



Validação de envelopes de fratura de adesivos obtidos em ensaios de fratura em modo misto para a previsão de resistência de juntas de modo misto

JOSÉ PEDRO SILVA MOREIRA BARROS RIBEIRO

Outubro de 2017

VALIDAÇÃO DE ENVELOPES DE FRATURA DE ADESIVOS OBTIDOS EM ENSAIOS DE FRATURA EM MODO MISTO PARA A PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS DE MODO MISTO

José Pedro Silva Moreira Barros Ribeiro

1120523

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



VALIDAÇÃO DE ENVELOPES DE FRATURA DE ADESIVOS OBTIDOS EM ENSAIOS DE FRATURA EM MODO MISTO PARA A PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS DE MODO MISTO

José Pedro Silva Moreira Barros Ribeiro

1120523

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.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Ao Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Orientador Científico da presente dissertação, pela sua dedicação, disponibilidade e incentivo que apresentou durante a realização desta dissertação.

À minha família e amigos por todos o suporte e incentivo, em particular ao Filipe Viana por termos partilhado esta etapa.

Ao ISEP por conceder as bases necessárias à realização desta dissertação.

PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas, mecânica da fratura, propagação de dano, envelope de fratura.

RESUMO

As juntas adesivas têm tido um enorme crescimento em aplicações industriais em detrimento dos métodos tradicionais como a soldadura, brasagem e ligações aparafusadas e rebitadas. A maior utilização das juntas adesivas deve-se às vantagens que estas oferecem, como facto de serem mais leves, por se comportarem bem sob cargas cíclicas ou de fadiga, por possibilitarem a ligação de materiais diferentes e por apresentarem menores concentrações de tensões. No projeto de estruturas adesivas, é extremamente importante conseguir prever com precisão a sua resistência mecânica e respetivas propriedades de fratura (taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração, G_{IC} , e corte, G_{IIC}). Estas propriedades estão diretamente relacionadas com a Mecânica da Fratura e são estimadas através de uma análise energética. Para este efeito, distinguem-se três tipos de modelos: modelos que necessitam da medição do comprimento de fenda durante a propagação do dano, modelos que utilizam um comprimento de fenda equivalente e métodos baseados no integral J . Na maioria dos casos relativos a juntas adesivas, as solicitações ocorrem em modo misto (combinação de tração e corte). Como tal, é de grande importância a perceção da fratura nestas condições, nomeadamente das taxas de libertação de energia relativamente a diferentes critérios ou envelopes de fratura. Esta comparação permite, por exemplo, averiguar qual o melhor critério energético de rotura a utilizar em modelos numéricos baseados em Modelos de Dano Coesivo.

O principal objetivo desta dissertação é verificar, através de métodos numéricos por modelos de dano coesivo, qual o parâmetro que mais se adequa para o critério energético de propagação de dano de juntas de sobreposição simples (JSS) e dupla (JSD) com substratos de alumínio e coladas com três diferentes adesivos. Dos três adesivos um é frágil, um é moderadamente dúctil e outro é dúctil. Após a verificação numérica de qual o parâmetro energético que mais se adequa a cada um dos adesivos, os valores obtidos experimentalmente para a força máxima ($P_{máx}$) que a junta suportou irão ser comparados com os valores obtidos numericamente. Após a comparação dos valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente, verificou-se que curva de valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente mais se assemelhava aos obtidos numericamente e qual o critério energético correspondente a essa curva. Como, para os três adesivos, os critérios energéticos resultantes do trabalho experimental coincidiram com os resultantes do trabalho numérico, validaram-se os envelopes de fratura.

KEYWORDS

Adhesive joints, fracture mechanics, propagation of damage, fracture envelope.

ABSTRACT

Adhesive joints have seen tremendous growth in industrial applications over conventional methods such as welding, brazing, bolted and riveted connections. The greater use of adhesive joints is due to their advantages, such as the weight reduction, good fatigue behavior, connection of different materials and smaller stress concentrations. In the design of adhesive structures, it is extremely important to accurately predict their mechanical strength and fracture properties (critical strain energy release in tension, G_{IC} , and shear, G_{IIC}). These properties are directly related to Fracture Mechanics and are estimated through an energy analysis. For this purpose, three types of models are distinguished: models that require the measurement of the crack length during damage propagation, models that use an equivalent crack length and methods based on the J integral. In most of cases related with adhesive joints, the loads occur in mixed mode (combination of tension and shear). Thus, it is of great importance the perception of fracture in these conditions, namely of the strain energy release rates relative to different criteria or fracture envelopes. This comparison allows, for example, to determine the best suited energetic criterion to be used in numerical models based on Cohesive Damage Models.

The main objective of this dissertation is to verify, with numerical methods by cohesive zone models, which is the parameter that best suits the energetic criterion of damage propagation in single-lap joints (JSS) and double-lap joints (JSD) with aluminum adherends and bonded with three different adhesives. Of the three adhesives is brittle, one is moderately ductile and another is ductile. After the numerical verification of which energy parameter best suits each of the adhesives, the values obtained experimentally for the maximum force ($P_{m\acute{a}x}$) that the joint supported will be compared with the numerical values. After comparing the values of $P_{m\acute{a}x}$ obtained experimentally with those obtained numerically, it was verified which curve of $P_{m\acute{a}x}$ values obtained experimentally more resembled those obtained numerically and which energy criterion corresponds to that curve. For the three adhesives, the energetic criteria resulting from the experimental work matched with those resulting from the numerical work and, thus, the fracture envelopes were validated.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
4ENF	<i>Four-point End-Notched Flexure</i>
ADCB	<i>Asymmetric Double-Cantilever Beam</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Desenho assistido por computador
CBBM	<i>Compliance-Based Beam Method</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CLS	<i>Crack-Lap Shear</i>
CZM	<i>Cohesive Zone Model</i>
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
FRMM	<i>Fixed Ratio Mixed-Mode</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JCI	Junta de chanfro interior
JD	Junta em degrau
JSD	Junta sobreposição dupla

JSS	Junta sobreposição simples
JTT	Junta topo-a-topo
MDC	Modelo do Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFE	Método de Elementos Finitos Extendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
MMF	<i>Mixed-Mode Flexure</i>
PVC	Policloreto de vinil
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
SENB	<i>Single-Edge Notched Bend</i>
SLB	<i>Single-Leg Bending</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
TND	Teste Não Destrutivo
ZPF	Zona de processo de fratura

Lista de Símbolos

ν	Coefficiente de Poisson
δ_n^0	Deslocamento de carga máxima
δ_s^f	Deslocamento de rotura
a_0	Comprimento da pré-fenda
B	Largura dos substratos

E	Módulo de Young
$E_{pmáx}$	Energia libertada desde o início até à carga máxima
$E_{\delta máx}$	Energia libertada desde o início até á rutura
G	Taxa de Libertação de Energia
G_c	Taxa Crítica de Libertação de Energia
h	Espessura dos substratos
L	Comprimento dos substratos
P	Carga
$P_{máx}$	Carga máxima
t_A	Espessura adesiva
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
δ	Deslocamento
$\delta_{máx}$	Deslocamento máximo
$\delta_{Pmáx}$	Deslocamento na carga máxima
x/L_0	Distância normalizada ao longo do comprimento do adesivo
ϵ_f	Deformação de rotura à tração
σ_f	Tensão de rotura à tração
τ_f	Tensão de rotura ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONSTITUIÇÃO DE UMA JUNTA ADESIVA [5]	6
FIGURA 2 – UTILIZAÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL [3]	8
FIGURA 3 – JUNTA ADESIVA ENTRE CASCO E CONVÉS DE UM BARCO [3]	8
FIGURA 4 – LIGAÇÃO DE PAINÉIS NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL [3].....	9
FIGURA 5 – ESFORÇOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO NUMA JUNTA ADESIVA [7]	10
FIGURA 6 – ESFORÇOS DE CORTE EM JUNTA ADESIVA [8]	10
FIGURA 7 – ESFORÇO DE CLIVAGEM NUMA JUNTA ADESIVA [8].....	11
FIGURA 8 – ESFORÇOS DE ARRANCAMENTO EM UMA JUNTA ADESIVA [6]	11
FIGURA 9 – MODOS DE ROTURA EM JUNTAS ADESIVAS [4].	12
FIGURA 10 – CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS ADESIVAS [7]	17
FIGURA 11 – APROXIMAÇÕES LOCAL E CONTÍNUA PARA A MODELAÇÃO [34]	26
FIGURA 12 – LEI COESIVA TRIANGULAR [34].....	28
FIGURA 13 – LEI COESIVA TRAPEZOIDAL [34].....	28
FIGURA 14 – JUNTA ADESIVA COM VÁRIOS MODOS DE ROTURA POSSÍVEIS [48].....	30
FIGURA 15 – MODOS PRINCIPAIS DE PROPAGAÇÃO DE FENDA [54]	34
FIGURA 16 – POSSÍVEIS COMBINAÇÕES ENTRE OS 3 MODOS [1]	34
FIGURA 17 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DO PROVETE DCB [5]	35
FIGURA 18 – DIMENSÕES NORMALIZADAS PARA OS SUBSTRATOS [5]	35
FIGURA 19 – GEOMETRIA E DIMENSÃO DO PROVETE ENF [5]	37
FIGURA 20 – GEOMETRIA E DIMENSÃO DO PROVETE MMF [5].....	38
FIGURA 21 – GEOMETRIA DO PROVETE ADCB [5]	38
FIGURA 22 – ENSAIO CMM [22]	39
FIGURA 23 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO (σ -E) DA LIGA DE ALUMÍNIO AW6082-T651 [10]	43
FIGURA 24 – CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [36]	44
FIGURA 25 – CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [36].....	46
FIGURA 26 – CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DE SIKAFORCE® 7752 [61]	47

FIGURA 27 – GEOMETRIA DO PROVETE SLB [4]	49
FIGURA 28 – UNIÃO DAS CAMADAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE CALOR [4].....	50
FIGURA 29 – PRENSA DE PRATOS QUENTES [4]	50
FIGURA 30 – CICLO TÉRMICO APLICADO [4]	50
FIGURA 31 – POSICIONAMENTO DOS ESPAÇADORES, CALÇO E GRAMPOS, DURANTE A APLICAÇÃO DE PRESSÃO NOS PROVETES [4].....	52
FIGURA 32 – PROVETE SLB, APÓS REMOÇÃO DO EXCESSO DE ADESIVO [4]	53
FIGURA 33 – ASPETO FINAL DE UM PROVETE PARA ENSAIO [4].....	54
FIGURA 34 – SETUP DO ENSAIO SLB [4]	54
FIGURA 35 – CUVAS P-Δ OBTIDAS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [63]	56
FIGURA 36 – CURVAS-R RELATIVAS A GI, OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #3 DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [63].....	57
FIGURA 37 – CURVAS-R RELATIVAS A GII, OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #3 DO ADESIVO	57
FIGURA 38 - RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS GI E GII OBTIDOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [63].....	59
FIGURA 39 - ENVELOPE DE FRATURA EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [63].....	60
FIGURA 40 - CUVAS P-Δ OBTIDAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [63].....	61
FIGURA 41 - CURVAS-R RELATIVAS A GI, OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #7 DO ADESIVO	62
FIGURA 42 - CURVAS-R RELATIVAS A GII, OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #7 DO ADESIVO	62
FIGURA 43 - RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [63]	64
FIGURA 44 - ENVELOPE DE FRATURA EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [63]	65
FIGURA 45 - CUVAS P-Δ OBTIDAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [63].....	66
FIGURA 46 - CURVAS-R RELATIVAS A GI, OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #6 DO ADESIVO	67
FIGURA 47 - CURVAS-R RELATIVAS A GII, OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #6 DO ADESIVO	67
FIGURA 48 - RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [63]	69
FIGURA 49 - ENVELOPE DE FRATURA EXPERIMENTAL DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [63]	69

FIGURA 50 - CONFIGURAÇÃO DA GEOMETRIA DOS PROVETES DE JSS A) E JSD B) [65].....	72
FIGURA 51 - PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIE POR LIXAGEM (A) E LIMPEZA DOS SUBSTRATOS (B) [65]	73
FIGURA 52 - ASPETO DOS SUBSTRATOS APÓS PREPARAÇÃO SUPERFICIAL E LIMPEZA [65]	73
FIGURA 53 - FIXAÇÃO E ALINHAMENTO DOS SUBSTRATOS [65].....	74
FIGURA 54 - SUBSTRATOS COM FIO DE PESCA CALBRADO DE 0,2 MM [65].....	74
FIGURA 55 - COLOCAÇÃO DE GRAMPOS [65].....	75
FIGURA 56 – REMOÇÃO DO EXCESSO DE ADESIVO [65].....	75
FIGURA 57 – MÁQUINA DE ENSAIOS SHIMADZU E FIXAÇÃO DO PROVETE [65]	76
FIGURA 58 – CURVAS P-Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE DO ENSAIO DE JSS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA VALORES DE L ₀ DE: A) 12,5 MM, B) 25 MM, C) 37,5 MM E D) 50 MM [66]	76
FIGURA 59 – CURVAS P-Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE DO ENSAIO DE JSS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA VALORES DE L ₀ DE: A) 12,5 MM, B) 25 MM, C) 37,5 MM E D) 50 MM [66]	77
FIGURA 60 – CURVAS P-Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE DO ENSAIO DE JSS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA VALORES DE L ₀ DE: A) 12,5 MM, B) 25 MM, C) 37,5 MM E D) 50 MM [66]	78
FIGURA 61 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DE JSS ENSAIADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA VALORES DE L ₀ DE: A)12,5 MM, B) 25 MM, C) 37,5 MM E D) 50 MM [66]	79
FIGURA 62 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DE JSS ENSAIADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 PARA VALORES DE L ₀ DE: A) 12,5 MM, B) 25 MM, C) 37,5 MM E D) 50 MM [66].....	79
FIGURA 63 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DE JSS ENSAIADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA VALORES DE L ₀ DE: A) 12,5 MM, B) 25 MM, C) 37,5 MM E D) 50 MM [66].....	80
FIGURA 64 – P _{MÁX MÉD} EM FUNÇÃO DE L ₀ PARA CADA ADESIVO ENSAIADO EM JSS [66]	82
FIGURA 65 – CURVAS P-Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE DO ENSAIO DE JSD COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA	84
FIGURA 66 – CURVAS P-Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE DO ENSAIO DE JSD COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA.....	84
FIGURA 67 – CURVAS P-Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE DO ENSAIO DE JSD COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA.....	85
FIGURA 68 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DE JSD ENSAIADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA VALORES DE L ₀ DE: A) 12,5 MM, B) 25 MM, C) 37,5 MM E D) 50 MM [66].....	86
FIGURA 69 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DE JSD ENSAIADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 PARA VALORES DE L ₀ DE: A) 12,5 MM, B) 25 MM, C) 37,5 MM E D) 50 MM [66].....	87

FIGURA 70 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DE JSD ENSAIADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA VALORES DE $L_0=12,5$ MM [66].....	88
FIGURA 71 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DE JSD ENSAIADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA VALORES DE $L_0=25$ MM [66].....	88
FIGURA 72 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DE JSD ENSAIADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA VALORES DE $L_0=37,5$ MM [66].....	88
FIGURA 73 – SUPERFÍCIES DE ROTURA DE JSD ENSAIADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA VALORES DE $L_0=50$ MM [66].....	89
FIGURA 74 – $P_{MÁX MÉD}$ EM FUNÇÃO DE L_0 PARA CADA ADESIVO ENSAIADO EM JSD [66].....	91
FIGURA 75 – DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTOS PARA OS DIFERENTES CONSTITUINTES DAS JUNTAS PARA AS ANÁLISES DE DANO E RESISTÊNCIA NO ABAQUS® [65].....	93
FIGURA 76 – SENTIDO DO EFEITO BIAS DA MALHA NA REGIÃO DA SOBREPOSIÇÃO	94
FIGURA 77 – SENTIDO DO EFEITO BIAS DA MALHA NA REGIÃO DOS SUBSTRATOS SEM CONTACTO COM O ADESIVO [65].....	95
FIGURA 78 – SENTIDO DO EFEITO BIAS DA MALHA AO LONGO DA ESPESSURA DOS SUBSTRATOS [65]...95	
FIGURA 79 - CONDIÇÕES FRONTEIRA IMPOSTAS NOS MODELOS NUMÉRICOS [65]	95
FIGURA 80- MDC TRIANGULAR IMPLEMENTADO NO SOFTWARE ABAQUS® [65]	97
FIGURA 81 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	100
FIGURA 82 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	100
FIGURA 83 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	101
FIGURA 84 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	102
FIGURA 85 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	102
FIGURA 86 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSD COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	103
FIGURA 87 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	104
FIGURA 88 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	105

FIGURA 89 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{xy} EM JSS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	105
FIGURA 90 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{xy} EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	106
FIGURA 91 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{xy} EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	107
FIGURA 92 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{xy} EM JSD COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	107
FIGURA 93 - VARIÁVEL DE DANO NA CAMADA DE ADESIVO NO INSTANTE EM QUE $P_{MÁX}$ É ATINGIDO PARA AS JSS [82].....	108
FIGURA 94 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA $L_0=12,5$ MM.....	109
FIGURA 95 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA $L_0=50$ MM.....	110
FIGURA 96 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA $L_0=12,5$ MM.....	110
FIGURA 97 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA $L_0=50$ MM.....	111
FIGURA 98 - VARIÁVEL DE DANO NA CAMADA DE ADESIVO NO INSTANTE EM QUE SE ATINGE $P_{MÁX}$ PARA AS JSD.....	112
FIGURA 99 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ PARA AS JSD COM ARALDITE® AV138 E $L_0=12,5$ MM.....	113
FIGURA 100 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ PARA AS JSD COM ARALDITE® AV138 E $L_0=50$ MM.....	113
FIGURA 101 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ PARA AS JSD COM SIKAFORCE® 7752 E $L_0=12,5$ MM.....	114
FIGURA 102 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ PARA AS JSD COM SIKAFORCE® 7752 E $L_0=50$ MM.....	114
FIGURA 103- CURVAS P- Δ DE UMA JSS COM ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA A) $L_0=12,5$ MM; B) $L_0=25$ MM; C) $L_0=37,5$ MM; D) $L_0=50$ MM.....	115
FIGURA 104- CURVAS P- Δ DE UMA JSS COM ADESIVO ARALDITE® 2015 PARA A) $L_0=12,5$ MM; B) $L_0=25$ MM; C) $L_0=37,5$ MM; D) $L_0=50$ MM.....	117
FIGURA 105- CURVAS P- Δ DE UMA JSS COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA A) $L_0=12,5$ MM; B) $L_0=25$ MM; C) $L_0=37,5$ MM; D) $L_0=50$ MM.....	118

FIGURA 106- COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS PARA AS JSS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138	119
FIGURA 107- COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS PARA AS JSS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	120
FIGURA 108- COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS PARA AS JSS COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	121
FIGURA 109- CURVAS P- Δ DE UMA JSD COM ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA A) $L_0=12,5$ MM; B) $L_0=25$ MM; C) $L_0=37,5$ MM; D) $L_0=50$ MM.....	122
FIGURA 110- CURVAS P- Δ DE UMA JSD COM ADESIVO ARALDITE® 2015 PARA A) $L_0=12,5$ MM; B) $L_0=25$ MM; C) $L_0=37,5$ MM; D) $L_0=50$ MM.....	123
FIGURA 111- CURVAS P- Δ DE UMA JSD COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA A) $L_0=12,5$ MM; B) $L_0=25$ MM; C) $L_0=37,5$ MM; D) $L_0=50$ MM.....	124
FIGURA 112- COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS PARA AS JSD COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138	126
FIGURA 113- COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS PARA AS JSD COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	126
FIGURA 114- COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS PARA AS JSD COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	127

