Araldite® 2015/DP8005;
 - 47,1% → Araldite® AV138;
 - 51,5% → Sikaforce® 7752;
 - 54,6% → DP8005/Araldite® AV138/DP8005;
 - 89,9% → DP8005;
 - 194,1% → RTV106/Araldite® 2015/RTV106;
 - 294,7% → RTV106/Araldite® AV138/RTV106;
 - 733,3% → RTV106.
- ❖ **$L_0=50$ mm: $P_{\text{máx}}$ → Araldite® 2015.** A variação da junta composta unicamente pelo adesivo Araldite® 2015 relativamente a cada uma das restantes configurações é de seguida apresentada:
- 27,7% → DP8005/Araldite® 2015/DP8005;
 - 35,7% → Sikaforce® 7752;
 - 44,6% → DP8005/Araldite® AV138/DP8005;
 - 50,9% → Araldite® AV138;
 - 66,7% → DP8005;
 - 161,2% → RTV106/Araldite® 2015/RTV106;
 - 307,0% → RTV106/Araldite® AV138/RTV106;
 - 629,2% → RTV106.

**CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE
TRABALHOS FUTUROS**

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação consistiu no estudo numérico e experimental de juntas adesivas em degrau compostas por dois adesivos em substratos de alumínio. O estudo residiu na previsão do comportamento das juntas, nomeadamente na previsão da resistência, no cálculo de $E_{m\acute{a}x}$ e na comparação de resultados com juntas de adesivo único. Foram utilizadas várias configurações de adesivos, compostas pelos adesivos Araldite[®] AV138, Araldite[®] 2015, Sikaforce[®] 7752, DP8005 e RTV106.

No trabalho experimental, conclui-se que o tipo de adesivo ou combinação de adesivos utilizados na ligação afeta de forma significativa o desempenho da ligação. Apesar das juntas mistas representarem uma das técnicas de aumento da resistência das ligações adesivas, a sua utilização só é favorável em casos particulares, uma vez que a combinação de dois adesivos pode conferir ou retirar a resistência da ligação consoante o L_o . Com este tipo de juntas foi obtido um ganho na resistência de 42,6% relativamente às juntas de adesivo único. No entanto, foi registado uma perda na resistência de 44,4% relativamente as juntas de adesivo único.

Relativamente ao $E_{m\acute{a}x}$ das juntas, de uma forma geral as juntas mistas apresentam maiores valores de $E_{m\acute{a}x}$ quando comparadas com as juntas de adesivo único. Adesivos com baixa rigidez e elevada ductilidade originam deslocamentos até à rotura mais elevados. Estes deslocamentos influenciam as áreas das curvas $P-\delta$. Maiores deslocamentos provocam maiores áreas das curvas $P-\delta$, o que se traduz em valores de $E_{m\acute{a}x}$ elevados. A plastificação dos aderentes também provoca o aumento de $E_{m\acute{a}x}$. Adesivos com baixa ductilidade, quando combinados com adesivos de ductilidade moderada ou elevada, sofrem aumentos significativos de $E_{m\acute{a}x}$, uma vez que é aumentado o deslocamento de rotura da ligação.

O trabalho numérico focou-se sobretudo na análise de tensões nas juntas, no estudo da variável de dano e na comparação dos resultados numéricos com os experimentais. O estudo da análise de tensões foi dividido em duas partes: estudo das tensões σ_y e tensões τ_{xy} . Nas tensões σ_y , foi concluído que os picos de concentrações de tensões estão localizados nas extremidades das juntas e nas transições entre degraus. Verificou-se também que os picos de tensão nas extremidades das juntas são de tração e, nas transições entre degraus, de compressão e de tração. Constatou-se também que o aumento de L_o aumenta os picos de tensão tanto à tração como à compressão. A escolha do tipo de adesivo também influencia os picos de tensão da ligação. A utilização de um adesivo de ductilidade elevada nos degraus exteriores, como o adesivo Sikaforce[®] 7752,