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – EVOLUÇÃO DOS ADESIVOS [4]	5
TABELA 2 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS JUNTAS [5]	7
TABELA 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [60]	45
TABELA 4 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [59]	46
TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [61]	48
TABELA 6 – VALORES DE A_0 [MM] MEDIDOS PARA CADA PROVETE [4]	53
TABELA 7 – VALORES MÁXIMOS DE P E Δ OBTIDOS NOS ENSAIOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [63] ..	56
TABELA 8 – VALORES DE G_I OBTIDOS PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 [63]	58
TABELA 9 – VALORES DE G_{II} OBTIDOS PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 [63]	59
TABELA 10 – VALORES MÁXIMOS DE P E Δ OBTIDOS NOS ENSAIOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [63] ..	61
TABELA 11 – VALORES DE G_I OBTIDOS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 [63]	63
TABELA 12 – VALORES DE G_{II} OBTIDOS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 [63]	64
TABELA 13 – VALORES MÁXIMOS DE P E RESPECTIVO Δ OBTIDOS NOS ENSAIOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [63]	66
TABELA 14 – VALORES DE G_I OBTIDOS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [63]	68
TABELA 15 VALORES DE G_{II} OBTIDOS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [63]	68
TABELA 16 - RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS 3 ADESIVOS ESTUDADOS [63]	70
TABELA 17 – DIMENSÕES DAS JSS E JSD [65]	72
TABELA 18 – VALORES DE $P_{MÁX MÉD}$, DESVIO PADRÃO E AUMENTO PERCENTUAL DE $P_{MÁX MÉD}$ PARA CADA VALOR DE L_0 DE JSS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [66]	81
TABELA 19 – VALORES DE $P_{MÁX MÉD}$, DESVIO PADRÃO E AUMENTO PERCENTUAL DE $P_{MÁX MÉD}$ PARA CADA VALOR DE L_0 DE JSS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [66]	81
TABELA 20 – VALORES DE $P_{MÁX MÉD}$, DESVIO PADRÃO E AUMENTO PERCENTUAL DE $P_{MÁX MÉD}$ PARA CADA VALOR DE L_0 DE JSS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [66]	82
TABELA 21 – VALORES DE $P_{MÁX MÉD}$, DESVIO PADRÃO E AUMENTO PERCENTUAL DE $P_{MÁX MÉD}$ PARA CADA VALOR DE L_0 DE JSD COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 [66]	89
TABELA 22 – VALORES DE $P_{MÁX MÉD}$, DESVIO PADRÃO E AUMENTO PERCENTUAL DE $P_{MÁX MÉD}$ PARA CADA VALOR DE L_0 DE JSD COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 [66]	90

TABELA 23 – VALORES DE $P_{MÁX MÉD}$, DESVIO PADRÃO E AUMENTO PERCENTUAL DE $P_{MÁX MÉD}$ PARA CADA VALOR DE L_0 DE JSD COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [66]	91
TABELA 24 – PROPRIEDADES DOS SUBSTRATOS DE LIGA DE AL6082-T651 [65]	93
TABELA 25 – VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA MALHA NAS JSD EM FUNÇÃO DE L_0 [MM] [65]	94
TABELA 26 – DESLOCAMENTOS APLICADOS NOS MODELOS NUMÉRICOS	96
TABELA 27 - VALORES DE ENTRADA DA LEI COESIVA À TRAÇÃO NO SOFTWARE ABAQUS® DE TODOS OS ADESIVOS	98
TABELA 28 - VALORES DE ENTRADA DA LEI COESIVA EM CORTE NO SOFTWARE ABAQUS® DE TODOS OS ADESIVOS	98
TABELA 29 – EXPOENTES UTILIZADOS PARA CRITÉRIO DE PROPAGAÇÃO DE DANO	115
TABELA 30 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] EM FUNÇÃO DE L_0 PARA JSS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138	116
TABELA 31 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] EM FUNÇÃO DE L_0 PARA JSS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015	117
TABELA 32 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] EM FUNÇÃO DE L_0 PARA JSS COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	119
TABELA 33 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] EM FUNÇÃO DE L_0 PARA JSD COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138	122
TABELA 34 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] EM FUNÇÃO DE L_0 PARA JSD COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015	124
TABELA 35 – VALORES DE $P_{MÁX}$ [N] EM FUNÇÃO DE L_0 PARA JSD COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	125

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
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	7
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	9
2.1.3.1	Esforços em juntas adesivas	9
2.1.3.1.1	Tração e compressão	9
2.1.3.1.2	Corte.....	10
2.1.3.1.3	Clivagem.....	11
2.1.3.1.4	Arrancamento	11
2.1.3.2	Modos de rotura	12
2.1.4	Adesivos estruturais	13
2.1.4.1	Epóxidos.....	13
2.1.4.2	Fenólicos	14
2.1.4.3	Poliaromáticos de alta temperatura	15
2.1.4.4	Poliésteres	16
2.1.4.5	Poliuretanos.....	16
2.1.4.6	Acrílicos.....	16
2.1.5	Configurações possíveis de junta	17
2.1.5.1	Junta de sobreposição simples	18

2.1.5.2	Junta de sobreposição dupla	18
2.1.5.3	Junta de chanfro exterior.....	18
2.1.5.4	Junta em degrau e junta com chanfro interior	18
2.1.5.5	Junta com cobre-junta, simples e dupla	19
2.1.5.6	Junta topo a topo.....	19
2.1.5.7	Junta tubular	19
2.1.5.8	Junta de arrancamento	19
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas.....	19
2.2.1	Modelos analíticos	20
2.2.2	Métodos numéricos	21
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	21
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	21
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	22
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	23
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	23
2.3	Modelos de dano coesivo	24
2.3.1	Fundamentos do método	25
2.3.2	Tipos de leis coesivas.....	27
2.3.3	Métodos de estimação das leis coesivas.....	28
2.3.4	Método de identificação individual das propriedades coesivas	29
2.3.5	Método inverso	30
2.3.6	Método direto	31
2.4	Ensaio para determinação da tenacidade à fratura	32
2.4.1	Ensaio em tração (modo I).....	35
2.4.2	Ensaio em corte (modo II).....	37
2.4.3	Ensaio em solitação combinada (modos I + II)	38
3	DESENVOLVIMENTO	43
3.1	Materiais utilizados	43

3.1.1	Substratos.....	43
3.1.2	Adesivos	44
3.1.2.1	Araldite® AV138.....	44
3.1.2.2	Araldite® 2015	45
3.1.2.3	Sikaforce® 7752	47
3.2	Determinação dos envelopes de fratura	48
3.2.1	Geometria das juntas SLB.....	48
3.2.2	Processo de fabrico	49
3.2.2.1	Fabrico e colagem dos provetes	49
3.2.2.2	Preparação dos provetes para ensaio.....	52
3.2.3	Ensaio das juntas SLB	54
3.2.3.1	Condições de ensaio	54
3.2.3.2	Método ótico	54
3.2.3.3	Realização dos ensaios.....	55
3.2.4	Resultados obtidos dos provetes SLB	55
3.2.4.1	Araldite® AV138.....	55
3.2.4.1.1	Curvas P- δ	55
3.2.4.1.2	Determinação de G_I e G_{II}	57
3.2.4.1.3	Determinação dos envelopes de fratura.....	60
3.2.4.2	Araldite® 2015	60
3.2.4.2.1	Curvas P- δ	60
3.2.4.2.2	Determinação de G_I e G_{II}	62
3.2.4.2.3	Determinação dos envelopes de fratura.....	65
3.2.4.3	Sikaforce® 7752.....	65
3.2.4.3.1	Curvas P- δ	65
3.2.4.3.2	Determinação de G_I e G_{II}	67
3.2.4.3.3	Determinação dos envelopes de fratura.....	69
3.2.4.4	Análise dos resultados	70
3.3	Validação dos envelopes de fratura obtidos em juntas de sobreposição	71

3.3.1	Geometria das juntas	71
3.3.2	Processo de fabrico	72
3.3.3	Ensaio das juntas	75
3.3.4	Resultados obtidos	76
3.3.4.1	Juntas de sobreposição simples.....	76
3.3.4.1.1	Curvas P- δ experimentais	76
3.3.4.1.2	Modos de rotura	78
3.3.4.1.3	Resistência das JSS	80
3.3.4.2	Juntas de sobreposição dupla.....	83
3.3.4.2.1	Curvas P- δ experimentais	83
3.3.4.2.2	Modos de rotura	86
3.3.4.2.3	Resistência das JSD.....	89
3.3.5	Condições da análise numérica	92
3.3.6	Modelo de dano coesivo	96
3.3.7	Leis coesivas para simulação do adesivo.....	98
3.3.8	Análise de tensões na junta.....	99
3.3.8.1	Tensões de arrancamento	99
3.3.8.2	Tensões de corte.....	103
3.3.9	Estudo da variável de dano	108
3.3.10	Previsão da resistência	114
3.3.10.1	Juntas de sobreposição simples.....	115
3.3.10.2	Juntas de sobreposição dupla.....	121
4	CONCLUSÕES.....	131
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	135

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos dias de hoje as ligações adesivas têm uma elevada preponderância em vários ramos da indústria por apresentarem diversas vantagens comparativamente a outros processos de ligação convencionais, como por exemplo a brasagem, rebiteagem, ligações aparafusadas e soldadura. No entanto, para a correta utilização de uma ligação adesiva é vital conhecer as propriedades mecânicas e de fratura relevantes de cada adesivo e o comportamento perante o substrato em causa. Quando a ligação adesiva se encontra em serviço, esta está sujeita a solicitações que podem variar. De forma a estudar o comportamento de uma junta quando submetida a solicitações, existem ensaios (necessariamente destrutivos) que permitem analisar a reação das juntas adesivas aos diversos modos de carregamento e estudar as suas propriedades de fratura. O estudo destas propriedades é de extrema importância, pois é através destas propriedades que se obtêm as bases para a previsão da resistência de juntas adesivas. Normalmente, uma junta adesiva encontra-se sujeita tanto a tensões de corte como de tração, o que se denomina de carregamento em modo misto. Como tal, o estudo das propriedades do adesivo deve ser realizado para o modo misto. Para tal, existem métodos numéricos como os modelos de dano coesivo, intrinsecamente associados a uma análise de Elementos Finitos, para os quais é de elevada importância o conhecimento de parâmetros como a taxa de libertação de energia em tração (G_{IC}) e corte (G_{IIC}). Após o conhecimento de G_{IC} e G_{IIC} é necessário utilizar um critério energético de fratura que promova a propagação de dano. Existem diversos critérios disponíveis, o que torna necessário estudar qual o critério mais adequado para cada tipo de adesivo. Para este efeito são geralmente utilizados ensaios de fratura em modo misto, pois estes permitem situar a rotura no envelope de fratura e assim selecionar o critério energético para a propagação de dano que mais se adequa ao tipo de adesivo em estudo.

1.2 Objetivos

Através do ensaio *Single-Leg Bending* é possível analisar a taxa de libertação de energia (propriedade relacionada com a mecânica da fratura, relativa à capacidade de um material resistir à propagação de uma fenda provocada por esforços externos) de uma junta adesiva sobre efeitos de tração (modo I) e de corte (modo II). O principal objetivo desta dissertação é verificar, através de métodos numéricos por modelos de dano coesivo, qual o parâmetro que mais se adequa para o critério energético de propagação

de dano de juntas de sobreposição simples (JSS) e dupla (JSD) com substratos de alumínio e coladas com três diferentes adesivos. Dos três adesivos um é frágil, um é moderadamente dúctil e outro é dúctil. Após a verificação numérica de qual o parâmetro energético que mais se adequa a cada um dos adesivos, os valores obtidos experimentalmente para a força máxima ($P_{máx}$) que a junta suportou irão ser comparados com os valores obtidos numericamente. Após esta comparação, é feita uma discussão de resultados, da qual pode resultar a validação ou não validação dos envelopes de fratura obtidos para ensaios de fratura mista para juntas coladas com os três diferentes adesivos.

1.3 Organização do relatório

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1: Contextualização do trabalho, indicando os principais objetivos do trabalho, bem como a sua estruturação.

Capítulo 2: nesta secção é apresentada informação, inicialmente de uma forma global, relativa ao estado de arte das ligações adesivas. Inicia-se pelas generalidades das ligações adesivas, indicando as suas vantagens e desvantagens, os seus esforços e modos de rotura, passando também pelos adesivos estruturais. Posteriormente irá ser feita uma descrição das técnicas mais relevantes de previsão de resistência, dos modelos de dano coesivo, terminando nos ensaios capazes de determinar a tenacidade à fratura.

Capítulo 3: é descrito o trabalho experimental, no qual se explica a determinação experimental das leis coesivas. É feita uma descrição dos materiais utilizados (adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015 por Constante [1] e adesivo Sikaforce® 7752 por Campilho et al. [2]), uma descrição da geometria de junta usada e uma descrição dos ensaios nas juntas. Posteriormente são apresentados os resultados obtidos. Sucintamente, neste capítulo é descrito o procedimento experimental, que envolve a caracterização dos materiais utilizados, o fabrico dos provetes, os ensaios das juntas e são apresentados os resultados obtidos para dos três adesivos. Futuramente, através das simulações anteriormente realizadas no *software* Abaqus®, é efetuada a validação numérica dos envelopes de fratura obtidos em ensaios de fratura mista.

Capítulo 4: são apresentadas as conclusões do trabalho realizado, e apresentadas propostas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Com o objetivo de ligar vários materiais entre si surgiram, ao longo dos anos, vários processos de ligação. Dentro destes processos de ligação, destacam-se as ligações mecânicas, as ligações soldadas, as ligações por solventes e as ligações adesivas.

Tabela 1 – Evolução dos adesivos [4]

Ano	Adesivo
Até 1910	Cola elaborada a partir de ossos de animais; Colas obtidas a partir de peixes; Adesivos de origem vegetal.
1910	Fenol-formaldeído; Colas de caseína.
1920	Éster de celulose; Resina alquídica; Policloropreno; Adesivos derivados de soja.
1930	Ureia-formaldeído; Fitas sensíveis à pressão; Filmes adesivos de resina fenólica; Colas de acetato polivinílico para madeira.
1940	Fenólicos-nitrilos; Borracha clorada; Melamina; Formaldeído; Fenólicos-vinílicos; Acrílicos; Poliuretanos.
1950	Epóxidos; Cianocrilatos; Anaeróbicos; ligas epóxido.
1960	Poliimida; <i>Polibenzimidazole</i> ; <i>Polyquinoxaline</i> .
1970	Acrílicos (segunda geração); Acrílicos sensíveis à pressão; Poliuretanos estruturais.
1980	Resinas termoendurecíveis modificadas; Epóxidos em dispersão aquosa; Adesivos de contato em dispersão aquosa; Termofusíveis espumados; Resinas poliacromáticas para elevadas temperaturas.
1990	Epóxido modificado com poliuretano; Poliuretanos com cura por humidade; Termofusíveis (<i>Hot melts</i>) curáveis; Sistemas de cura por luz e UV.

Uma ligação adesiva consiste na união de dois corpos, geralmente denominados por substratos ou aderentes, através de um adesivo. Pode-se encontrar facilmente adesivos na natureza, como por exemplo em ninhos de pássaros e em teias de aranha, sendo estes adesivos de origem natural. A ligação adesiva é um método de ligação muito antigo, havendo registos da sua utilização pelo homem desde quinze séculos a.C., no Egito [3]. Devido ao aparecimento de novas necessidades e de novos materiais, os adesivos sofreram uma evolução significativa. Nos anos 40, apareceram os primeiros adesivos sintéticos poliméricos, aumentando assim o seu campo de utilização por parte do homem (Tabela 1).

Devido à fragilidade destes primeiros adesivos sintéticos poliméricos, foi conseguida, através de significativos avanços científicos e tecnológicos, a introdução de polímeros com boa tenacidade na composição química dos adesivos, possibilitando assim a criação de ligações adesivas com substratos de madeira ou metal [5]. Desde então, tem havido uma procura constante com o objetivo de melhorar as características mecânicas dos adesivos já existentes, com o intuito de que estes superem outros processos de ligação existentes. A maior evolução no que diz respeito a adesivos ocorreu nos últimos setenta anos.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Um adesivo pode ser definido como um material polimérico capaz de promover a união entre dois substratos e com capacidade para resistir à sua separação, pela ação combinada de forças adesivas e forças coesivas [5]. Por sua vez, uma junta adesiva resulta na união de pelo menos dois corpos, geralmente conhecidos como substratos ou aderentes, através da propriedade de adesão de um determinado adesivo (Figura 1). Como referido anteriormente, as juntas adesivas têm vindo a ser cada vez mais utilizadas em detrimento das ligações mecânicas ou das ligações por soldadura.

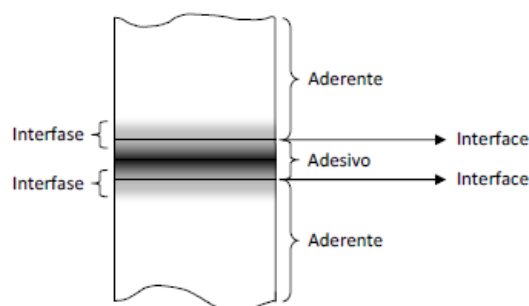


Figura 1 – Constituição de uma junta adesiva [5]

As ligações adesivas são geralmente mais leves, de fácil fabrico, permitem maiores cadências de produção, são economicamente mais acessíveis e têm uma boa capacidade

de amortecimento de vibrações, mas a principal vantagem em relação às restantes ligações é a distribuição mais uniforme das tensões sobre o total da área colada [5]. A principal desvantagem em relação aos outros métodos de ligação é a necessidade de preparação e limpeza da superfície dos substratos [3].

A Tabela 2 resume as principais vantagens e desvantagens das juntas adesivas em comparação com as ligações mecânicas e soldadas.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens das juntas [5]

	Ligação adesiva	Ligações por soldadura	Ligações mecânicas
Distribuição de tensões	Boa distribuição de tensões (exceto no arrancamento e clivagem)	Cria tensões internas na estrutura	Pontos de alta tensão nos locais de fixação
Aparência	Boa aparência	Aparência aceitável	Descontinuidade da superfície
Materiais ligados	Ideal para a maioria de pares de materiais diferentes	Limitado a pares de materiais similares	Aplicável à maioria de materiais
Resistência à temperatura	Fraca resistência a altas temperaturas	Resistente a temperaturas elevadas	Resistente a temperaturas elevadas
Resistência mecânica	Resistente à corrosão e à fadiga	Necessita de tratamentos para obter boa resistência mecânica	Pouco resistente à fadiga
Garantia de qualidade	A aplicação de ensaios não destrutivos é limitada	Os ensaios não destrutivos são aplicáveis à maioria dos processos	Confiança razoável quando se controla o torque de aperto

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Nos dias de hoje, várias indústrias são responsáveis pelo desenvolvimento e estudo das ligações adesivas. Isto deve-se ao facto de estas serem utilizadas nas mais diversas indústrias, como por exemplo a automóvel, aeroespacial, naval, calçado, aeronáutica, construção civil e ainda em equipamentos desportivos. Devido às vantagens referidas na Tabela 2, as juntas adesivas começaram cada vez mais a ter um papel fundamental em todas estas indústrias.

Primeiramente, na indústria automóvel estas eram apenas utilizadas nos para-brisas, nos vidros traseiros dos automóveis e também no preenchimento dos vazios de

soldadura, evitando assim a corrosão. Com a evolução das ligações adesivas ao longo dos anos, estas têm sido cada vez mais utilizadas nos automóveis (Figura 2), com os seguintes diferentes objetivos: vedar, fixar e como reforço estrutural.

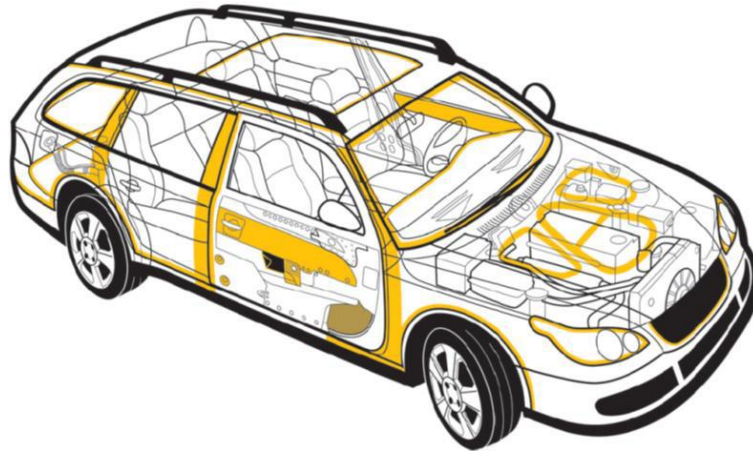


Figura 2 – Utilização de juntas adesivas na indústria automóvel [3]

Na indústria naval, as juntas adesivas foram aumentando cada vez mais o seu campo de utilização a partir do momento em que se verificou que estas forneciam as características necessárias, tais como a resistência à humidade, temperatura e boa durabilidade. Outro parâmetro essencial é o tipo de cargas que as juntas têm de suportar na indústria naval, tais como esforços de flexão, torção e corte. Geralmente são utilizadas em quilhas, painéis laterais e cascos (Figura 3).



Figura 3 – Junta adesiva entre casco e convés de um barco [3]

Relativamente à indústria aeronáutica (Figura 4) as ligações adesivas são preponderantes devido à resistência à fadiga que apresentam, por reduzirem significativamente o peso das estruturas, e porque apresentam um bom isolamento, amortecimento de vibrações e uma vida útil considerável. Apesar das vantagens

referidas, aquando da conceção de estruturas aeroespaciais, é necessária atenção redobrada pois não existem meios de inspeção de qualidade capazes de avaliar de forma precisa o seu estado.