reduz os picos de tensão nas extremidades da ligação. A utilização de um adesivo frágil no centro da junta, como o adesivo Araldite® AV138, promove o aumento dos picos de tensão nas transições entre degraus. Relativamente às tensões τ_{xy} , as distribuições de tensões variam significativamente em cada um dos três degraus. Tal como nas JSS, os picos de tensões são mais elevados nas extremidades da sobreposição. Nas transições entre degraus, os dois degraus externos apresentam menores picos de tensão τ_{xy} do que o degrau interno, embora essa variação não seja muito acentuada. Também se verifica que o aumento de L_o promove o aumento dos picos de tensão τ_{xy} . Caso seja utilizado um adesivo frágil, estas alterações nas tensões ao longo da ligação podem afetar severamente o desempenho da ligação. A falha pode ocorrer quando for atingido $P_{m\acute{a}x}$ no ponto mais carregado do comprimento de ligação, ponto este que se situa nas extremidades da ligação. Caso seja utilizado um adesivo dúctil, estes fenómenos deixam de ser críticos, devido à elevada capacidade de plastificação destes adesivos quando atingidas as tensões de pico. A utilização de um adesivo de ductilidade elevada nos dois degraus externos reduz os picos de tensão τ_{xy} nas extremidades dos três degraus. A utilização de um adesivo rígido no centro da junta promove o aumento dos picos de tensão τ_{xy} nas extremidades dos três degraus.

O estudo da variável de dano consistiu na análise do dano para $P_{m\acute{a}x}$ e na evolução do dano com o carregamento aplicado. No dano para $P_{m\acute{a}x}$ conclui-se que o aumento de L_o provoca o aumento do dano, nomeadamente nos degraus interiores. Este dano ocorre essencialmente devido à concentração de tensões. Verificou-se também que os picos de dano mais elevados se localizam no degrau interior e nas extremidades da ligação. Os adesivos mais frágeis apresentam maior dano, devido à sua falta de capacidade de plastificação, o que se traduz numa perda de resistência da ligação. Na evolução do dano com o carregamento aplicado conclui-se que aumento de L_o provoca o aumento da antecipação do dano e a diminuição do rácio correspondente ao dano máximo. Estes efeitos estão relacionados com a força necessária para promover a rotura da ligação. Maiores L_o necessitam de maiores forças de rotura, o que se traduz em tensões mais elevadas.

Relativamente à resistência das juntas, conclui-se que a configuração de adesivos Araldite® 2015/Araldite® AV138/Araldite® 2015 apresenta a maior resistência de junta. A configuração de adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® 2015/Sikaforce® 7752 apresenta o maior incremento de resistência em função de L_o . A utilização destes adesivos promove um maior desempenho das juntas para L_o elevados. Contudo, os baixos valores de $P_{m\acute{a}x}$ para baixos valores de L_o faz desta configuração de adesivos a menos resistente para $L_o=12,5$ mm. A utilização dos adesivos Sikaforce® 7752/Araldite® AV138/Sikaforce® 7752 é mais adequada para baixos valores de L_o . Para valores de L_o elevados, a resistência das juntas com esta configuração de adesivos não é tão satisfatória. Foi obtido um ganho na resistência de 64,9%, e uma perda de 36,9% relativamente às juntas de adesivo único.

As diferenças percentuais máximas de $P_{m\acute{a}x}$ entre o trabalho numérico e o experimental para as juntas mistas, foram de:

- 15,1% para a configuração de adesivos Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015;
- 17,1% para a configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752;
- 5,5% para a configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752.

No que diz respeito $E_{m\acute{a}x}$ ao das juntas, verificou-se que o aumento de L_0 promove o aumento de $E_{m\acute{a}x}$. Os valores de $E_{m\acute{a}x}$ mais elevados foram registados para a configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752. Conclui-se que adesivos com elevada capacidade de redistribuição de tensões combinados com adesivos de ductilidade elevada, como é o caso dos adesivos Araldite[®] 2015 e Sikaforce[®] 7752, originam $E_{m\acute{a}x}$ elevados. Em contrapartida, a utilização de dois adesivos com módulos de elasticidade elevados origina baixos valores de $E_{m\acute{a}x}$, como é o caso da combinação dos adesivos Araldite[®] AV138 e Araldite[®] 2015. As diferenças máximas percentuais de $E_{m\acute{a}x}$, entre o trabalho numérico e o experimental para as juntas mistas, foram de:

- 57,1% para a configuração de adesivos Araldite[®] 2015/Araldite[®] AV138/Araldite[®] 2015;
- 47,1% para a configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] 2015/Sikaforce[®] 7752;
- 16,7% para a configuração de adesivos Sikaforce[®] 7752/Araldite[®] AV138/Sikaforce[®] 7752.