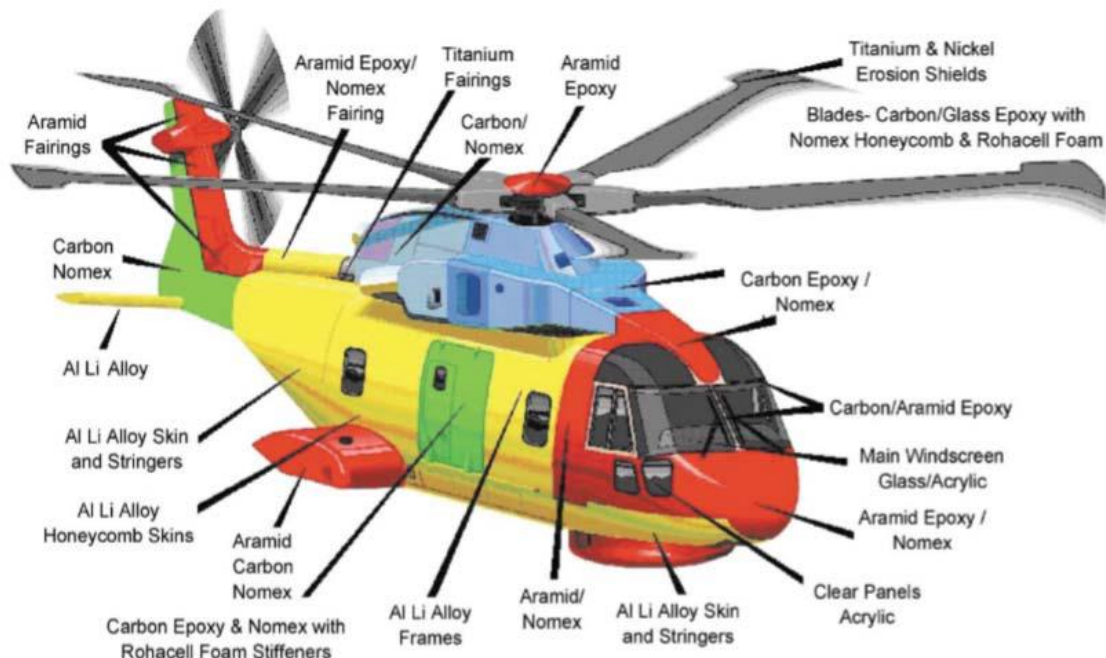


Figura 4 – Ligação de painéis na indústria aeroespacial [3]

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

2.1.3.1 Esforços em juntas adesivas

Uma junta adesiva pode ser muitas vezes sujeita a esforços, estes podem aparecer individualmente ou combinados entre si e podem determinar a resistência da junta [6]. Nas juntas adesivas é comum o aparecimento de quatro tipos de esforços: tração/compressão, clivagem e arrancamento.

2.1.3.1.1 Tração e compressão

Esforços de tração e compressão ocorrem quando uma força, uniformemente distribuída pela área colada, é aplicada perpendicularmente ao plano da colagem, como representado na Figura 5. Um design perfeito da junta requer que as superfícies dos substratos estejam paralelas e que o carregamento seja axial, o que raramente acontece, desenvolvendo-se assim esforços de clivagem e de arrancamento [6].

Numa junta que não tenha o design anteriormente referido e que esteja submetida à tração, a distribuição de tensões não vai ser uniforme, existindo assim picos de tensão devido a esforços de arrancamento e de clivagem nas extremidades da zona de

sobreposição, o que leva ao aparecimento de fendas que posteriormente podem provocar a rotura da junta.

Aquando do carregamento de uma junta à compressão, o fator mais importante é manter as cargas alinhadas, assegurando assim a compressão pura da junta. A adesão em uma junta à compressão tem assim uma menor importância, uma vez que através de uma força de compressão suficiente elevada não vai haver movimento dos substratos, a não ser que haja rotura coesiva.

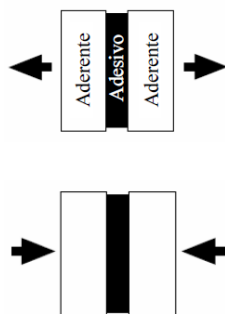


Figura 5 – Esforços de tração e compressão numa junta adesiva [7]

2.1.3.1.2 Corte

As tensões de corte em uma junta adesiva têm origem aquando do aparecimento de forças que atuam paralelamente ao plano do adesivo e que tentam separar os aderentes (Figura 6). Juntas adesivas cujo seu comportamento depende da resistência ao corte do adesivo, são geralmente de fácil elaboração e muito usadas [6].

As juntas adesivas têm, geralmente, um bom comportamento ao corte pois toda a área de sobreposição contribui para a resistência da junta, tornando-se assim no tipo de carregamento preferencial para juntas adesivas [6].

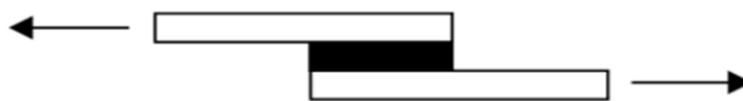


Figura 6 – Esforços de corte em junta adesiva [8]

Difícilmente se verifica nas juntas adesivas um esforço de corte puro, pois geralmente ocorre a deflexão transversal da junta, devido à não simetria do carregamento, levando assim ao aparecimento de esforços de arrancamento.

As discontinuidades geométricas tendem a apresentar maiores tensões, sendo através destes pontos de maiores tensões que as juntas são posteriormente projetadas.

2.1.3.1.3 Clivagem

Ocorre quando são aplicados esforços na extremidade de uma ligação adesiva rígida e que tendem a separar os aderentes em sentidos opostos (Figura 7). Quando uma junta está sujeita a esforços de clivagem ou de arrancamento, a sua resistência é bastante reduzida devido ao facto de os esforços estarem concentrados numa área muito reduzida da zona de sobreposição [6].

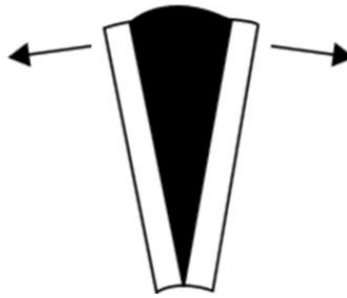


Figura 7 – Esforço de clivagem numa junta adesiva [8]

Adesivos frágeis têm um comportamento muito mau aquando da presença de esforços de clivagem, pois estes estão concentrados apenas em uma linha fina na extremidade da ligação.

2.1.3.1.4 Arrancamento

O esforço de arrancamento é muito similar ao esforço de clivagem, mas é aplicado a juntas onde pelo menos um aderente é flexível. Devido à flexibilidade de pelo menos um dos aderentes, o ângulo de separação vai ser maior do que para esforços de clivagem.

Adesivos mais rígidos têm tendência a ter uma sensibilidade maior em comparação com adesivos mais dúcteis. Os adesivos mais dúcteis conseguem ter uma distribuição maior e mais uniforme das tensões, como é possível observar na Figura 8.

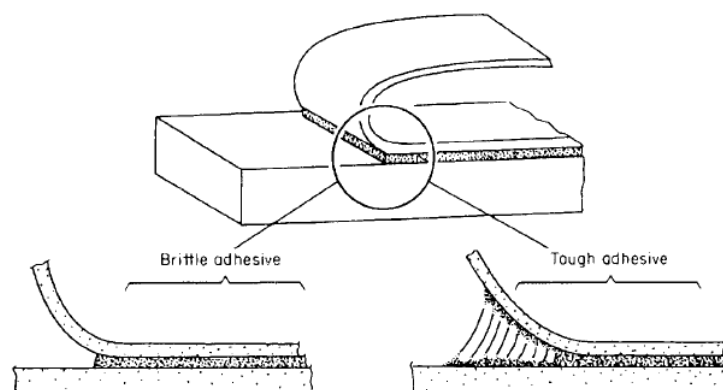


Figura 8 – Esforços de arrancamento em uma junta adesiva [6]

2.1.3.2 Modos de rotura

Uma ligação adesiva eficiente baseia-se na transmissão de cargas entre os componentes ligados, salvaguardando a sua integridade estrutural sob determinadas solicitações e/ou condições ambientais adversas. Quando, nas condições anteriormente referidas é alcançado o limite da resistência da junta adesiva, pode ocorrer a rotura da ligação adesiva (Figura 9). O modo de rotura da ligação adesiva pode ser classificado como:

- Rotura adesiva;
- Rotura coesiva;
- Rotura mista;
- Rotura do aderente.

A rotura adesiva ocorre na zona de interface, quando o adesivo se separa do aderente. Este tipo de rotura pode ter origem numa má preparação superficial, má seleção do adesivo ou na utilização inadequada de um determinado processo de cura.

A rotura coesiva é a rotura que é desejável que aconteça, pois significa que foi atingida a resistência máxima do material. A rotura coesiva dá-se quando existe uma quebra apenas pelo interior do adesivo, sem que haja contacto com as superfícies internas dos aderentes. Aquando da ocorrência deste modo de rotura pode-se concluir que a preparação das superfícies dos aderentes foi bem-sucedida.

Da combinação da rotura adesiva e da rotura coesiva, surge a rotura mista que consiste na combinação entre rotura adesiva e rotura coesiva no adesivo. É um modo de rotura bastante usual e pode ter origem numa preparação superficial não uniforme, processo de cura inadequado e em concentração de tensões em determinadas zonas.

Por último, a rotura do aderente ocorre quando a resistência do aderente é menor que a resistência do adesivo.

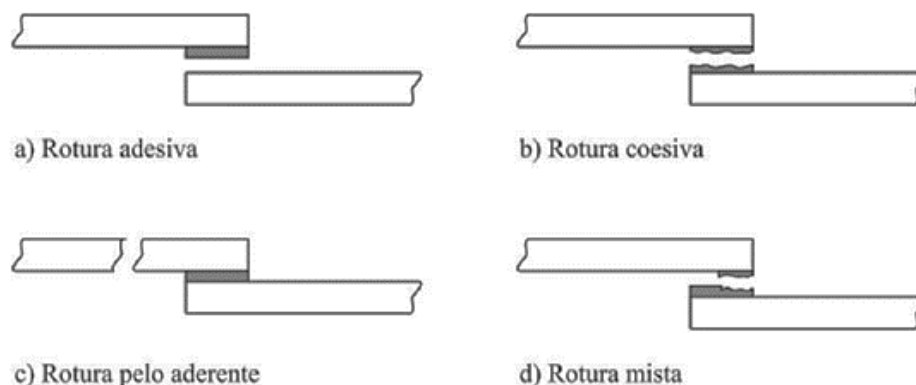


Figura 9 – Modos de rotura em juntas adesivas [4].

2.1.4 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são normalmente adesivos caracterizados pelo elevado desempenho mecânico em aplicações permanentes. Para ser considerado adesivo estrutural, este deve possuir, no mínimo, uma resistência ao corte de 7 MPa e ter uma boa resistência ao meio ambiente [6]. Pelas características apresentadas anteriormente, verifica-se que as ligações formadas por estes adesivos são capazes de superar ligações mecânicas ou soldadas em alguns aspetos, tais como: boa relação resistência/peso, gama alargada de materiais a unir, melhor distribuição de tensões e um considerável aumento da rigidez da estrutura. No entanto, estas ligações também têm algumas desvantagens, como por exemplo: necessidade de uma cuidada preparação superficial e uma reduzida resistência à temperatura e à humidade.

De acordo com a sua composição química e algumas particularidades, os adesivos estruturais podem ser subdivididos em alguns grupos, apresentados de seguida.

2.1.4.1 Epóxidos

Foram introduzidos comercialmente em 1946 e têm um largo campo de aplicação na indústria automóvel e aeronáutica. São, provavelmente, os adesivos mais versáteis pois podem ligar uma grande variedade de aderentes e são facilmente modificados para obter características diferentes.

Podem ser fornecidos comercialmente em líquido, pasta, película ou sob a forma sólida. Os adesivos epóxidos são compostos por uma resina epóxida e um endurecedor, sendo que este pode estar incorporado na resina, com o objetivo de tornar o adesivo num só componente.

Devido à sua boa molhabilidade, estes adesivos têm uma grande adesão a todos os aderentes exceto materiais com uma baixa energia superficial, plásticos não tratados e elastómeros. São caracterizados pela sua excelente resistência à tração, ao corte, à fluência e quando são sujeitos ao contacto com óleos, humidade e vários solventes. No entanto, têm uma fraca resistência ao arrancamento, a não ser que sejam modificados com um polímero mais resiliente [6].

Os adesivos epóxidos podem curar à temperatura ambiente durante 18 a 72 horas, podendo-se diminuir o tempo de cura aumentando a temperatura. Se a cura do adesivo for a uma temperatura mais alta do que a temperatura ambiente, este vai possuir uma resistência maior ao corte e terá também uma temperatura de serviço superior. No entanto, apresentará uma menor resistência ao arrancamento e tenacidade [4].

Como já referido anteriormente, com o objetivo de obter determinadas propriedades, pode ser adicionada uma variedade de polímeros à resina epóxido, formando epóxidos

híbridos. No que respeita à família de epóxidos híbridos, os mais usuais são os seguintes adesivos: epóxido-fenólico, epóxido-nylon, epóxido-polisulfeto e epóxidos modificados com resinas elastoméricas.

Os adesivos **epóxido-fenólicos** resultam da mistura de resina epóxida com resinas fenólicas, o que melhora consideravelmente o comportamento do adesivo a altas temperaturas e podem ser empregues em serviço permanente até aos 175°C ou intermitente até aos 260°C. Devido à sua rigidez, têm uma baixa resistência ao arrancamento, ao impacto e ao choque térmico. São muito utilizados na indústria aeronáutica e servem para ligar diversos tipos de materiais como metais, vidros, cerâmicos e compósitos.

Os adesivos **epóxido-nylons** foram dos primeiros a ser desenvolvidos com o intuito de suportar uma elevada resistência ao corte e uma extremamente elevada resistência ao arrancamento. Relativamente aos adesivos epóxidos não modificados, as suas maiores vantagens são uma maior flexibilidade e um grande aumento na resistência ao arrancamento, embora a resistência ao arrancamento diminua bastante para baixas temperaturas. Têm também uma boa resistência à fadiga e ao impacto. Apesar das vantagens acima enumeradas, estes possuem uma baixa resistência à temperatura (temperatura de serviço até 80°C) e não são recomendados para ambientes com elevada humidade, devido à presença do nylon. São usados para colar folhas de alumínio e estruturas em sandwich na indústria aeronáutica [6].

Os adesivos **epóxido-polisulfitos** são caracterizados por terem uma excelente flexibilidade e resistência química. São utilizados para ligar uma grande gama de aderentes diferentes. Têm uma baixa resistência ao corte e às altas temperaturas. No entanto, têm uma boa resistência ao arrancamento e um bom comportamento a baixas temperaturas. São geralmente fornecidos em forma de pasta de duas partes, e curam à temperatura ambiente. A sua boa flexibilidade permite a utilização em aplicações com elevada deformação. São usados para colar betão, vedantes, entre outras aplicações [6].

2.1.4.2 Fenólicos

As resinas fenólicas são o produto da condensação de fenol e formaldeído, e eram primeiramente usadas para ligar aderentes de madeira. Devido à sua boa resistência à temperatura, boa durabilidade e estabilidade dimensional, têm sido industrialmente usados também para calços de travões, moldes para fundição, discos abrasivos e lixas. Têm ainda uma boa capacidade de transmissão de esforços a baixas temperaturas e são relativamente baratos, mas apresentam uma ligação frágil com tendência para estilhaçar podendo ser melhorados através da adição de elastómeros [4].

Na maioria das aplicações atrás enumeradas, o adesivo é aplicado como uma solução de álcool, acetona ou água, e a sua cura é feita à temperatura de 140 °C e através da aplicação de pressão durante vários minutos. Também podem ser encontrados na forma de pó, tendo de posteriormente ser dissolvido em água.

Os adesivos fenólicos podem ser alterados através da adição de outros géneros poliméricos, como borrachas sintéticas ou termoplásticos, o que melhora significativamente a flexibilidade do adesivo. Os adesivos fenólicos modificados são denominados por **fenólicos híbridos** e os principais tipos são: nitrilo-fenólicos, vinilo-fenólicos e neopreno-fenólicos.

Os adesivos **nitrilo-fenólicos** são constituídos por 50% de borracha de nitrilo. A maior vantagem que advém da adição de borracha de nitrilo é a significativa melhoria na resistência ao arrancamento sem reduzir significativamente a resistência do adesivo a altas temperaturas. Nos metais, estes podem apresentar resistências ao corte de 35 MPa, excelente resistência ao arrancamento, ao impacto e uma excelente capacidade de serviço a elevadas temperaturas. Normalmente são disponibilizados sob a forma de soluções de solvente ou películas e são utilizados maioritariamente na indústria aeronáutica, eletrónica, do calçado e mobiliário [6].

Os adesivos **vinilo-fenólicos** resultam da combinação de resina fenólica com formal de polivinilo ou com resinas butiral de polivinilo. Devido à sua excelente resistência ao corte e ao arrancamento, tornaram-se num dos tipos de adesivo com mais sucesso no que diz respeito aos adesivos estruturais para metais. Têm também uma excelente resistência química e ao impacto. No entanto, a sua temperatura de serviço é baixa, pois ronda os 95°C. São usualmente utilizados em metais, plásticos e borrachas e são fornecidos sob a forma de soluções de solvente e também como películas.

Os adesivos **neopreno-fenólicos**, são caracterizados por uma resistência ao impacto, à fadiga e à fluência excelentes, embora tenham uma resistência ao corte inferior aos restantes adesivos fenólicos modificados. Este tipo de adesivos permite a ligação de vários aderentes e tem uma temperatura de serviço entre -55°C e 93°C. São normalmente disponibilizados em soluções de solvente e em película.

2.1.4.3 Poliaromáticos de alta temperatura

Adesivos caracterizados pelo seu excelente comportamento a altas temperaturas devido a serem constituídos por resinas como as poliimidadas, as bismaleimidadas, as resinas de polibenzimidazol, entre outras resinas de alta temperatura que apresentam uma excelente resistência térmica.

Este tipo de adesivos é utilizado em aplicações a altas temperaturas na aeronáutica, mas a sua utilização é limitada devido ao alto custo das resinas acima referidas e a dificuldades no seu processamento. Este tipo de resinas, geralmente, é fornecido em películas integradas ou soluções de solvente. Para a cura deste tipo de resinas, recorre-se a ciclos térmicos e de pressão, pois são necessárias elevadas pressões e temperaturas entre os 290°C e os 340°C para a sua correta cura.

2.1.4.4 *Poliésteres*

Os poliésteres são caracterizados por poderem apresentar uma grande variedade de propriedades, daí o frequente uso destas resinas nas mais variadas aplicações existentes. Os poliésteres podem ser divididos em dois grupos distintos: os poliésteres **saturados (termoplásticos)** e os **não saturados (termoendurecíveis)**.

Os poliésteres não saturados são utilizados em vários tipos de reparações, como por exemplo na indústria automóvel. São resinas de cura rápida à temperatura ambiente e são constituídos por dois componentes que endurecem através da adição de um catalisador. A flexibilidade, a rigidez e a resistência ao corte variam significativamente, de acordo com o poliéster utilizado.

Os poliésteres saturados têm uma elevada resistência ao arrancamento e são transparentes. Devido à sua transparência, são utilizados em equipamento ótico e também no processo de ligação de componentes em painéis elétricos.

2.1.4.5 *Poliuretanos*

Tal como as resinas epóxicas, este tipo de adesivos pode apresentar-se no estado sólido ou dissolvido num solvente de uma ou duas partes. Estes adesivos podem curar à temperatura ambiente ou a elevadas temperaturas. São adesivos flexíveis e têm uma elevada resistência ao corte e ao arrancamento, têm também uma boa resistência a temperaturas baixas e a meios químicos. Devido à sua boa molhabilidade, estes adesivos aderem bem a uma grande variedade de substratos, formando ligações com boa tenacidade. Estes adesivos degradam-se em ambientes húmidos e a sua temperatura de serviço não é muito elevada (aproximadamente 150°C), o que limita a utilização dos mesmos para algumas aplicações. São geralmente utilizados para ligar folhas metálicas, películas, elastómeros e outros tipos de materiais.

2.1.4.6 *Acrílicos*

Os adesivos acrílicos podem ser divididos nos seguintes tipos:

- Cianoacrilatos;
- Anaérobicos;
- Acrílicos modificados.

Cianoacrilatos: existem dois tipos principais de base cianocrilato, os de etilo e os de metilo. São adesivos caracterizados por terem uma cura rápida, uma excelente resistência ao corte, uma baixa resistência a elevadas temperaturas e a ambientes húmidos e uma temperatura de serviço pouco ampla, entre -30°C e 80°C. São adesivos relativamente caros e têm uma baixa resistência ao arrancamento e ao impacto.

Relativamente aos dois tipos principais de base cianocrilato, os de metilo têm uma maior resistência ao impacto quando aplicados em materiais rígidos, enquanto os de etilo são mais utilizados em borrachas e superfícies plásticas.

Anaeróbicos: adesivos denominados de anaeróbicos devido à privação do contacto entre oxigénio e a resina aquando da cura do mesmo, sendo que a cura é relativamente rápida à temperatura ambiente. Baseiam-se no monómero acrilato e podem ser aplicados numa enorme variedade de materiais e superfícies, necessitando apenas de algumas precauções quando aplicados em superfícies inativas. O seu preço é relativamente baixo quando aplicado em grandes áreas e apresentam-se como um componente único. Geralmente são utilizados em maquinarias, aplicações estruturais como bloqueio de ligações aparafusadas e também como vedante de porosidades.

Acrílicos modificados: são sistemas termoendurecíveis de duas partes com uma excelente resistência ao corte, um pequeno tempo de cura, uma boa resistência ao meio ambiente e a sua temperatura de serviço pode variar entre os -40°C até aos 120°C . Devido à alta resistência mecânica e ao tempo de cura curto, estes adesivos são utilizados em operações totalmente automatizadas e têm um campo de aplicação bastante amplo.

2.1.5 Configurações possíveis de junta

O projeto de uma junta adesiva está dependente dos esforços e das possibilidades de aplicação a que a junta irá estar sujeita. Existem diversas configurações possíveis para juntas adesivas, permitindo assim que seja possível obter um melhor comportamento da junta para um dado caso concreto. As juntas mais usuais são as juntas de sobreposição simples e dupla, juntas com chanfro e juntas em degrau [6]. Na Figura 10 estão representadas algumas configurações de juntas mais utilizadas.

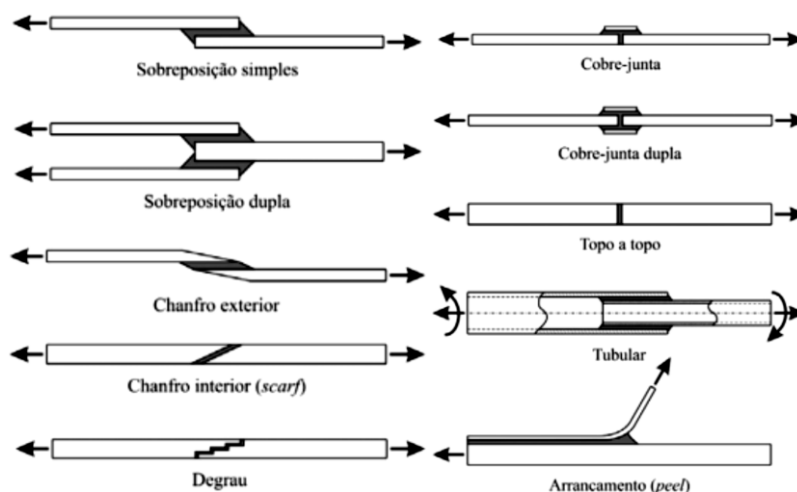


Figura 10 – Configurações de juntas adesivas [7]

2.1.5.1 Junta de sobreposição simples

Tal como referido anteriormente, a junta de sobreposição simples faz parte do grupo de configurações mais utilizadas, sendo mesmo a mais utilizada. É caracterizada pelo seu fácil fabrico, por poderem ser utilizadas com aderentes com pouca espessura e pelo facto de os adesivos estarem sujeitos, maioritariamente, a esforços de corte, resistindo assim a esforços maiores relativamente a outros tipos de junta. No entanto, se os esforços na junta não estiverem alinhados, haverá a flexão dos aderentes, dando origem a esforços de arrancamento nas extremidades da ligação. A existência de esforços de arrancamento diminui a eficiência da junta, podendo esta diminuição da eficiência ser contrariada, pela utilização de uma junta de sobreposição dupla [5-7].

2.1.5.2 Junta de sobreposição dupla

Uma configuração de junta projetada com o intuito de evitar a flexão dos aderentes aquando do carregamento não linear nas juntas. Nesta configuração de junta são utilizados 3 aderentes, tornando a configuração simétrica e aumentando para o dobro a área em que o adesivo é aplicado, o que provoca um aumento da resistência da junta [9]. No entanto, este tipo de junta tem algumas desvantagens comparativamente à junta de sobreposição simples, pois necessita de um maior tempo de fabrico e, devido à sua configuração, nem sempre é possível a sua aplicação [5, 6, 10].

2.1.5.3 Junta de chanfro exterior

Como já supracitado previamente, às zonas de descontinuidade estão associados picos de tensão. Neste tipo de juntas, devido à sua geometria, estas descontinuidades são diminuídas nos aderentes através da prévia maquinagem destes, nas zonas de sobreposição (Figura 10), o que reduz assim os esforços de arrancamento.

2.1.5.4 Junta em degrau e junta com chanfro interior

Tipos de junta caracterizados por diminuírem a variação das tensões ao longo do adesivo e a excentricidade dos esforços. Nas juntas em degrau, através da sua geometria a área de sobreposição aumenta, e possibilita ao adesivo resistir a esforços que não sejam apenas de tração. Estas juntas implicam a maquinagem dos degraus ou do chanfro, o que aumenta os respetivos custos.

2.1.5.5 Junta com cobre-junta, simples e dupla

As cobre-juntas mantêm os esforços alinhados e apresentam uma resistência maior relativamente às juntas de sobreposição simples, devido à presença de um terceiro elemento que fortalece a união, como se pode ver na Figura 10. Na presença de esforços de flexão, é aconselhável a utilização da cobre-junta dupla.

2.1.5.6 Junta topo a topo

As juntas topo a topo são o tipo de junta mais fácil de fabricar, no entanto a resistência destas juntas é reduzida devido à pequena área de ligação [11]. Caso a junta esteja sujeita a esforços de flexão, esta fica sujeita à clivagem, o que compromete ainda mais a sua resistência.

2.1.5.7 Junta tubular

Este tipo de juntas é utilizado para unir tubos, independentemente do formato da sua secção, o que leva a bastantes geometrias associadas a este tipo de configuração de junta. São caracterizadas por terem uma boa resistência a esforços de tração e compressão, sendo, no entanto, vital garantir a concentricidade entre os tubos, evitando assim o aparecimento de esforços de clivagem e arrancamento. Quando o diâmetro das tubagens a unir é o mesmo, são utilizados chanfros nas zonas dos aderentes em contacto com o adesivo. Para tubagens com diferentes diâmetros, o adesivo é aplicado no espaço existente entre os dois aderentes.

2.1.5.8 Junta de arrancamento

Este tipo de juntas é utilizado quando um dos aderentes é flexível e o outro rígido e, usualmente, quando o adesivo está sujeito a esforços de arrancamento. Estes esforços são os mais indesejados em juntas coladas, uma vez que as tensões se concentram em porções muito reduzidas da área de colagem.

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a não existência de modelos materiais precisos e de critérios de rotura apropriados levou ao sobredimensionamento de juntas adesivas, dando assim origem a estruturas mais dispendiosas e pesadas. Com o aparecimento de metodologias de previsão fiáveis, foi possível o uso das ligações adesivas de uma forma bastante mais eficiente. Pode-se escolher duas alternativas para a análise de juntas adesivas: análises

de forma fechada (métodos analíticos) e métodos numéricos (por exemplo, Elementos Finitos). O estudo das ligações adesivas teve início com o modelo de análise de forma fechada levado a cabo por Volkersen em 1938 [12]. Este modelo considerava todos os materiais como materiais elásticos e a deformação do adesivo apenas em corte. No entanto, a análise analítica de ligações adesivas tornava-se mais complexa se o adesivo se deformasse plasticamente, se os aderentes fossem compósitos, ou ainda se os aderentes fossem de materiais diferentes. O Método de Elementos Finitos é a técnica mais usada na análise de juntas adesivas, e Adams e os seus colaboradores foram os pioneiros a utilizar esta técnica de análise [13]. A rotação da junta, a plasticidade dos aderentes e do adesivo e a influência do filete foram estudados em primeira mão por Harris e Adams [14]. A abordagem da mecânica dos meios contínuos foi a primeira técnica considerada para a previsão da resistência das ligações adesivas, e requeria a distribuição de tensões e um critério de rotura adequando. O Método de Elementos Finitos também pode ser utilizado em conjunto com critérios da mecânica da fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade de tensão ou por métodos energéticos, como por exemplo a técnica de fecho virtual da fenda. No entanto, com estas técnicas de modelação, o crescimento da fenda torna-se incómodo, pois é necessário voltar a criar a malha sempre que há propagação da fenda [15]. Nas últimas décadas, foram feitos grandes desenvolvimentos no que diz respeito à modelação numérica de juntas adesivas, sendo que um dos grandes desenvolvimentos foi o aparecimento da modelação de dano por combinação de EF com MDC. Esta técnica combina a modelação convencional de EF para as regiões onde não é esperado que haja dano e uma abordagem da mecânica da fratura através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação do dano. Uma alternativa recente para a modelar a propagação de fendas nos materiais é o Método dos Elementos Finitos Estendido, que usa funções enriquecidas para representar um campo de deslocamentos descontínuos. De seguida, irão ser abordadas várias técnicas utilizadas na previsão da resistência de juntas.

2.2.1 Modelos analíticos

Nos primórdios da análise de estruturas ligadas os métodos de previsão consistiam em formulações analíticas e os trabalhos desenvolvidos por Volkersen [12] e Goland e Reissner [16] foram os primeiros de uma série de estudos teóricos que tiveram a vantagem de simplificar os campos de tensão nas estruturas ligadas devido ao uso de premissas simplificativas em relação à geometria das estruturas, ao carregamento, e às condições fronteira, dando origem a soluções eficientes de elasticidade em forma fechada. Assim, cada estrutura ligada pode ser analisada rapidamente, embora com muitos pressupostos agregados [15]. Com estes modelos, as tensões e deformações podem ser facilmente calculadas, bem como a distribuição do momento fletor na

estrutura. A resistência foi tipicamente prevista através de critérios de tensão ou deformação. Até aos dias de hoje, estes estudos foram sendo ultrapassados por análises numéricas, embora também tenha havido, ao longo dos anos, um desenvolvimento dos estudos teóricos em termos de capacidades de modelação, como por exemplo, adesivos não-lineares [17] ou análises geométricas não-lineares [18].

2.2.2 Métodos numéricos

2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos é caracterizada por utilizar em critérios de rotura, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos por modelos analíticos ou por EF, prevendo assim a resistência da ligação adesiva. Isto é conseguido, quando os valores previstos, obtidos por critérios de deformação ou tensão (por exemplo, o Critério da Tensão Normal Máxima ou o Critério da Tensão de Corte Máxima), atingem os valores limite dos materiais. Esta abordagem foi prontamente aplicada para juntas de ligação em aplicações estruturais após o Método de Elementos Finitos e a programação de computador terem sido disponibilizados [14]. Com esta técnica é possível analisar estruturas ligadas com ou sem dano inicial e com um carregamento arbitrário. Não obstante, esta técnica tem uma limitação subjacente, já que estruturas adesivas têm propensão a tensões localizadas nas extremidades da zona de sobreposição, devido às arestas vivas. Devido a este facto, na análise através de EF, a tensão nestas zonas aumenta com o refinamento da malha e não é possível obter convergência, dando previsões de acordo com a malha [9]. Com o passar dos anos, foram impostas algumas melhorias a esta técnica de modelação, como por exemplo a definição de critérios de tensão e deformação mais complexos para diferentes materiais e mecanismos de fratura, e também a combinação de modelos de meios contínuos mais realistas. No entanto, a dependência de malha continua sem solução.

2.2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os seus materiais, são contínuos. Defeitos ou dois materiais com cantos reentrantes não são enquadrados nesta suposição. Consequentemente, a mecânica dos meios contínuos não disponibiliza nenhuma solução para o estado de tensão nestes pontos singulares, dando assim origem a tensões ou deformações localizadas. A mecânica da fratura foi desenvolvida para o defeito mais comum em estruturas, as fendas. Na mecânica da fratura, é bem aceite que as tensões calculadas através da mecânica dos meios contínuos são singulares (infinitas) na extremidade da fenda. Segundo as teorias mais recentes, sabe-se que tal singularidade existe sempre quando o ângulo da fenda é inferior a 180° . Este

resultado foi encontrado por Williams [19] para tensões singulares num entalhe. Este conceito pode ser também aplicado para tensões singulares em dois materiais ligados por um adesivo com um canto reentrante. A mecânica da fratura foi aplicada com sucesso em muitos problemas de engenharia nos últimos tempos. Muitos estudos relacionados com juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia de deformação, e o seu respetivo valor crítico ou a tenacidade à fratura [19] em vez de fatores de intensidade de tensão, pois estes não são facilmente determináveis quando a propagação da fenda ocorre numa interface ou perto dela. No entanto, a fratura de juntas adesivas ocorre, normalmente, em modo misto devido às variações das propriedades entre os diferentes materiais e ao estado complexo de tensão. Os critérios de rotura para modo misto podem ser desenvolvidos de uma forma análoga aos critérios clássicos de rotura, embora deva ser introduzido o conceito de superfície ou envelope de fratura.

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

A implementação em computador das técnicas da Mecânica da Fratura Linear Elástica teve um grande sucesso algumas décadas atrás, mas estas eram limitadas ao comportamento elástico dos materiais. Além disso, os adesivos dúcteis mais recentes, podem desenvolver zonas plásticas que podem ser mais espessas que a espessura do adesivo. Os MDC foram desenvolvidos no final de 1950/ início de 1960 [20], com o objetivo de descrever o dano sob cargas estáticas na zona de processo coesivo, à frente da extremidade da fenda, dando assim uma solução promissora para métodos mais refinados para prever danos em estruturas adesivas. Desde então, os MDC foram testados para simular a iniciação e propagação de fenda em problemas de rotura coesiva e interfacial ou delaminação em materiais compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou em elementos coesivos [21], podendo estes elementos ser incorporados em análises de EF para modelação do comportamento de fratura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [22]. O conceito principal dos MDC é que uma ou múltiplas interfaces de rotura podem ser introduzidas artificialmente em estruturas, em que é possível o crescimento do dano através da introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamentos. Isto tornou-se possível, através da definição de leis de tração-separação para modelação de interfaces ou regiões finitas.

As leis dos MDC são aplicadas entre nós homólogos de elementos coesivos, e estas podem ligar nós sobrepostos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos. Podem também ser aplicadas diretamente entre dois materiais sem contacto de modo a simular uma camada fina, como por exemplo, uma ligação adesiva. Os MDC proporcionam uma reprodução macroscópica do dano definida pela resposta das leis de tração-deslocamento relativo entre nós emparelhados ao longo da fenda. São modelados a evolução da resistência e o amaciamento até à rotura,

permitindo assim observar a degradação progressiva das propriedades do material. As leis de tração-separação são usualmente desenvolvidas através de relações lineares em cada uma das fases de carregamento [23]. No entanto, é possível definir uma ou mais fases de forma diferente para uma representação mais fiável e precisa do comportamento dos materiais.

2.2.2.4 Mecânica do dano

Nos dias de hoje, estão à disposição técnicas avançadas de modelação que conseguem obter previsões bastante precisas de rotura, superando as limitações existentes nas técnicas anteriores. De um modo geral, os danos estruturais podem ocorrer por microfissuras ao longo de um volume finito ou uma região interfacial, diminuindo a transferência de carga. Uma simulação de EF com base em modelação sólida contínua gera erradamente plastificação generalizada nos elementos sem evolução do dano, enquanto um modelo de mecânica do dano pode simular dano nos elementos através da redução das cargas transferidas. Posto isto, é então possível a simulação passo-a-passo do dano e fratura num caminho pré-definido ou arbitrariamente dentro de uma região [23]. Este campo, devido ao facto de ser inovador, está constantemente sob desenvolvimento, com o intuito de se obter técnicas de modelação cada vez mais precisas, assim como métodos de estimativa de parâmetros de materiais mais fiáveis e a redução de problemas de convergência [24]. As técnicas de modelação do dano podem ser locais ou contínuas. Na técnica de modelação do dano local, o dano sucede numa linha (análise a duas dimensões), ou numa superfície (análise a três dimensões), simulando uma rotura interfacial entre os materiais. No que diz respeito à técnica de modelação do dano contínua, o dano estende-se por uma área (análise a duas dimensões) ou volume finitos (análise a três dimensões), simulando uma rotura ou também, para modelar uma fratura coesiva do adesivo. Os MDC são a técnica englobada na mecânica do dano com maior utilização junto das juntas adesivas.

2.2.2.5 Método de Elementos Finitos Extendido

O Método de Elementos Finitos Extendido é uma melhoria recente do método de EF na modelação do crescimento do dano em estruturas. Este método utiliza leis do dano para a previsão da fratura, que se baseiam na resistência dos materiais em maciço para a iniciação de dano e em deformações para a rotura (definido 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. A principal vantagem do MEFE em relação aos MDC, reside no facto de a fenda não necessitar de percorrer um caminho pré-definido. As fendas podem progredir livremente dentro de uma região do material, sem a obrigatoriedade de que a malha coincida com a geometria das

descontinuidades ou que haja a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda durante a análise [25]. O MEFE é uma extensão à modelação por EF, cujos princípios fundamentais foram apresentados nos finais dos anos 90 por Belytschko e Black [26]. O Método de Elementos Finitos Extendido apoia-se no conceito de partição da unidade e pode ser implementado no método de EF tradicional através da inserção de funções locais de enriquecimento para os deslocamentos nodais perto da fenda, para permitir o seu crescimento e a separação entre as faces da fenda [27]. Devido ao crescimento de dano, a extremidade da fenda modifica continuamente a sua posição e orientação em função das condições de carga e da geometria da estrutura, simultaneamente com a criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF na proximidade da extremidade da fenda.

2.3 Modelos de dano coesivo

As técnicas existentes para a previsão da resistência da junta foram sendo desenvolvidas ao longo do tempo. Inicialmente, os métodos analíticos, principalmente análises de forma-fechada, foram propostos para distribuições de tensões no adesivo em estruturas com uma geometria simples e a previsão de rotura era realizada pela comparação da máxima tensão no adesivo com a resistência dos materiais [28]. Décadas mais tarde, teve início a incursão do Método de elementos Finitos na análise de ligações adesivas baseando-se em critérios de tensão/deformação ou mecânica da fratura para prever a rotura de uma ligação adesiva [29]. Apesar destas análises serem promissoras, estas tinham algumas limitações: as previsões de tensão/deformação dependem do tamanho da malha nas regiões críticas, enquanto o critério de fratura estava restrito à Mecânica de Fratura Linear Elástica e precisava de uma fenda inicial.

Os Modelos de Dano Coesivo têm sido utilizados nas últimas décadas para a previsão de resistência de juntas adesivas, como um acrescento à análise de Método de Elementos Finitos, permitindo assim a simulação do crescimento do dano em regiões maciças de material contínuo ou na interface entre diferentes materiais [30]. Comparando com Método de Elementos Finitos convencional, é conseguida uma maior precisão na previsão de resistência da junta, uma vez que podem ser desenvolvidas diferentes formas para as leis coesivas, dependendo da natureza do material ou da interface a ser simulada. Barenblatt [20] e Dugdale [31] desenvolveram o conceito de Zona Coesiva para descrever o dano sob cargas estáticas na zona coesiva à frente da ponta da fenda. Desde então, os MDC foram sucessivamente estudados e melhorados de forma a prever o comportamento de fendas na zona coesiva e interfacial e em casos de delaminação de compósitos. Para a aplicação desta técnica, são estabelecidas leis de tração-separação na linha da fenda com uma forma pré-definida, sendo necessário determinar as taxas de libertação de energia de deformação em tração e corte (G_n e G_s , respetivamente) e respetivos valores críticos ou tenacidade (G_n^c e G_s^c). As resistências

coesivas em tensão e corte (t_n e t_s , respetivamente) são igualmente necessárias e estão relacionadas com o final do comportamento elástico e início do dano [32]. Diferentes técnicas estão hoje em dia disponíveis para a definição dos parâmetros coesivos (G_n^c , G_s^c , t_n^0 e t_s^0), tais como a técnica de identificação de propriedades, o método direto e o método inverso. Estes métodos geralmente estão associados com o ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB) para caracterização à tração e *End-Notched Flexure* (ENF) para caracterização ao corte, normalmente com bons resultados [33].

Um dos aspetos mais importante do MDC é que estes são facilmente incorporados em *software* de Elementos Finitos convencional para modelar a propagação do dano em vários materiais, incluindo juntas adesivas. Os MDC defendem que podem ser introduzidas artificialmente nas estruturas uma ou mais regiões ou interfaces de fratura, onde o crescimento do dano é possibilitado com a introdução de uma descontinuidade no campo de deslocamentos. Esta técnica é caracterizada pelo estabelecimento de leis de tração-separação (também conhecidas por leis coesivas, já referidas anteriormente) para modelar interfaces ou regiões finitas.