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

- Identificação dos caminhos de rotura experimentalmente;
- Estudo da resistência das juntas à flexão;
- Estudo com substratos de outros materiais (aço, compósito, polímero,);
- Estudo com substratos de materiais diferentes (alumínio com compósito, alumínio com polímero, aço com alumínio, ...);
- Influência da temperatura e/ou variação de temperatura na resistência das juntas;
- Estudo numérico com outros modelos de dano.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Petrie, E.M. (2000). *Handbook of Adhesives and Sealants*. United States of America: R. R. Donnelley & Sons Company. ISBN 0-07-049888-1.
2. da Silva, L.F.M., de Magalhães, A.G. & de Moura, M.F.S.F. (2007). *Juntas adesivas estruturais*. Porto: Publindústria. ISBN 978-972-8953-21-8.
3. Sharpe, L.H. (1998). *Some fundamental issues in adhesion: A conceptual view*. The Journal of Adhesion, **67** (1-4), pp. 277-289.
4. Pinto, A.M.G. (2007). *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
5. de Moura, M.F.S.F., de Moraes, A.B. & de Magalhães, A.G. (2011). *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2.^a Edição. Porto: Publindústria. ISBN 978-972-8953-00-3.
6. Kinloch, A.J. (1987). *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. London: Chapman & Hall. ISBN 0-412-27440-X.
7. Désagulier, C. (2011). *Aerospace Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, da Silva, L.F.M., Öchsner, A. & Adams, R.D., Editors. Springer. ISBN 978-3-642-01168-9.
8. Hart-Smith, L.J. (2011). *Adhesively Bonded Joints in Aircraft Structures*, in *Handbook of Adhesion Technology*, da Silva, L.F.M., Öchsner, A. & Adams, R.D., Editors. Springer. ISBN 978-3-642-01168-9.
9. Cognard, P. (2005). *ADHESIVES AND SEALANTS: Basic Concepts and High Tech Bonding - Handbook of Adhesives and Sealants, Volume 1*. Versailles, France: Elsevier. ISBN 0-08-044554-3.
10. Burchardt, B. (2011). *Automotive Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, da Silva, L.F.M., Öchsner, A. & Adams, R.D., Editors. Springer. ISBN 978-3-642-01168-9.
11. Adams, R.D. (2005). *Adhesive bonding: Science, technology and applications*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited. ISBN 1-85573-741-8.
12. Boutar, Y., et al. (2017). *Characterization of aluminium one-component polyurethane adhesive joints as a function of bond thickness for the automotive industry: Fracture analysis and behavior*. Engineering Fracture Mechanics, **177**, pp. 45-60.
13. Davies, P. (2011). *Marine Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, da Silva, L.F.M., Öchsner, A. & Adams, R.D., Editors. Springer. ISBN 978-3-642-01168-9.
14. Suzuki, Y. (2011). *Railway Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, da Silva, L.F.M., Öchsner, A. & Adams, R.D., Editors. Springer. ISBN 978-3-642-01168-9.

15. Hartung, I. & Boehm, S. (2011). *Civil Construction*, in *Handbook of Adhesion Technology*, da Silva, L.F.M., Öchsner, A. & Adams, R.D., Editors. Springer. ISBN 978-3-642-01168-9.
16. Jung, S.-B. & Kim, J.-W. (2011). *Electrical Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, da Silva, L.F.M., Öchsner, A. & Adams, R.D., Editors. Springer. ISBN 978-3-642-01168-9.
17. Martín-Martínez, J.M. (2011). *Shoe Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, da Silva, L.F.M., Öchsner, A. & Adams, R.D., Editors. Springer. ISBN 978-3-642-01168-9.
18. Katsiropoulos, C.V., et al. (2012). *Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive*. *Composites Part B: Engineering*, **43** (2), pp. 240-248.
19. Adams, R.D., Comyn, J. & Wake, W.C. (1997). *Structural Adhesive Joints in Engineering. Second Edition*. Great Britain: Chapman & Hall. ISBN 0-412-70920-1.
20. Volkersen, O. (1938). *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschquerschnitten*. *Luftfahrtforschung*, **15**, pp. 41-47.
21. Adams, R.D. & Peppiatt, N.A. (1974). *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *Journal of Strain Analysis*, **9**, pp. 185-196.
22. Harris, J.A. & Adams, R.D. (1984). *Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **4** (2), pp. 65-78.
23. Sosa, J.L.C. & Karapurath, N. (2012). *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. *Composites Science and Technology*, **72** (7), pp. 788-791.
24. Goland, M. & Reissner, E. (1944). *The stresses in cemented joints*. *Journal of Applied Mechanics*, **66**, pp. 17-27.
25. Panigrahi, S.K. & Pradhan, B. (2007). *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **26** (2), pp. 183-201.
26. Williams, M.L. (1959). *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **49** (2), pp. 199-204.
27. Fernlund, G. & Spelt, J.K. (1991). *Failure load prediction*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **11** (4), pp. 213-227.
28. Barenblatt, G.I. (1959). *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, **23** (3), pp. 622-636.
29. Hansen, P.F. & Jensen, H.M. (2004). *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. *Engineering Fracture Mechanics*, **71** (15), pp. 2125-2142.
30. Ji, G., et al. (2010). *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, **47** (18), pp. 2445-2458.
31. da Silva, L.F.M. & Campilho, R.D.S.G. (2012). *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*. Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-23607-5.