2.3.1 Fundamentos do método

A utilização das técnicas da MFLE é aplicada quando o adesivo apresenta um comportamento frágil, tendo tido um grande sucesso há algumas décadas atrás. Um senão desta técnica era o facto de esta estar restrita a deformações de pequena escala na região em redor da extremidade da fenda. Nos adesivos estruturais utilizados atualmente, a zona de plastificação pode ter dimensões muito superiores à espessura do adesivo. Desenvolveram-se alguns estudos durante os anos de 1959 e 1960 por Barenblatt [20] e Dugdale [31], com o objetivo de modelar este processo de dano. Os referidos autores foram responsáveis pelo aparecimento do conceito de zona coesiva com o intuito de descrever situações de dano sob condições estáticas de carregamento na zona coesiva do processo, na região à frente da extremidade da fenda. Foi então que apareceram os MDC, que podem basear-se em elementos de mola ou mais usualmente em elementos coesivos, que estabelecem a ligação entre elementos sólidos 2D ou 3D das estruturas. Os MDC assentam no pressuposto de que uma ou múltiplas regiões/interfaces de fratura podem ser implementadas artificialmente nas estruturas, sendo assim a propagação do dano propiciada pela existência de descontinuidades. Como já referido anteriormente, uma das vantagens do uso dos MDC é que estes podem ser facilmente integrados em *software* de simulação de EF para modelar o comportamento à fratura de diversos materiais, como por exemplo de juntas adesivas. A utilização dos MDC assenta na aplicação de leis tração-separação que se estabelecem entre pares de nós homólogos dos elementos coesivos e podem ser consideradas duas aproximações para a modelação: a aproximação local e a aproximação contínua (Figura 11).

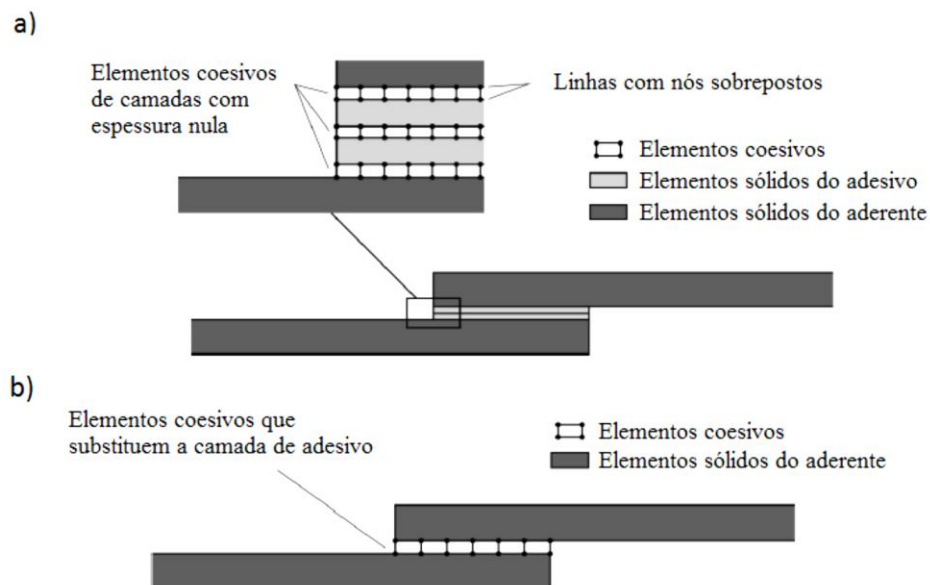


Figura 11 – Aproximações local e contínua para a modelação [34]

No que diz respeito à aproximação local, que pode ser observada na Figura 11(a), são utilizadas leis coesivas para ligar nós de elementos sólidos sobrepostos (diferentes materiais ou diferentes camadas de compósitos) com o objetivo de simular uma espessura nula, como por exemplo as interfaces [35]. Com esta técnica, os elementos coesivos são utilizados apenas na simulação do crescimento do dano, enquanto as dissipações plásticas de uma ligação adesiva são simuladas com elementos sólidos. Normalmente, a rigidez inicial das leis do MDC é extremamente elevada (método da função da penalidade) para que não se altere a rigidez global da estrutura em causa. Segundo Campilho et al. [36], o uso de elementos coesivos em diferentes planos de crescimento de dano, em diferentes planos da espessura do adesivo permite a obtenção dos respetivos gradientes de concentração de tensões para as regiões a analisar.

No que respeita à modelação de juntas adesivas, o adesivo é modelado como uma camada elasto-plástica contínua por elementos sólidos, sendo que a sua energia de fratura intrínseca é estimada nas leis do MDC em vez de G_c , correspondendo assim à energia dissipada requerida para a formação de uma nova superfície, enquanto as dissipações dos materiais dúcteis ocorrem nos elementos sólidos que representam a ligação adesiva, como referido anteriormente [24]. Conclui-se então que G_c é a soma destas duas componentes energéticas, incluído também as dissipações dos materiais nos modelos. Assim, a propagação do dano é governada pelo trabalho de separação das superfícies de fratura em vez de G_c , devido à energia dissipada pelos elementos contínuos. Segundo Ji et al. [22], os efeitos das restrições internas e externas nas dissipações plásticas de uma ligação adesiva são também contabilizados nesta abordagem local. Comparativamente à aproximação contínua, são fundamentais mais parâmetros e trabalho computacional.

No que diz respeito à aproximação contínua, que se encontra representada na Figura 11(b), as leis coesivas aplicam-se diretamente entre os dois materiais que não estão em contacto, sendo estes diferentes ou o mesmo material, simulando assim a existência de um outro material entre eles com uma espessura finita, como acontece com o adesivo em juntas adesivas [37]. Na simulação do comportamento de uma ligação adesiva, todo o adesivo é apresentado por uma linha de elementos coesivos que representam o comportamento da ligação. Analogamente ao que acontece na aproximação local, a rigidez inicial dos elementos coesivos caracteriza a rigidez da ligação adesiva em cada modo de carregamento. Este é um método simples e que consegue obter resultados com uma elevada precisão. Tudo isto leva a que este método seja muito utilizado na simulação da propagação do dano em juntas adesivas [38]. No entanto, este método também apresenta algumas limitações, particularmente: (1) A significância do processo de fratura é de certa forma desvanecida com esta aproximação, pois as separações coesivas reais são acompanhadas com comportamentos plásticos localizados ao longo das camadas adesivas, mesmo em adesivos frágeis, representados por este método com propriedades médias equivalentes; (2) Os MDC estão dependentes da geometria da estrutura, principalmente da espessura de adesivo e do substrato, pois estes parâmetros afetam a extensão da ZPF bem como a zona da plastificação em torno da ponta da fenda, tornando também as leis do MDC dependentes destes parâmetros.

2.3.2 Tipos de leis coesivas

Como já referido anteriormente, existem várias leis coesivas:

- Triangular [39];
- Linear parabólica [40];
- Polinomial [41];
- Exponencial [42];
- Trapezoidal [42].

A lei coesiva triangular (Figura 12) é caracterizada pela necessidade de determinar um número reduzido de parâmetros e ainda pela precisão dos resultados conseguidos para a maioria das condições reais, tornando-se assim a lei coesiva mais utilizada [24]. Esta lei distingue dois modos, lei de modo puro e lei de modo misto. A lei de maiores dimensões diz respeito às leis de modo puro e caracteriza-se pela ocorrência de propagação do dano num conjunto específico de nos homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na lei respetiva. Já a lei de menores dimensões caracteriza a lei de modo misto, obtida por critérios de tensão e energéticos de modo a combinar os modos puro de tensão e de corte [43].

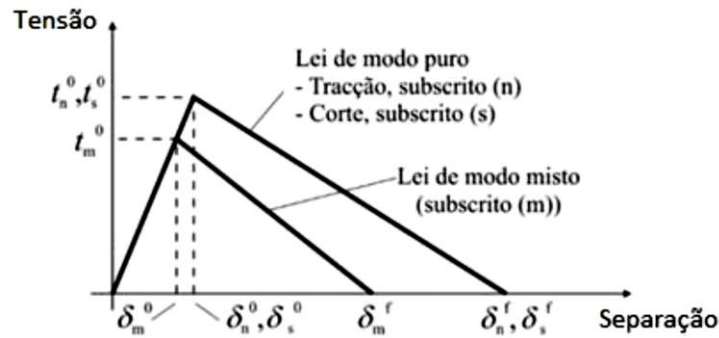


Figura 12 – Lei coesiva triangular [34]

O modelo de dano coesivo trapezoidal (Figura 13) tem como função substituir os elementos sólidos usados na modelação da camada fina de adesivo. Através de um patamar na lei coesiva, é possível simular o comportamento dúctil do adesivo, simulando assim o seu comportamento plástico.

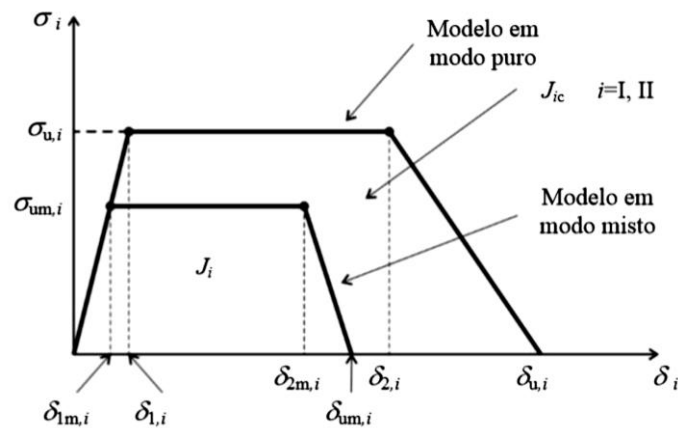


Figura 13 – Lei coesiva trapezoidal [34]

A taxa crítica de libertação de energia tanto no modo I como no modo II, corresponde à área sob cada lei coesiva. Em modo puro, quando as tensões são libertadas na lei de tração-separação, sucede a propagação do dano, enquanto em modo misto, conforme o tipo de análise a efetuar, bidimensional (modo puro I e II) ou tridimensional (modo puro I, II e III), utilizam-se critérios de tensão e energéticos como objetivo de relacionar os modos puros para conseguir simular o comportamento típico do modo misto da junta. Conseguem-se assim obter as curvas $P-\delta$ das estruturas até à rotura e o respetivo modo de rotura.

2.3.3 Métodos de estimação das leis coesivas

A análise por MDC é uma técnica eficaz no que concerne à previsão de resistência de juntas adesivas, pois é capaz de explicar o comportamento à fratura em grande parte

não linear das juntas adesivas. No entanto, é necessário estimar com precisão os parâmetros do MDC através de dados experimentais e a sua respetiva validação de modo a simular com precisão o processo de fratura [33]. Apesar deste facto, não estão ainda disponíveis métodos normalizados para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Recentemente, vários pesquisadores focaram-se na definição dos parâmetros do MDC (G_{Ic} , G_{IIc} , t_n^0 e t_s^0), dando assim origem a três métodos diferentes para a obtenção das leis coesivas: método de identificação individual das propriedades coesivas, o método inverso e o método direto. Estes métodos têm diferentes graus de complexidade e precisão de resultados também diferente. Estes trabalhos validaram em ensaios de modo misto os MDC estudados experimentalmente em ensaios DCB, ENF ou JSS, geralmente com bons resultados [33].

2.3.4 Método de identificação individual das propriedades coesivas

O método de identificação individual das propriedades coesivas é caracterizado pela definição isolada de todos os parâmetros das leis coesivas por intermédio de testes adequados. Devido às diferentes propriedades que os adesivos apresentam em maciço comparativamente a adesivos em camada fina, este método não é o mais adequado para modelação em juntas adesivas [44]. De acordo com Chai [45], em adesivo maciço, a fenda tem tendência a propagar-se na direção perpendicular à direção principal máxima. Já em ligações adesivas de camada fina, a propagação ocorre no caminho da própria ligação, desde que o adesivo seja menos resistente que os aderentes que compõem a junta, dando assim origem a uma rotura coesiva [34].

Segundo o método de identificação individual das propriedades coesivas, pelo menos um dos parâmetros da lei coesiva é definido por provetes de adesivo maciço. Este método foi utilizado por vários autores na previsão de resistência de juntas adesivas. Campilho et al. [46] elaboraram um trabalho para avaliar a resistência de uma reparação de um material compósito (laminado) em configuração de sobreposição simples, em função de L_0 . Com o intuito de simular uma camada fina do adesivo Araldite® 420 foi elaborada uma análise de EF com uma lei coesiva trapezoidal pela aproximação contínua. Através da curva tensão-deformação (σ - ϵ), foi possível obter t_n^0 e δ_n^s , assentes em estudos prévios realizados por Andersson e Stigh [47] que evidenciavam que t_n^0 é da mesma ordem de grandeza da resistência máxima à tração medida em ensaio de adesivo maciço e de que δ_n^0 e δ_n^s não têm grande influência nos resultados numéricos. No que respeita ao parâmetro t_s^0 , este foi obtido pelo critério de von Mises através de t_n^0 para materiais isotrópicos maciços. O valor de δ_n^f foi determinado utilizando uma inclinação similar da curva da lei coesiva à tração, pois este tem pouca influência nos resultados. Os valores de G_{Ic} e de G_{IIc} foram obtidos através de ensaios DCB e ENF, respetivamente. Já as propriedades de rotura interlaminares, intralaminares e da fibra do compósito foram conseguidas através de outros trabalhos, utilizando leis coesivas triangulares.

Foram equacionados diversos caminhos diferentes para a fratura (Figura 14) considerando assim a possível ocorrência de diferentes modos de rotura. Conseguiu-se atingir um resultado razoável para a rigidez e carga de rotura, apesar das aproximações supramencionadas efetuadas aos parâmetros.

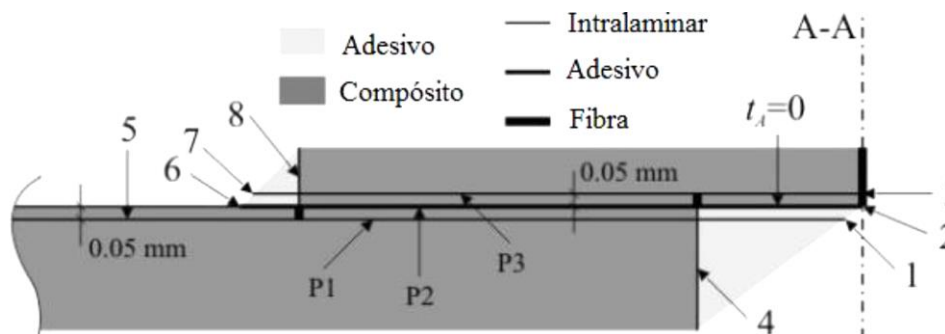


Figura 14 – Junta adesiva com vários modos de rotura possíveis [48]

Não obstante, foi feita uma análise de sensibilidade aos parâmetros coesivos com o objetivo de avaliar o efeito das aproximações efetuadas, demonstrando que os valores de δ_n^s e δ_s^s das leis coesivas da ligação adesiva não alteram o modo de rotura da reparação nem afetam a carga de rotura. Nas roturas representadas pelas linhas 1 e 3 (roturas interlaminares), os parâmetros coesivos de corte interlaminar mostraram maior influência na resistência da junta comparativamente aos parâmetros coesivos de tração.

2.3.5 Método inverso

O método inverso é um método iterativo que se baseia em ajustar os dados adquiridos nas simulações de MEF aos obtidos experimentalmente, até se conseguir uma concordância entre estes por intermédio da variação dos parâmetros coesivos. Inicialmente, é necessária uma reprodução com precisão da geometria que a junta apresenta, utilizando leis coesivas aproximadas, baseadas no comportamento usual do material a ser simulado. Comparativamente ao método de identificação individual das propriedades coesivas, o método inverso consegue obter uma estimativa do comportamento do adesivo nas condições reais em que este vai estar em serviço com mais precisão. Habitualmente, segundo o método inverso, são utilizados valores para G_{Ic} e para G_{IIc} que correspondem aos valores estacionários de G_I e de G_{II} durante a propagação da fenda nas suas respetivas curvas R, conseguidos através de ensaios de fratura (DCB ou ENF) como parâmetros de entrada da lei coesiva. Posteriormente são utilizados valores aproximados de t_n^0 e t_s^0 para dar início ao processo iterativo de tentativa e erro. A estimativa destes parâmetros é realizada através de algumas iterações numéricas até que seja alcançada uma previsão precisa dos dados experimentais. Alguns exemplos de dados experimentais fiáveis para usar no processo

iterativo são a curva R [49], o perfil de abertura de fenda [50] e mais habitualmente a curva $P-\delta$ [33].

2.3.6 Método direto

O método direto caracteriza-se por ser capaz de obter de forma precisa as leis coesivas de um material ou junta adesiva, pois estas são estimadas a partir de dados experimentais de testes de fratura como o DCB ou ENF. Através destes ensaios é então possível obter os valores de G_I (tração) ou G_{II} (corte) em função do deslocamento relativo na extremidade da fenda (δ_n para tração ou δ_s para corte). De tal modo, é feita a distinção entre a estimação da lei coesiva em tração (ensaio DCB) ou em corte (ensaio ENF), sendo a primeira determinada a partir das curvas $G_I-\delta_n$ e a segunda pelas curvas $G_{II}-\delta_s$.

Segundo Stigh et al. (2010), supondo a existência de uma lei coesiva, concluíram que para as camadas de adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas. Torna-se assim possível o cálculo do integral- J ao longo de um caminho arbitrário que contorna a fenda. Aplicando o conceito de balanço energético e da teoria das vigas para um ensaio DCB, a taxa de libertação de energia em modo I pode ser calculada pelas seguintes equações:

$$G_I = 12 \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + P\theta_0 \quad \text{e} \quad (1)$$

$$G_I = P\theta_p \quad , \quad (2)$$

Onde P_u representa a carga aplicada por unidade de largura, E o módulo de Young dos aderentes, θ_0 a rotação relativa dos aderentes na extremidade da fenda e θ_p a rotação relativa dos aderentes na linha de carga. Campilho et al. (2013) baseando-se na equação fundamental do integral- J definida por Rice, chegaram à seguinte equação que permite obter a expressão da lei coesiva:

$$G_I = \int_0^{\delta_n^f} t_n(\delta_n) d\delta_n \quad , \quad (3)$$

Em que t_n é a tensão coesiva normal. G_{Ic} pode ser um valor de G_I se considerado o início de propagação de fenda. De tal modo, G_{Ic} é dado por um valor de patamar de G_I , correspondente a um valor de δ_n^f . A curva $t_n(\delta_n)$ é dada por:

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_I}{\partial \delta_n} \quad , \quad (4)$$

Assim, o procedimento do ensaio consiste em medir os valores de P , a , δ_n e θ_0 . Para efeitos de cálculo de G_{Ic} , considera-se o valor de patamar da curva G_I - δ_n durante a propagação da fenda.

No que diz respeito à fratura em modo II pelo ensaio ENF, existe também uma formulação de cálculo de G_{IIc} pelo método do integral- J . O valor do integral- J pode ser calculado pela seguinte equação:

$$G_{II} = \frac{9 (P_u a)^2}{16 E h^3} + \frac{3 P_u \delta_s}{8 h}, \quad (5)$$

Pela avaliação do integral- J ao longo de um caminho exterior à zona de processo de fratura, pode-se escrever:

$$G_{II} = \int_0^{\delta_s^f} t_s(\delta_s) d\delta_s, \quad (6)$$

Onde δ_s e δ_s^f representam respetivamente, o deslocamento atual em corte na extremidade da fenda e o deslocamento de rotura ao corte na extremidade da fenda. Diferenciando a expressão anterior:

$$t_s(\delta_s) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_s}. \quad (7)$$

Através da expressão anterior, conclui-se que é possível obter a lei coesiva em corte do adesivo (relação entre tensão de corte t_s e δ_s) através da diferenciação da curva G_{II} em função do valor medido de δ_s durante o ensaio. O comportamento observado em ensaio consiste numa curva crescente de $G_{II}=f(\delta_s)$ até um patamar, que tem origem no início da propagação da fenda e corresponde a $G_{II}=G_{IIc}$, e cuja diferenciação define a lei coesiva experimental para a camada de adesivo. Assim, o procedimento do ensaio consiste em medir os valores de P , a e δ_s .

2.4 Ensaios para determinação da tenacidade à fratura

A mecânica da fratura pressupõe que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo e que possui defeitos, defeitos estes que podem ter tido origem durante o processo de fabrico da estrutura ou durante o tempo de serviço da mesma. O objetivo da mecânica da fratura é avaliar o comportamento do material à rotura, isto é, o aparecimento e a propagação de fenda, obtendo assim propriedades fundamentais para a previsão da resistência nas ligações adesivas. A mecânica da fratura está assente em dois critérios principais com o objetivo de prever a propagação de uma fenda, o critério baseado na taxa de libertação de energia e no fator de intensidade de tensão.

Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se a ensaios experimentais levados a cabo por Griffith em 1920 [51]. Através da comparação entre valores teóricos e reais da resistência à rotura, conclui-se que a diferença entre os mesmos se devia à existência de fissuras nos materiais, e que a rotura ocorre na fenda mais crítica existente no material [52]. Griffith estabeleceu então que a propagação da fenda vai ocorrer quando a energia disponível na extremidade da fenda (G - taxa de libertação de energia) devido à solitação aplicada igualar a energia necessária à propagação da fenda (G_c -taxa crítica de libertação de energia), sendo esta última considerada uma propriedade do material em questão. A equação para obter a taxa de libertação de energia é a seguinte [5]:

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA}, \quad (8)$$

Onde W é definido como o trabalho realizado pelas forças exteriores, U a energia de deformação interna do sólido e dA a variação de superfície da fenda.

O critério que assenta no conceito do fator de intensidade de tensão, é caracterizado por um fator de escala que representa a alteração do estado de tensão na vizinhança da fenda. A expressão que define este estado de tensão é a seguinte:

$$K = Y\sigma_r\sqrt{\pi a} \quad (9)$$

Na equação anterior, Y é um fator adimensional que depende da distribuição de carga e da geometria, σ_r representa a tensão remota aplicada e a o comprimento de fenda. Quando a tensão atinge o seu valor crítico σ_u obtém-se a tenacidade à fratura, definida pela seguinte equação:

$$K_c = Y\sigma_u\sqrt{\pi a} \quad (10)$$

Estes parâmetros pressupõem a existência de um defeito na zona de colagem. No entanto, em algumas aplicações estruturais a localização do defeito e o tamanho do mesmo não são muito evidentes, o que aumenta a dificuldade de aplicação de qualquer um dos métodos [5, 53].

Como atrás referido, existem dois parâmetros possíveis para caracterizar a tenacidade à fratura, a taxa de libertação de energia e o fator de intensidade de tensão. Estes parâmetros estão relacionados entre si, quer para um estado plano de tensão, quer para um estado plano de deformação, através das seguintes equações. Para o estado plano de tensão:

$$G = \frac{K^2}{E}, \quad (11)$$

Para estado plano de deformação pode-se dizer que:

$$G = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E}, \quad (12)$$

A propagação de uma fenda pode ocorrer segundo 3 modos principais de carregamento, como está representado na Figura 15. O modo I define o modo de abertura (*opening*) e acontece quando os esforços de tração provocam a abertura da fenda. O modo II (*sliding*) ocorre quando as superfícies da fenda têm movimento relativo perpendicular à fenda. No modo III (*tearing*) o movimento é paralelo à frente da fenda [5].

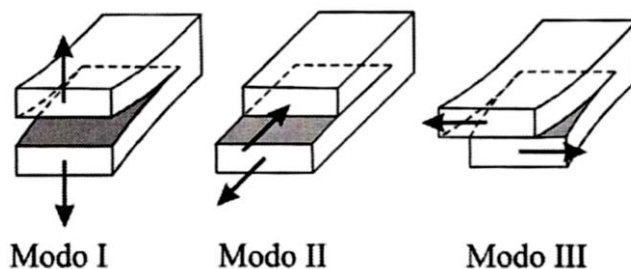


Figura 15 – Modos principais de propagação de fenda [54]

Geralmente, a solicitação para a propagação de fenda ocorre como resultado da combinação entre os modos principais acima referidos. Na Figura 16, são apresentadas as várias combinações possíveis entre os modos principais de carregamento.

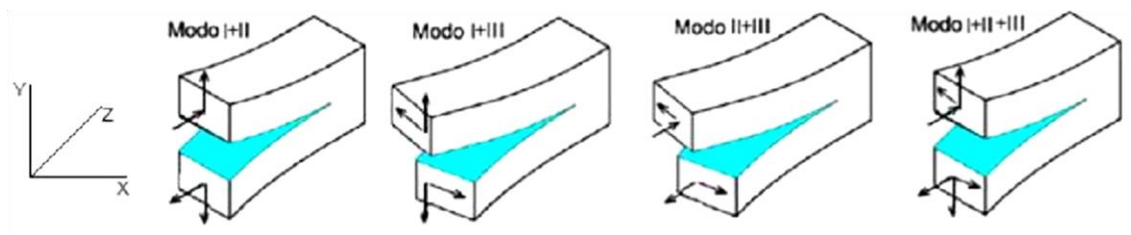


Figura 16 – Possíveis combinações entre os 3 modos [1]

Entre os dois critérios acima descritos, o critério da taxa crítica de libertação de energia G_c é o mais utilizado, pois tem a vantagem de se representar diretamente a capacidade de absorção de energia, enquanto para o critério que assenta no conceito do fator de intensidade de tensão, o valor de K não é facilmente calculável. Em relação aos modos de carregamento, os mais estudados são o modo puro I e o modo puro II. Os ensaios de rotura em ligações adesivas servem para avaliar as propriedades dos adesivos à fratura e posteriormente, ter a capacidade de prever a resistências das mesmas. Para o estudo destes ensaios recorre-se normalmente aos conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica.

Em modo I, os ensaios que têm maior destaque para a caracterização à fratura de um adesivo carregado são o *Compact Tension* (CT), o *Single-Edge Notched Bend* (SENB), *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) e mais usualmente o DCB [55] Relativamente

ao carregamento em modo II, os principais ensaios são o ENF, o *End-Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF). Quanto aos carregamentos em modo I+II (misto), os ensaios mais relevantes são o *Asymmetric Double-Cantilever Beam* (ADCB), o *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam* (ATDCB), o *Mixed-Mode Bending* (MMB) e o *Mixed-Mode Flexure* (MMF) [56].

2.4.1 Ensaios em tração (modo I)

Como já referido anteriormente, o modo puro I (tração) corresponde ao movimento de abertura da fenda na direção perpendicular ao seu plano, provocado por tensões de tração nessa direção. Este corresponde ao modo mais crítico no que se refere à propagação da fenda, já que as tensões ficam concentradas em porções mais pequenas de adesivo. O ensaio DCB é considerado o mais simples e é universalmente aceite para definir a fratura em modo I de vários materiais, como compósitos, madeiras e adesivos.

O ensaio DCB está normalizado para a determinação de G_{IC} em juntas adesivas (norma ASTM D3433-99 [57]). Neste ensaio, um provete com uma pré-fenda é solicitado numa extremidade com uma carga P , registando de seguida o seu valor em função do deslocamento δ verificado no mesmo ponto. Inicialmente é considerada pré-fenda. A velocidade do ensaio está dependente das dimensões dos aderentes e das características dos materiais a serem ensaiados, estando normalmente compreendida entre 0,5 e 3 mm/min [5].



Figura 17 – Geometria e dimensões do provete DCB [5]

As dimensões características são o comprimento (L), espessura (h) e largura (B). O adesivo encontra-se entre os substratos e possui uma espessura constante (w), sendo o comprimento de fenda inicial a_0 considerado desde a zona onde é aplicada a solitação até à extremidade da pré-fenda presente no adesivo [11].

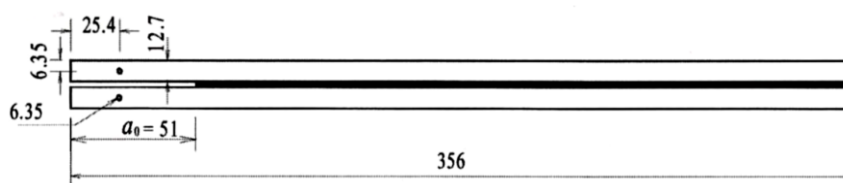


Figura 18 – Dimensões normalizadas para os substratos [5]

Segundo a norma ASTM D3433 – 99, os substratos deverão apresentar as dimensões especificadas na Figura 18, enquanto a espessura dos mesmos deve ser definida de forma a evitar a deformação plástica dos substratos durante o ensaio. Esta espessura pode ser calculada através da seguinte equação:

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}}, \quad (13)$$

Onde T corresponde a 150% da carga máxima que é necessária para dar início a uma fenda no adesivo, B representa a largura do substrato, a a medição do comprimento de fenda e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato [57].

Através do *Compliance Calibration Method* (CCM), é possível determinar a taxa crítica de libertação de energia de deformação em modo I (G_{IC}) recorrendo à equação de Irwin-Kies [55]:

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}, \text{ com} \quad (14)$$

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (15)$$

em que C é a sua flexibilidade, dada pela relação apresentada. Como em variadas juntas adesivas, dependendo do adesivo, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, e esta dificuldade pode introduzir erros não desprezáveis na derivada da flexibilidade relativamente ao comprimento da fenda (dC/da) deve-se ajustar a curva de $C=f(a)$. Utilizou-se um polinómio de 3º grau ($C=C_3a^3+C_2a^2+C_1a+C_0$) que conduz a:

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2B} (3C_3a^2 + 2C_2a + C_1). \quad (16)$$

G_{IC} , pelo método *Corrected Beam Theory* (CBT) é obtida recorrendo à Teoria das Vigas Corrigidas através da seguinte equação [55]:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)}, \quad (17)$$

onde Δ é uma correção para a rotação e deslocamento do substrato junto à frente da fenda. Pelo *Compliance-Based Beam Method* (CBBM) G_{IC} pode ser obtido a partir da equação (14):

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{B^2h} \left(\frac{2a_{eq}^2}{h^2E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right), \quad (18)$$

em que G_{13} representa o módulo de elasticidade ao corte do material, E_f o módulo de flexão e a_{eq} o comprimento de fenda equivalente.

2.4.2 Ensaios em corte (modo II)

O modo puro II é definido como o modo deslizante devido ao corte no qual, como referido anteriormente, as superfícies da fenda se deslocam uma sobre a outra, perpendicularmente à região da frente da fenda. Nos dias de hoje, não há consenso no que respeita a caracterização à fratura em modo II de juntas adesivas. Estão disponíveis vários ensaios para determinar G_{IIc} , onde se destacam os ensaios ENF, ELS e 4ENF [5]. Devido à complexidade da propagação da fenda, a medição experimental do seu comprimento não é muito precisa, tornando-se assim numa desvantagem [11].

Relativamente aos ensaios, o ensaio ENF (Figura 19) é normalmente o mais utilizado para a determinação de G_{IIc} devido à sua simplicidade de fabrico e de condições de ensaio. Este consiste na utilização de um provete com uma espessura constante, apoiado nas extremidades, sujeito a uma carga P a meio vão e a uma velocidade constante, onde em um dos lados é criada uma pré-fenda. Com o carregamento, vai ocorrer a propagação da fenda, registando-se a carga P e o comprimento da fenda em intervalos de tempo constantes. Para minimizar os efeitos de uma propagação de fenda instável, este ensaio requer uma relação $a_0/L > 0,7$ [58].

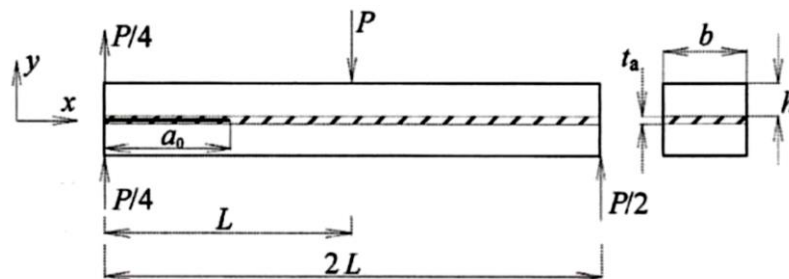


Figura 19 – Geometria e dimensão do provete ENF [5]

Pelo método CCM, G_{IIc} pode ser definido pela expressão [53]:

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B} \frac{dc}{da}, \quad (19)$$

em que m é uma constante. Pelo método *Direct Beam Theory* (DBT) pode escrever-se:

$$G_{IIc} = \frac{9P\delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)}, \quad (20)$$

em que L é o comprimento de metade da amostra. Pelo método CBT tem-se que:

$$G_{IIc} = \frac{9(a + 0,42\Delta_f)^2 P^2}{16B^2 h^3 E_1}, \quad (21)$$

em que E_1 é o módulo de elasticidade na direção longitudinal e Δ_f a correção do comprimento de fenda. G_{IIC} para o ensaio ENF pelo método CBBM é dada pela seguinte equação:

$$G_{IIC} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_f h^3} \quad (22)$$

2.4.3 Ensaios em sollicitação combinada (modos I + II)

Como já citado nos capítulos anteriores, as juntas adesivas estão sujeitas a mais do que um modo de carregamento simultaneamente. Para ser possível determinar a resistência destas juntas em sollicitação combinada, existem vários ensaios, dos quais o mais utilizado é o MMF (Figura 20), que também pode ser designado por *Single-Leg Bending* (SLB). É um ensaio semelhante ao ENF, embora o apoio do aderente inferior seja apenas numa extremidade, estando o outro apoio sob o aderente superior.

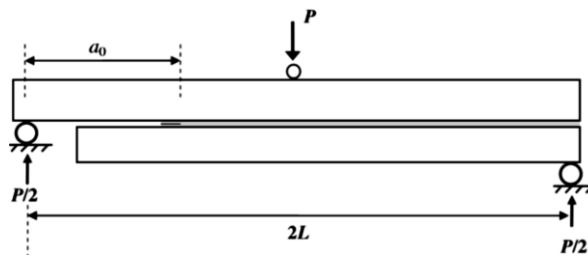


Figura 20 – Geometria e dimensão do provete MMF [5]

Uma das alternativas ao ensaio MMF, é o ensaio *Asymmetric DCB* (Figura 21). É um ensaio semelhante ao DCB, embora as espessuras dos aderentes sejam diferentes, provocando assim o aparecimento do modo de corte. Outra hipótese, é a utilização de aderentes de materiais de rigidez diferente.

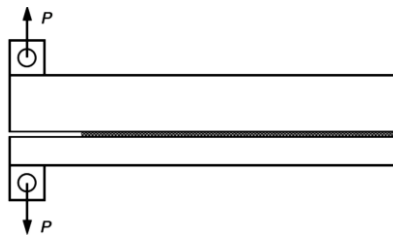


Figura 21 – Geometria do provete ADCB [5]

Dependendo da orientação da sollicitação e das geometrias dos provetes, a proporção dos modos I e II pode variar consideravelmente. Com o objetivo de estudar esta variação de proporções entre os dois modos foi criado o ensaio *Compact Mixed-Mode* (CMM).

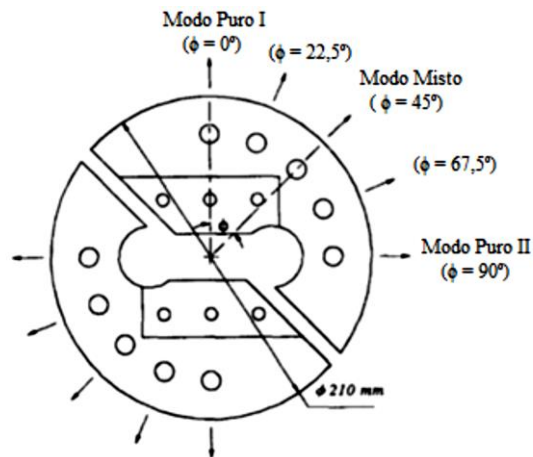


Figura 22 – Ensaio CMM [22]

Como se pode observar na Figura 22, este ensaio dá a possibilidade de testar o provete em modo puro I, modo puro II ou em modo misto I+II, sendo a proporção entre modos dependente da orientação da solicitação exercida sobre o provete. A proporção entre modos é dada pela seguinte equação:

$$\phi = \tan^{-1} \sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}} . \quad (23)$$

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Materiais utilizados

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais usados no trabalho experimental, mais propriamente os substratos e os adesivos, e é feita uma análise detalhada das suas propriedades mecânicas mais relevantes para a análise numérica a realizar.

3.1.1 Substratos

O material usado como substrato em todas as juntas consiste na liga de alumínio AW6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só às boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [10], onde foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tração de 324,00±0,16 MPa, módulo de Young (E) de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência à tração de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura à tração de 21,70±4,24%.

As curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [10], e encontram-se representadas na Figura 23. Também está representada a aproximação numérica usada nos MDC.

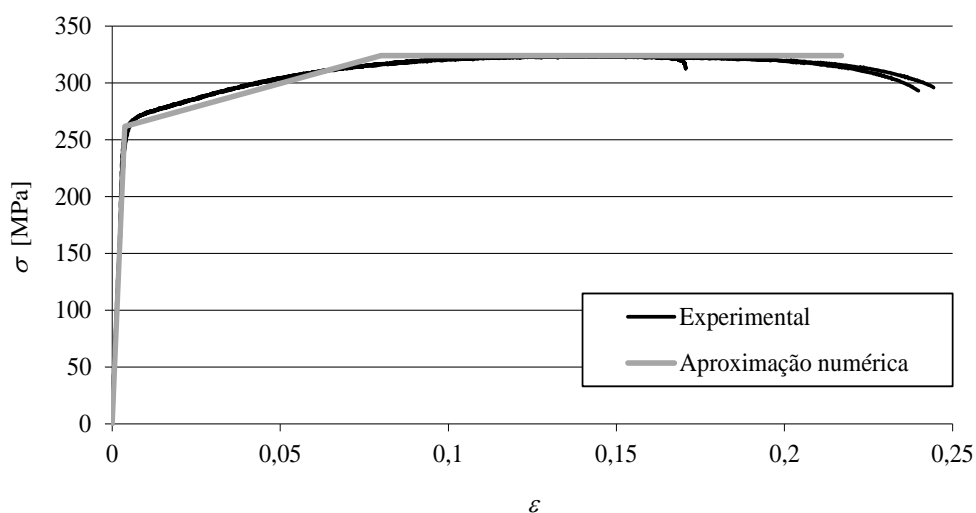


Figura 23 – Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [10]

3.1.2 Adesivos

Neste tópico descrevem-se os adesivos usados no trabalho experimental e suas propriedades. Nos ensaios efetuados usaram-se três tipos de adesivos: o Araldite® AV138, que se caracteriza por ser um adesivo epóxico frágil, o Araldite® 2015 definido como sendo um adesivo epóxico dúctil, e o adesivo Sikaforce® 7752, que se caracteriza como um adesivo poliuretano estrutural que combina elevada ductilidade com resistência mecânica moderada.

3.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 descreve-se como um adesivo epóxico frágil, mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [59]. As curvas σ - ϵ dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 24 [59]. Na Tabela 3 visualizam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

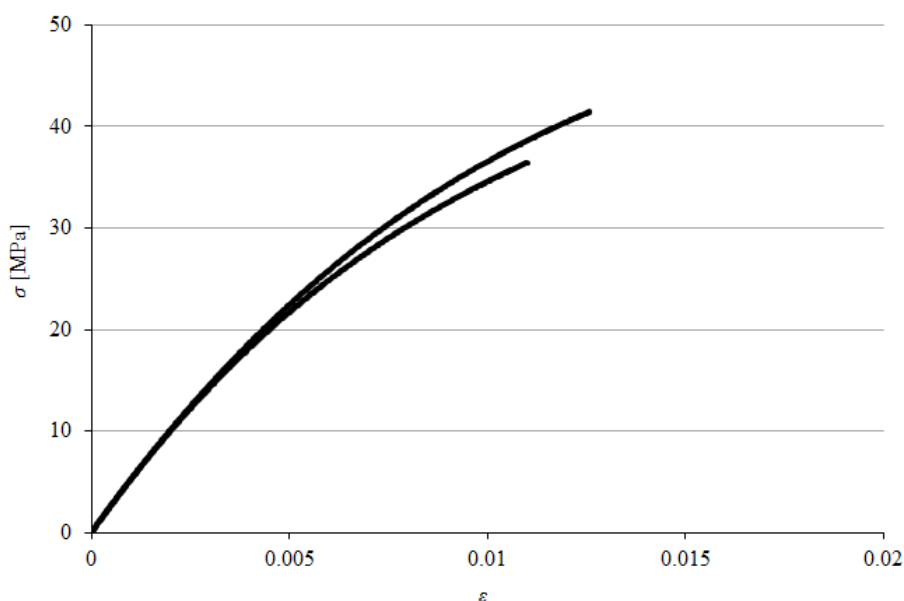


Figura 24 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [36]

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [60]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,35 ^b
Tensão de cedência à tracção, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tracção, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tracção, ϵ_f [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade ao corte, G_{13} [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tracção, G_{Ic} [N/mm]	0,20 ^a
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	0,38 ^a

^a valores estimados na referência

^b valor do fabricante.

3.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural de duas partes, de ductilidade moderada e que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração, tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [59].

Na Figura 25 apresentam-se as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos provetes maciços para este adesivo [36]. Na Tabela 4 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo. Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de rotura ao corte e à tração do Araldite® AV138 é praticamente o dobro da tensão do adesivo Araldite® 2015.