32. Yang, Q.D. & Thouless, M.D. (2001). *Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, **110** (2), pp. 175–187.
33. Khoramishad, H., et al. (2010). *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, **32** (7), pp. 1146-1158.
34. Daudeville, L. & Ladevèze, P. (1993). *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, **25** (1), pp. 547-555.
35. Voyiadjis, G.Z. & Kattan, P.I. (2005). *Damage Mechanics*. New York: Marcell Dekker.
36. Shenoy, V., et al. (2010). *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, **77** (7), pp. 1073–1090.
37. Mohammadi, S. (2008). *Extended finite element method for fracture analysis of structures*. New Jersey: Blackwell Publishing. ISBN 978-1-4051-7060-4.
38. Belytschko, T. & Black, T. (1999). *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal of Fracture Mechanics, **45** (5), pp. 601–620.
39. Moës, N., Dolbow, J. & Belytschko, T. (1999). *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods Engineering, **46** (1), pp. 131–150.
40. Campilho, R.D.S.G., et al. (2011). *Extended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, **50** (4), pp. 1543-1549.
41. Ribeiro, N.F.Q.R. (2012). *Efeito de alterações geométricas na resistência de juntas de sobreposição*. Tese de mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
42. Chaves, F.J.P., da Silva, L.F.M. & Castro, P.M.S.T. (2008). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L*. Journal of Materials: Design and Applications, **222**, pp. 159-174.
43. Tsai, M.Y. & Morton, J. (1995). *The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints*. Composite Structures, **32** (1), pp. 123-131.
44. Cheuk, P.T. & Tong, L. (2002). *Failure of adhesive bonded composite lap shear joints with embedded precrack*. Composites Science and Technology, **62** (7), pp. 1079-1095.
45. Rispler, A.R., et al. (2000). *Shape optimisation of adhesive fillets*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **20** (3), pp. 221-231.
46. Mortensen, F. & Thomsen, O.T. (2002). *Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach*. Composites Science and Technology, **62** (7), pp. 1011-1031.
47. You, M., et al. (2003). *Effect of metal as part of fillet on the tensile shear strength of adhesively bonded single lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **23** (5), pp. 365-369.
48. Kress, G., et al. (2006). *The onsert: A new joining technology for sandwich structures*. Composite Structures, **73** (2), pp. 196-207.

49. Kaye, R.H. & Heller, M. (2002). *Through-thickness shape optimisation of bonded repairs and lap-joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **22** (1), pp. 7-21.
50. Hu, F.Z. & Soutis, C. (2000). *Strength prediction of patch-repaired CFRP laminates loaded in compression*. Composites Science and Technology, **60** (7), pp. 1103-1114.
51. Haghani, R., Al-Emrani, M. & Kliger, R. (2009). *Effects of geometrical modifications on behavior of adhesive joints used to bond CFRP laminates to steel members - experimental investigation*. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
52. Vallée, T. & Keller, T. (2006). *Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part III: Effects of chamfers*. Composites Part B: Engineering, **37** (4), pp. 328-336.
53. Ganesh, V.K. & Choo, T.S. (2002). *Modulus Graded Composite Adherends for Single-Lap Bonded Joints*. Journal of Composite Materials, **36** (14), pp. 1757-1767.
54. da Silva, L.F.M. & Lopes, M.J.C.Q. (2009). *Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **29** (5), pp. 509-514.
55. Bauwens-Crowet, C. (1973). *The compression yield behaviour of polymethyl methacrylate over a wide range of temperatures and strain-rates*. Journal of Materials Science, **8** (7), pp. 968-979.
56. Öz, Ö. & Özer, H. (2017). *An experimental investigation on the failure loads of the mono and bi-adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, **31** (19-20), pp. 2251-2270.
57. Ichikawa, K., Shin, Y. & Sawa, T. (2008). *A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **28** (8), pp. 464-470.
58. Ávila, A.F. & Bueno, P.n.d.O. (2004). *An experimental and numerical study on adhesive joints for composites*. Composite Structures, **64** (3), pp. 531-537.
59. Andrés, L. (2013). *Functionally graded joints by dielectric heating*. Tese de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
60. Kumar, S. & Scanlan, J.P. (2013). *On axisymmetric adhesive joints with graded interface stiffness*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **41**, pp. 57-72.
61. Stapleton, S.E., Waas, A.M. & Arnold, S.M. (2012). *Functionally graded adhesives for composite joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **35**, pp. 36-49.
62. Sancaktar, E. & Lawry, P.O. (1980). *A photoelastic study of the stress distribution in adhesively bonded joints with prebent adherends*. Journal of Adhesion, **11** (3), pp. 233-241.
63. Azevedo, J.C.S.A. (2014). *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Noched Flexure (ENF)*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
64. *ASTM-E8M-04 (2004). Standard test methods for tension testing of metallic materials [Metric]*.