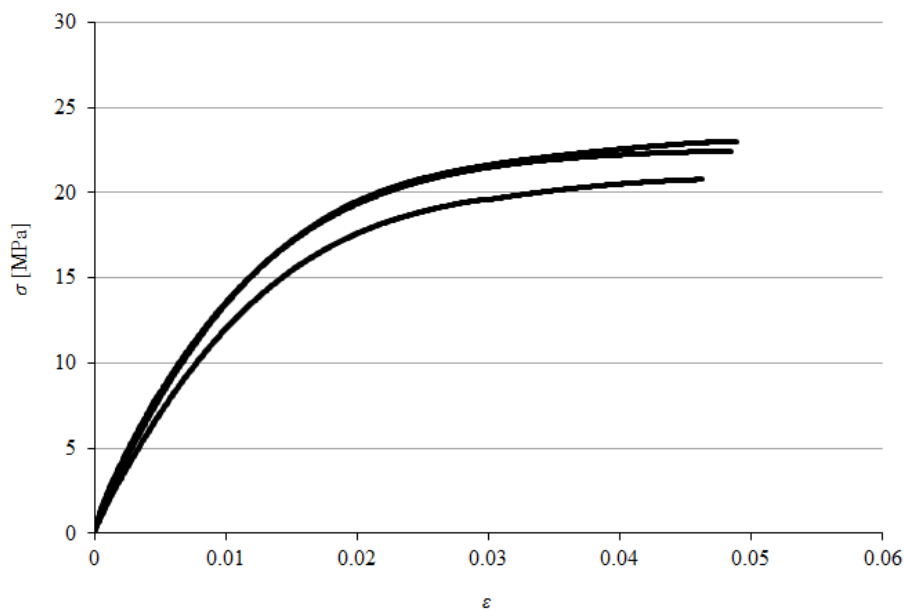


Figura 25 – Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [36]

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [59]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente de Poisson, ν	$0,33\alpha$
Tensão de cedência à tracção, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tracção, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tracção, ε_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de elasticidade ao corte, G_{13} [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 tracção, G_{Ic} [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	$4,70 \pm 0,34$

α valor do fabricante.

3.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo dúctil, conforme se pode observar nas curvas σ - ϵ da Figura 26 [61]. Comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, o SikaForce® 7752 é o que apresenta a menor resistência ao corte e tração dos três adesivos, no entanto é o mais dúctil do conjunto. Trata-se de um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/20 g, respetivamente. Na Tabela 5 apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo [61].

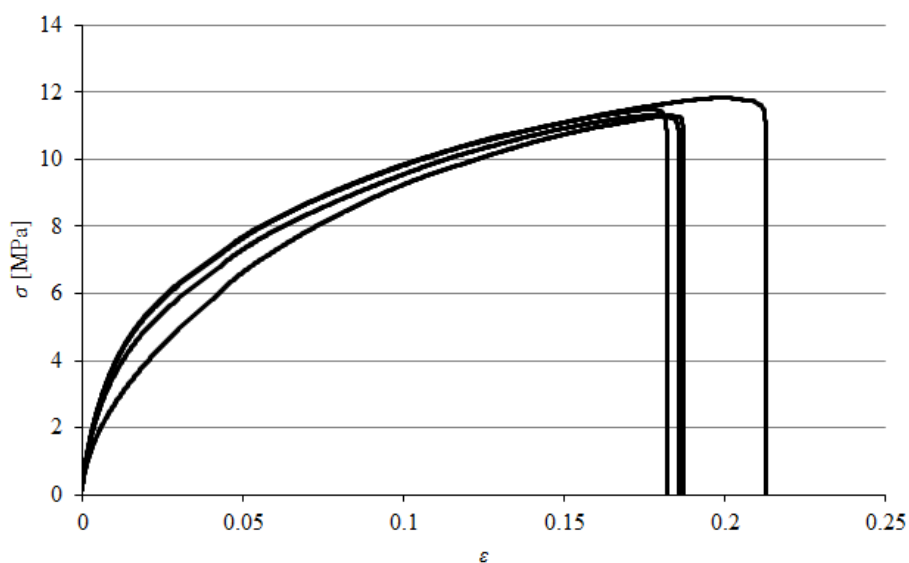


Figura 26 – Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Sikaforce® 7752 [61]

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas coladas com este adesivo seja elevada, pois este adesivo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [62].

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [61]

Propriedades	Sikaforce® 7752 L60
Módulo de Young, E [GPa]	493,81 ± 89,6
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24 ± 0,5
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	11,49 ± 0,3
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	19,18 ± 1,4
Módulo de elasticidade ao corte, G_{13} [GPa]	187,75 ± 16,4
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16 ± 1,1
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17 ± 0,6
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	54,82 ± 6,4
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	2,36 ± 0,2
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	5,41 ± 0,5

^a valor do fabricante

3.2 Determinação dos envelopes de fratura

Nas ligações adesivas a maioria das solicitações ocorrem em modo misto (combinação de tração com corte), tornando-se assim de extrema importância a percepção da fratura nestas condições, nomeadamente das taxas de libertação de energia relativamente a diferentes critérios ou envelopes de fratura. A comparação dos diferentes envelopes de fratura permite averiguar qual o melhor critério energético de rotura a utilizar em modelos numéricos baseados em Modelos de Dano coesivo.

3.2.1 Geometria das juntas SLB

Com o objetivo de que os substratos não se deformem plasticamente durante os ensaios, o material escolhido para os mesmos foi o compósito reforçado com fibra de carbono em vez de alumínio, conseguindo-se assim uma maior precisão nos resultados

obtidos. Devido às restrições dimensionais impostas pelo molde e ao facto de a razão entre a_0 e L ter de ser aproximadamente 70/100 para garantir a propagação estável da fenda, foram utilizadas as seguintes dimensões:

- $L = 125$ mm;
- $a_0 = 87,5$ mm;
- $h_t = 7$ mm (3 mm de espessura de cada substrato e 1 mm de espessura de adesivo).

Na Figura 27 – Geometria do provete SLB está representada a geometria de um provete SLB.

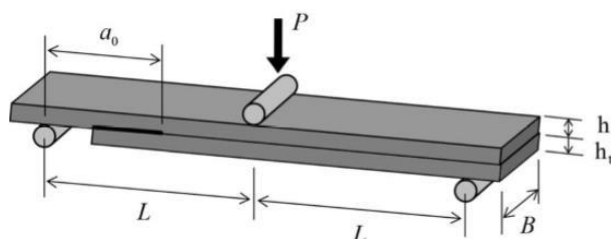


Figura 27 – Geometria do provete SLB [4]

O comprimento do substrato superior é de 280 mm e do substrato inferior é de 200 mm. A largura é igual para os dois substratos, de 15 mm.

3.2.2 Processo de fabrico

3.2.2.1 Fabrico e colagem dos provetes

Para a realização dos ensaios, procedeu-se ao fabrico de 21 provetes, 7 destes destinados aos diferentes tipos de adesivos. Para o fabrico dos substratos foram primeiramente fabricadas 3 placas de compósito reforçado com fibra de carbono com uma dimensão de 300×300 mm², com 3 mm de espessura (igual à espessura desejada para cada substrato). No fabrico das placas foi utilizado um rolo com uma espessura de 0,15 mm de pré-impregnado, tendo sido necessárias 21 camadas de pré-impregnado para obter 3 mm de espessura. De forma a dar início ao empilhamento das 21 camadas, aplicou-se calor (Figura 28) em 2 camadas de pré-impregnado com a mesma orientação (0°) para ativar a resina e unir assim estas 2 camadas.

Seguidamente, aplicou-se pressão sob as camadas com o auxílio de uma placa metálica, desde o interior até à periferia, com o objetivo de eliminar as bolhas de ar. A pressão é aplicada sobre uma folha de proteção contida em cada camada, que antes de ser aplicada a camada seguinte era retirada. As últimas folhas de proteção (na parte inferior e superior da placa) não são removidas de modo a servirem de proteção nas etapas seguintes do fabrico.

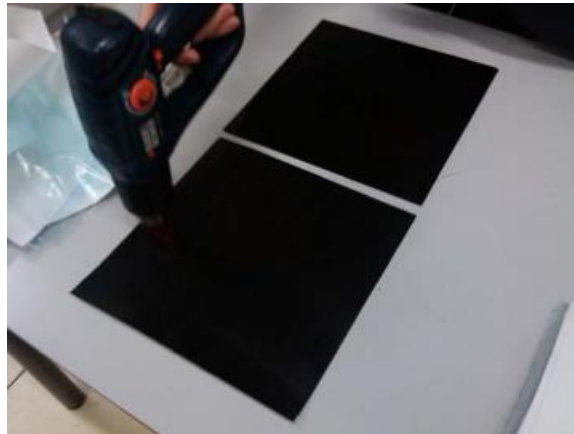


Figura 28 – União das camadas através da aplicação de calor [4]

Após o empilhamento das 21 camadas, as placas são colocadas num molde que posteriormente é colocado numa prensa de pratos quentes (Figura 29) com uma pressão constante de 3 bar, e é submetido ao ciclo térmico representado na Figura 30 .



Figura 29 – Prensa de pratos quentes [4]

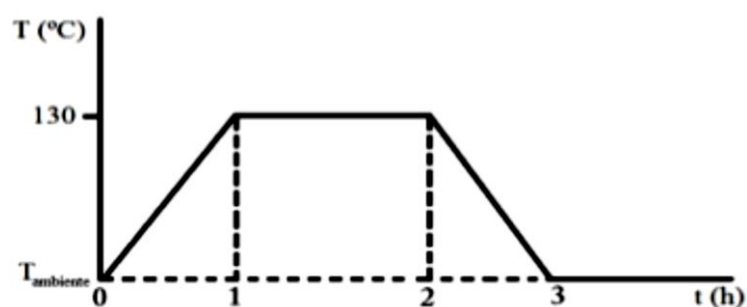


Figura 30 – Ciclo térmico aplicado [4]

Após o término do ciclo térmico, a placa foi retirada do molde referido anteriormente. De seguida foram retiradas as placas de proteção e cortaram-se as placas de compósito com as dimensões desejadas para os substratos. Estas foram cortadas numa máquina

de corte com disco diamantado e com pulverização a água, de modo a evitar a suspensão de partículas nocivas.

Após o corte dos substratos, procedeu-se à secagem dos mesmos para uma posterior preparação superficial. Na preparação superficial foi utilizada uma lixa de grão P60 com o intuito de limpar a superfície dos substratos, aumentando assim a adesão do adesivo à superfície e também a área de contacto dos mesmos. Após a lixagem, os substratos foram novamente limpos com acetona.

Para que a espessura do adesivo seja a desejada e para a criação de uma pré-fenda, foram utilizados espaçadores. Para a preparação dos espaçadores a colocar na extremidade interior do provete, responsáveis pela criação da pré fenda, são necessárias 2 chapas de alumínio com 0,45 mm de espessura e uma lâmina de 0,1 mm (colocada entre as outras 2 lâminas) de modo a obter a espessura de 1 mm desejada. Estas lâminas são limpas com acetona e posteriormente fixas, recorrendo a um adesivo cianocrilato, e de forma a que a lamina de 0,1 mm sobressaia para permitir a criação da pré-fenda. Para a extremidade do provete em que não é pretendida a criação da pré-fenda, os espaçadores são constituídos por um único elemento com 1 mm de espessura.

Posteriormente, os espaçadores são aquecidos num forno elétrico com o objetivo de aumentar a sua temperatura, o que vai facilitar o processo de adesão para ser aplicado o desmoldante. O desmoldante (Loctite Frekote[®] 770-NC) é aplicado 3 vezes em cada superfície do espaçador [4].

Após a preparação dos substratos e dos espaçadores, pode-se proceder à colagem dos provetes. Utilizaram-se plataformas de madeira onde foram colocados os provetes, sob uma película de Teflon[®], de modo a evitar, que em caso de vazamento de adesivo, estes ficassem colados à plataforma de madeira. Após o revestimento das plataformas, os substratos de maiores dimensões foram colocados sobre estas e foi demarcada a posição onde os espaçadores deviam ser colocados. Após o posicionamento dos espaçadores, estes foram fixados através de pequenas quantidades de cianocrilato, para que não se movessem da posição demarcada anteriormente sem, no entanto, impedir a sua fácil remoção após a cura do adesivo.

De seguida, foi aplicado o adesivo na área de contacto pretendida e posicionado o substrato menor sobre o adesivo. Através de alguma pressão manual sobre os provetes, foi eliminado o excesso de adesivo, sendo assim assegurado o contacto entre os espaçadores e os substratos. De forma a garantir uma melhor distribuição de tensões, foi utilizada uma régua durante a aplicação da pressão, para garantir uma melhor distribuição de tensões durante a aplicação da pressão, para evitar zonas com menor concentração de adesivo. Paralelamente ao processo de colagem dos substratos foram colocados calços na extremidade da pré-fenda (Figura 31).

Para finalizar a colagem dos substratos são colocados grampos que exercem pressão nos locais onde estão colocados os espaçadores. Os grampos são deixados durante a cura do adesivo de modo a assegurar um correto posicionamento entre os substratos e garantir a espessura desejada (Figura 31).

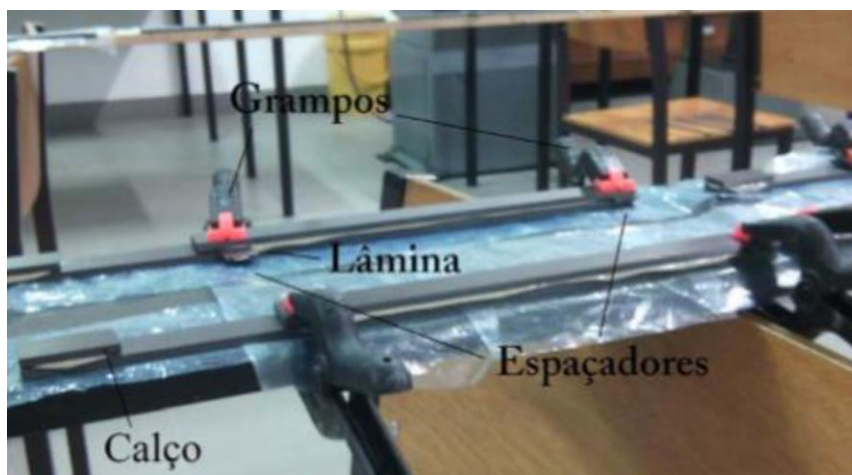


Figura 31 – Posicionamento dos espaçadores, calço e grampos, durante a aplicação de pressão nos provetes [4]

3.2.2.2 Preparação dos provetes para ensaio

Antes de se realizarem os ensaios é ainda necessário proceder a algumas operações. Para que os adesivos adquiram uma rigidez suficiente, estes devem respeitar os seguintes tempos de cura:

- Araldite® AV138- 3 dias;
- Araldite® 2015- 3 dias;
- SikaForce® 7752- 5 dias.

Após o término do respetivo tempo de cura para cada adesivo, procedeu-se à remoção, com o auxílio de um alicate, dos espaçadores e do excesso de adesivo nos provetes. Esta última etapa deve ser realizada com um cuidado adicional, pois pode ocorrer a danificação do provete bem como a remoção de adesivo da zona útil de ligação (Figura 32).

Com apenas o alicate torna-se impossível a remoção completa do adesivo em excesso, sendo necessário utilizar uma mó com rugosidade reduzida de modo a não danificar os substratos. De seguida, os provetes são novamente limpos com acetona, registando em uma das superfícies dos substratos o tipo de adesivo e o número correspondente a cada adesivo. Posteriormente pintou-se a face que iria ser alvo de registo fotográfico com correto de modo a conseguir uma melhor identificação da fenda na análise das imagens [4].



Figura 32 – Provete SLB, após remoção do excesso de adesivo [4]

Após estas etapas foi criada manualmente uma pré-fenda através de uma reduzida carga para separar os substratos na zona onde se iniciará a fenda. A distância entre a extremidade da fenda até ao apoio esquerdo (a_0) foi registada, tendo-se obtido os valores presentes na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de a_0 [mm] medidos para cada provete [4]

Provete	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
1	85,60	88,39	85,98
2	85,63	85,60	88,51
3	84,54	85,40	85,82
4	86,87	84,67	88,61
5	104,36	88,96	87,17
6	86,40	88,52	86,70
7	91,45	86,80	85,30

Os valores de a_0 obtidos foram, no geral, aproximados dos pretendidos (87,5 mm). No entanto houve 2 provetes, ambos do adesivo Araldite® AV138, com valores superiores devido à propagação excessiva na altura da propagação normal da fenda, induzida pela fragilidade do adesivo. Para concluir, é colada uma escala em cada substrato do adesivo do lado onde será realizado o registo fotográfico (Figura 33).

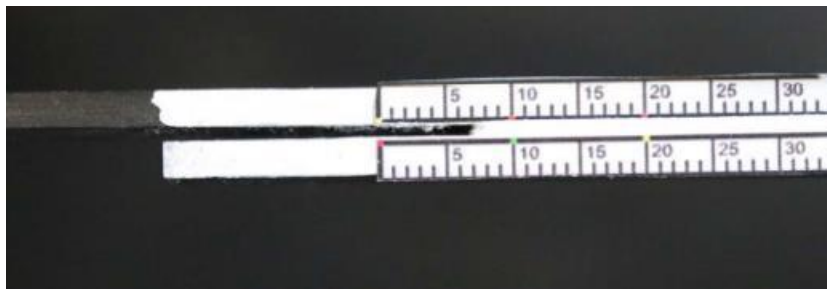


Figura 33 – Aspeto final de um provete para ensaio [4]

3.2.3 Ensaio das juntas SLB

3.2.3.1 Condições de ensaio

Para a realização dos ensaios dos provetes SLB foi utilizada uma máquina de ensaios eletromecânica Shimadzu AG-X 100 com uma célula de carga de 100 kN. A máquina utilizada encontrava-se ligada a um computador que era responsável pelo processamento do ensaio e pelo registo dos dados relativos ao ensaio. Após o ensaio, é possível obter um gráfico P [N] vs. deslocamento δ [mm] com uma frequência de aquisição de dados de 4 Hz [4].

3.2.3.2 Método ótico

Com o objetivo de controlar a evolução do comprimento de fenda foi utilizada uma máquina fotográfica Canon EOS 70D de 20,2 MPx com apoio fixo. Foi também utilizado um cronómetro e um sistema de iluminação para uma melhor qualidade fotográfica. Pode-se observar na Figura 34 o setup do ensaio [42].



Figura 34 – Setup do ensaio SLB [4]

3.2.3.3 Realização dos ensaios

Para dar início à realização dos ensaios, o provete é colocado na posição desejada, sendo este alinhado por linhas paralelas marcadas em ambos os apoios do ensaio para que a força seja aplicada perpendicularmente ao comprimento dos provetes. Após os provetes estarem alinhados, segue-se a regulação manual da altura do punção, colocando-o próximo do provete para que o ensaio tenha início quando a máquina é acionada.

Com a altura do punção já regulada, procede-se ao correto posicionamento da máquina fotográfica para que o provete, mesmo com os efeitos de flexão que irá sofrer, não saia do campo de visão da máquina fotográfica. Após o término da preparação do *setup* de ensaio, o ensaio tem início com uma velocidade diferente para cada adesivo e enquadrada na suposição de ensaio quase-estático (evitando a influência de efeitos viscoelásticos). As velocidades de ensaio escolhidas para cada adesivo foram as seguintes:

- Araldite® AV138- 0,35 mm/min;
- Araldite® 2015- 0,8 mm/min;
- SikaForce® 7752- 3 mm/min.

O ensaio termina quando a propagação da fenda atinge a zona do punção (metade do comprimento total do provete) ou quando é atingida a força máxima para a junta. Durante o ensaio é efetuado o registo fotográfico de 5 em 5 segundos até ao fim do mesmo.

3.2.4 Resultados obtidos dos provetes SLB

3.2.4.1 Araldite® AV138

3.2.4.1.1 Curvas $P-\delta$

Para o adesivo Araldite® AV138 foram testados 7 provetes, sendo conseguidas as curvas $P-\delta$ presentes na Figura 35. Através da observação das curvas obtidas, é possível constatar que à exceção do provete 2, todos os restantes apresentaram um comportamento semelhante após o início da fenda pois os adesivos tiveram uma diminuição considerável da força, o que indica que o adesivo tem um comportamento à rotura frágil. É possível observar também que todos os adesivos atingiram uma carga máxima superior a 80 N, à exceção do provete 5.