65. Campilho, R.D.S.G., et al. (2013). *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **44**, pp. 48-56.
66. Neto, J.A.B.P., Campilho, R.D.S.G. & da Silva, L.F.M. (2012). *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **37**, pp. 96-101.
67. Faneco, T.M.d.S. (2014). *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
68. Campilho, R.D.S.G. (2012). *Método de Elementos Finitos: Ferramentas para Análise Estrutural*. Porto: Publindústria. ISBN 978-989-723-028-8.
69. Ribeiro, T.E.A., et al. (2016). *Damage analysis of composite-aluminium adhesively-bonded single-lap joints*. Composite Structures, **136**, pp. 25-33.
70. Pinto, A.M.G., et al. (2009). *Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, **85** (6), pp. 351-376.
71. Alfano, G. & Crisfield, M.A. (2001). *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, **50** (7), pp. 1701-1736.
72. Allix, O. & Corigliano, A. (1996). *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, **77** (2), pp. 111-140.
73. Chandra, N., et al. (2002). *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, **39** (10), pp. 2827-2855.
74. Chen, J. (2002). *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, **15** (5), pp. 429-442.
75. Kafkalidis, M.S. & Thouless, M.D. (2002). *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, **39** (17), pp. 4367-4383.
76. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, I.A. Ashcroft. (2006). *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, **141** (1-2), pp. 147-161.
77. Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. & Domingues, J.J.M.S. (2008). *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, **45** (5), pp. 1497-1512.
78. Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. & Domingues, J.J.M.S. (2005). *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, **65** (13), pp. 1948-1958.
79. Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. & Domingues, J.J.M.S. (2009). *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **29** (2), pp. 195-205.
80. Pocius, A.V. (2002). *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction. 2nd Edition*. Hanser. ISBN: ISBN-10: 1569903190; ISBN-13: 978-1569903193.

81. Campilho, R.D.S.G. (2005). *Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos*. Tese de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
82. Andersson, T. & Stigh, U. (2004). *The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, **41** (2), pp. 413-434.
83. Leffler, K., Alfredsson, K.S. & Stigh, U. (2007). *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, **44** (2), pp. 530-545.
84. Hogberg, J.L. & Stigh, U. (2006). *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, **73** (16), pp. 2541-2556.
85. Campilho, R.D.S.G., et al. (2011). *Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, **25** (18), pp. 2351-2368.
86. Campilho, R.D.S.G., et al. (2011). *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **31** (5), pp. 363-372.
87. Moura, M.F.S.F., et al. (2008). *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **28** (8), pp. 419-426.
88. Marques, E.A.S. & Da Silva, L.F.M. (2008). *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **84**, pp. 917-936.
89. Campilho, R.D.S.G., et al. (2009). *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **29** (6), pp. 678-686.
90. Darwish, S.M.H. & Ghanya, A. (2000). *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, **105** (3), pp. 221-229.
91. de Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G. & Gonçalves, J.P.M. (2008). *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, **68** (10-11), pp. 2224-2230.
92. Zhao, B., Lu, Z.-H. & Lu, Y.-N. (2014). *Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints—Variational method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **49**, pp. 115-126.
93. Silva, J.O.S. (2018). *Estudo de juntas adesivas em degrau: análise experimental e numérica por modelos de dano coesivo*. Tese de mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
94. Silva, M.R.G. (2015). *Impact Of Mixed Adhesive Joints For The Automotive Industry*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