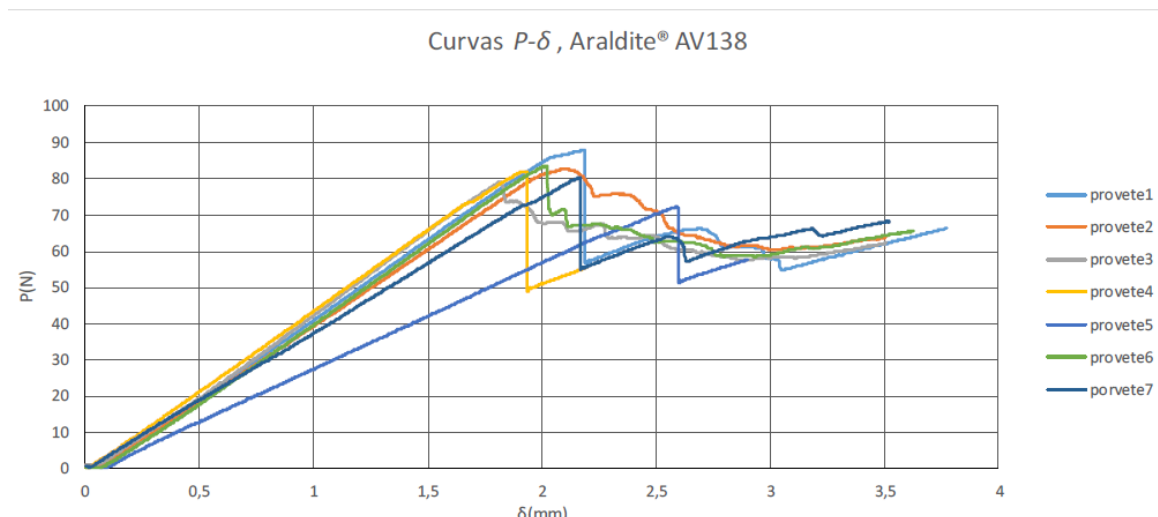


Figura 35 – Curvas $P-\delta$ obtidas do Adesivo Araldite® AV138 [63]

No que diz respeito à rigidez verifica-se que à exceção do provete 5 (Tabela 7), todos os restantes apresentam uma rigidez aproximadamente igual até ao momento em que é atingido o ponto de carga máxima pois o declive das várias curvas é semelhante. Na Tabela 7 é possível observar a carga máxima e o respetivo deslocamento para cada provete.

Tabela 7 – Valores máximos de P e δ obtidos nos ensaios do adesivo Araldite® AV138 [63]

# Provete	Deslocamento à carga máxima [mm]	Força máxima [N]
1	2,18	87,9
2	2,10	82,8
3	1,82	79,1
4	1,92	82,1
5	2,59	72,2
6	2,02	83,7
7	2,16	80,2
Média	2,11	81,1
Desvio padrão	0,25	4,8

3.2.4.1.2 Determinação de G_I e G_{II}

Através da análise dos resultados dos ensaios é possível obter os valores de G_I e de G_{II} através de 6 métodos, 5 dos quais são baseados no comprimento real da fenda e o restante baseia-se no conceito de fenda equivalente.

Na Figura 36 e na Figura 37 estão registadas as curvas-R de um provete representativo dos ensaios com este adesivo, considerando os diversos modelos utilizados para a determinação de G_I e de G_{II} .

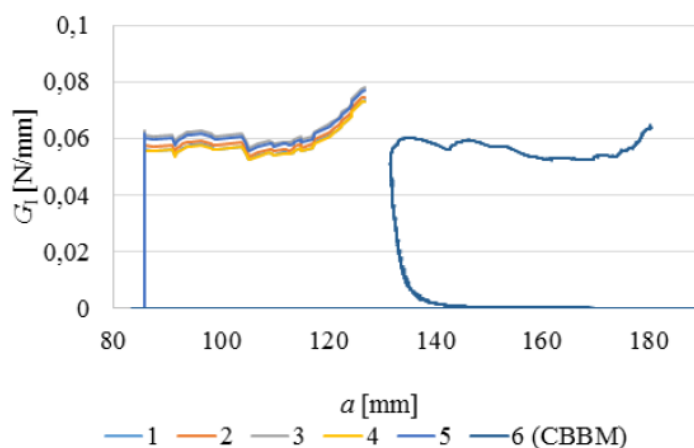


Figura 36 – Curvas-R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 do adesivo Araldite® AV138 [63]

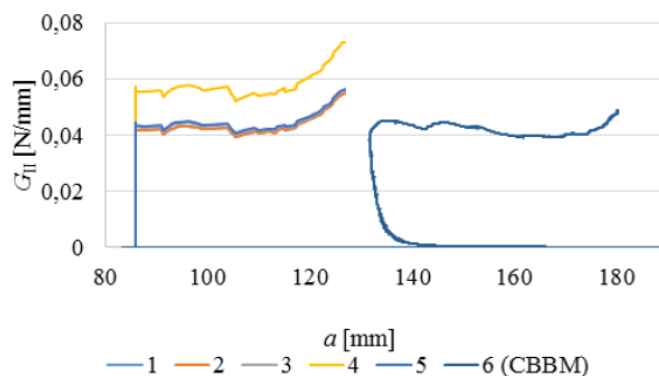


Figura 37 – Curvas-R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 do adesivo Araldite® AV138 [63]

Nesta análise não foi considerado o provete 4 pois este sofreu uma rotura prematura e desse modo os valores de G_I e de G_{II} iriam ser bastante inferiores aos restantes. No que diz respeito a G_I pode-se concluir que os métodos que se baseiam na medição do comprimento de fenda apresentam uma forma semelhante, sendo os valores ligeiramente diferentes. Para o método CCBM é possível constatar que apesar do método se basear no conceito de fenda equivalente, este possui resultados

comparáveis. Para G_{II} foi possível obter curvas R semelhantes às de G_I mas com valores inferiores. Em contraste com o que sucedeu para G_I , o método 4 apresenta resultados superiores em comparação com os outros métodos.

Através da observação das curvas R, tanto para o modo I como para o modo II, foi possível concluir que estas apresentam um patamar aproximadamente constante durante a propagação de fenda ($80 \leq a \leq 120$). Uma possível explicação para a existência de um patamar constante é o facto de o adesivo ter tido um comportamento estável durante a propagação da fenda.

Para o cálculo de G_I e de G_{II} é considerada a zona do gráfico em que a taxa de libertação de energia apresenta um patamar que é indicativo de propagação de fenda com G_I e G_{II} constante. Os valores obtidos para todos os provetes estão presentes na Tabela 8 e Tabela 9.

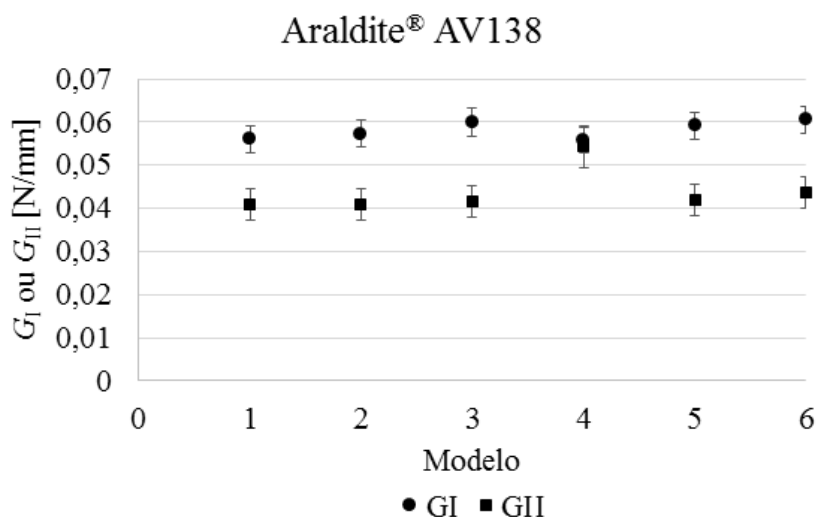
Tabela 8 – Valores de G_I obtidos para o adesivo Araldite® AV138 [63]

# Proвете	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
1	0,0586	0,0599	0,0628	0,0584	0,0619	0,0634	0,0609
2	0,0574	0,0586	0,0617	0,0571	0,0607	0,0603	0,0593
3	0,0565	0,0576	0,0603	0,0563	0,0594	0,0627	0,0588
5	0,0566	0,0578	0,0607	0,0564	0,0598	0,0627	0,0590
6	0,0500	0,0511	0,0536	0,0498	0,0528	0,0549	0,0589
7	0,0572	0,0584	0,0612	0,0571	0,0604	0,0594	0,0589
Média	0,0561	0,0573	0,0600	0,0559	0,0592	0,0605	0,0582
Desvio padrão	0,0031	0,0031	0,0033	0,0031	0,0032	0,0032	0,0031

Tabela 9 – Valores de G_{II} obtidos para o adesivo Araldite® AV138 [63]

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
1	0,0438	0,0438	0,0448	0,0584	0,0451	0,0412	0,0462
2	0,0429	0,0429	0,0438	0,0571	0,0442	0,051	0,0460
3	0,0422	0,0422	0,0431	0,0563	0,0434	0,0469	0,0457
5	0,0423	0,0423	0,0432	0,0564	0,0436	0,0469	0,0458
6	0,0373	0,0373	0,0382	0,0498	0,0385	0,0411	0,0404
7	0,0428	0,0428	0,0437	0,0571	0,0440	0,0444	0,0458
Média	0,0419	0,0419	0,0428	0,0559	0,0432	0,0443	0,0450
Desvio padrão	0,0023	0,0023	0,0023	0,0031	0,0024	0,0026	0,0023

Na Figura 38 estão representados de forma gráfica os resultados obtidos onde se pode observar, como já referido anteriormente, que os vários métodos produzem resultados semelhantes à exceção do método 4 para G_{II} .

Figura 38 - Resumo dos resultados experimentais G_I e G_{II} obtidos do adesivo Araldite® AV138 [63]

3.2.4.1.3 Determinação dos envelopes de fratura

Tendo como base o método CBBM (Figura 39), está representado o envelope de fratura do adesivo Araldite® AV138 com quatro expoentes diferentes aplicados na equação que define a relação entre G_I e G_{II} . Através da observação dos envelopes de fratura verifica-se que os vários ensaios aos provetes produziram resultados semelhantes, pois os vários pontos relativos aos ensaios experimentais apresentaram uma dispersão bastante reduzida. Os resultados obtidos aproximaram-se da curva relativa ao expoente 0,5 o que permite concluir que o critério de propagação respetivo é o que melhor se adequa a este adesivo.

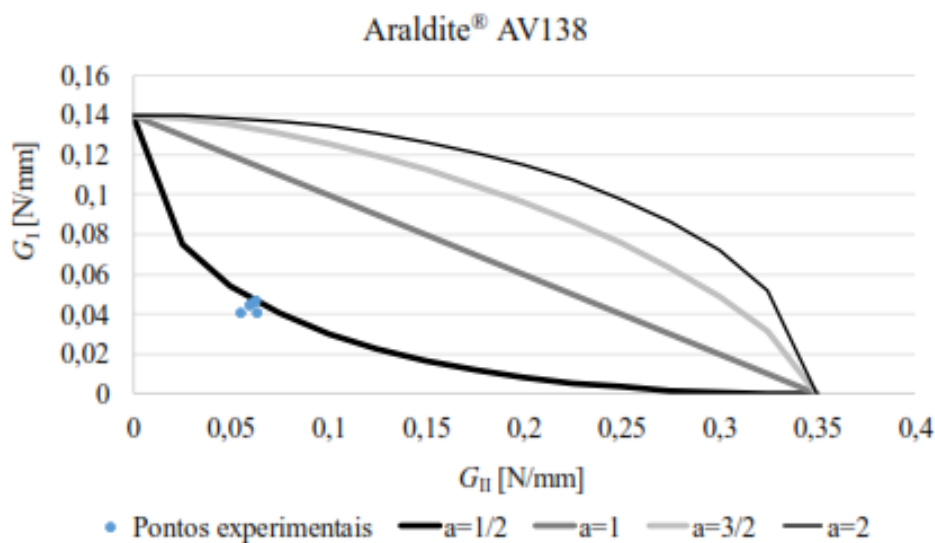


Figura 39 - Envelope de fratura experimental do adesivo Araldite® AV138 [63]

3.2.4.2 Araldite® 2015

3.2.4.2.1 Curvas $P-\delta$

Para o adesivo Araldite®2015 foram testados 7 provetes, obtendo-se as curvas $P-\delta$ representadas na Figura 40. Através da observação das curvas $P-\delta$ é possível constatar que o adesivo apresentou uma rigidez semelhante durante os vários ensaios pois o declive das curvas até que a força máxima é atingida é bastante semelhante. É também possível observar o diferente comportamento que os vários ensaios tiveram após a rotura. Nos ensaios 2/5/6 e 7 após o início da propagação de fenda, a força tem uma diminuição abrupta enquanto que nos restantes a diminuição da força ocorre progressivamente.

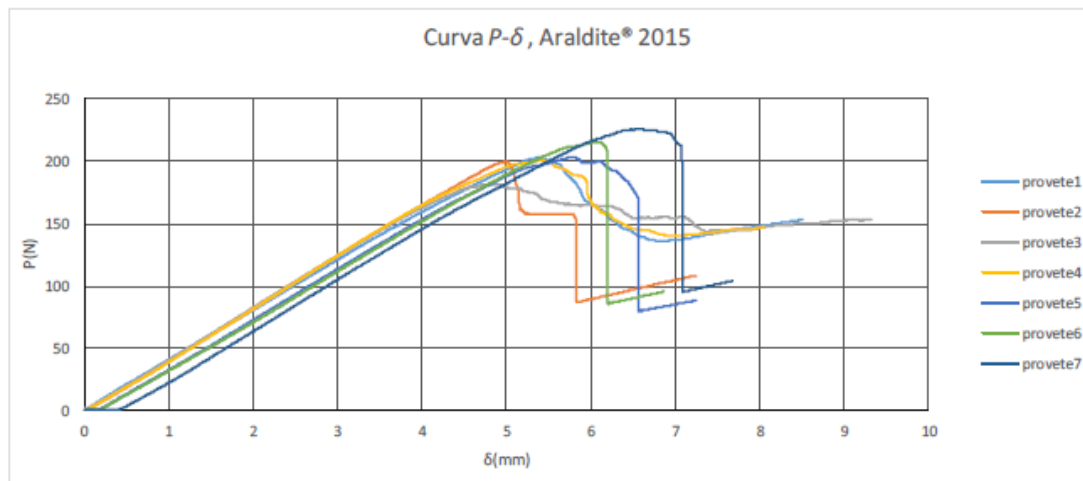


Figura 40 - Curvas $P-\delta$ obtidas do adesivo Araldite® 2015 [63]

A Tabela 10 representa os valores máximos de força e deslocamento à carga máxima para os vários provetes ensaiados.

Tabela 10 – Valores máximos de P e δ obtidos nos ensaios do adesivo Araldite® 2015 [63]

# Proвете	Deslocamento à carga máxima [mm]	Força máxima [N]
1	5,35	202,8
2	4,99	199,4
3	4,83	181,9
4	5,39	200,7
5	5,77	203,3
6	6,04	215,5
7	6,60	226,1
Média	5,57	204,3
Desvio Padrão	0,6175	13,7

3.2.4.2.2 Determinação de G_I e G_{II}

Após a obtenção dos resultados relativos ao adesivo, seguiu-se a análise dos mesmos com o objetivo de obter os valores de G_I e de G_{II} . Na Figura 41 e na Figura 42 estão representadas as curvas R relativas aos modelos utilizados para a determinação de G_I e de G_{II} , respetivamente, considerando um ensaio representativo dos resultados obtidos.

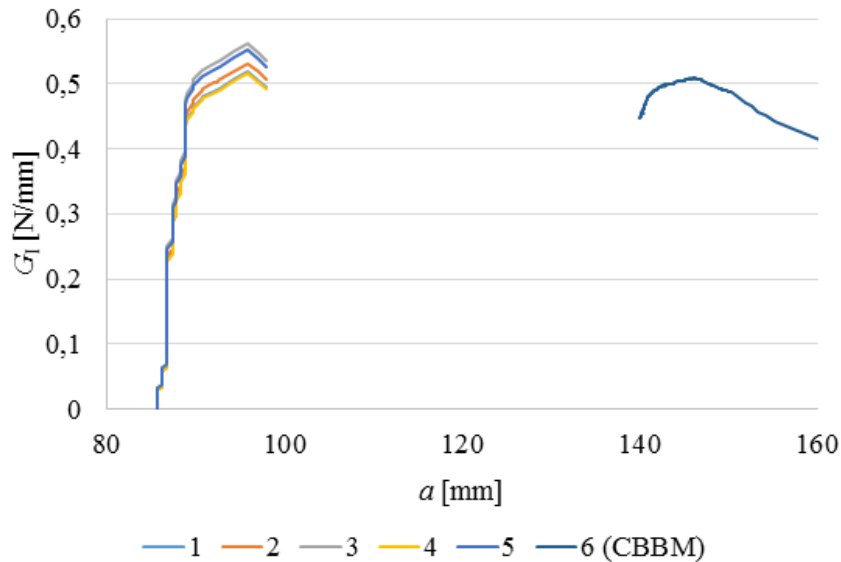


Figura 41 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #7 do adesivo Araldite® 2015 [63]

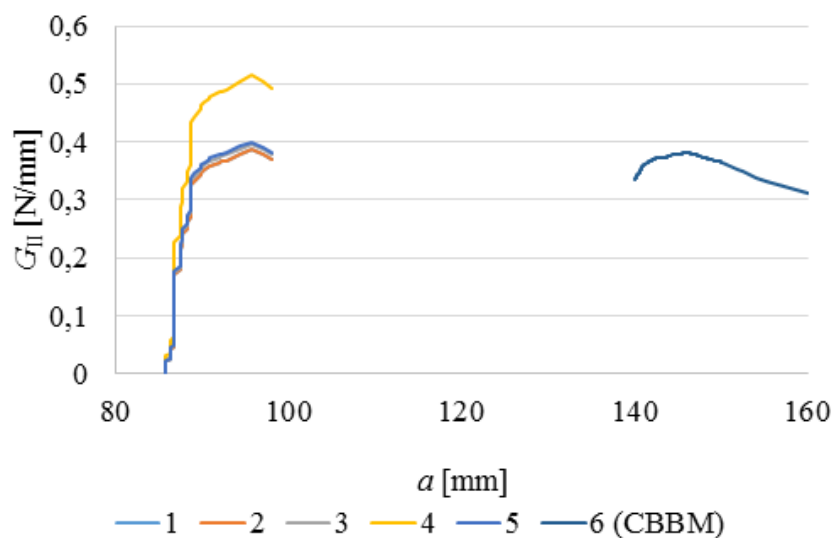


Figura 42 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #7 do adesivo Araldite® 2015 [63]

No que diz respeito a G_I é possível concluir que os métodos que requerem a medição do comprimento de fenda apresentam curvas semelhantes, sendo os valores ligeiramente diferentes. Para o método CBBM é possível observar que apesar do método ser baseado no conceito de fenda equivalente, este possui resultados semelhantes aos outros métodos. Para G_{II} , o comportamento dos resultados é semelhante ao de G_I à exceção do modelo 4 que apresenta resultados bastante superiores aos outros métodos.

Para este adesivo, quer para o modo I como para o modo II, as curvas-R não apresentam um patamar estável aquando da propagação da fenda. Na ausência desse patamar estável, é possível observar uma diminuição do declive aquando da propagação da fenda, sendo essa zona a indicada para o cálculo da taxa de libertação de energia.

Devido ao facto de o adesivo Araldite® 2015 ser mais dúctil que o Araldite® AV138, este apresenta valores superiores de G_I e G_{II} . Para o cálculo de G_I e G_{II} apenas é considerada a zona do gráfico em que a taxa de libertação de energia se aproxima de um patamar apesar de que para este adesivo não se obtenha um patamar bem definido, que indica a propagação da fenda. Os valores de G_I e de G_{II} obtidos através destes métodos estão indicados na Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 – Valores de G_I obtidos para o adesivo Araldite® 2015 [63]

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
1	0,384	0,394	0,418	0,382	0,410	0,374	0,392
2	0,404	0,415	0,440	0,375	0,432	0,365	0,405
3	0,339	0,346	0,363	0,338	0,358	0,402	0,355
4	0,413	0,421	0,442	0,411	0,436	0,370	0,415
5	0,443	0,443	0,468	0,430	0,460	0,404	0,440
6	0,431	0,442	0,468	0,429	0,460	0,444	0,443
7	0,443	0,455	0,482	0,441	0,474	0,462	0,457
Média	0,408	0,417	0,440	0,401	0,433	0,403	0,415
Desvio Padrão	0,037	0,037	0,040	0,037	0,039	0,038	0,035

Tabela 12 – Valores de G_{II} obtidos para o adesivo Araldite® 2015 [63]

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
1	0,286	0,286	0,294	0,382	0,297	0,280	0,302
2	0,301	0,301	0,309	0,375	0,313	0,273	0,310
3	0,254	0,254	0,259	0,338	0,261	0,301	0,274
4	0,308	0,308	0,315	0,411	0,318	0,277	0,321
5	0,331	0,323	0,331	0,430	0,334	0,302	0,339
6	0,322	0,322	0,330	0,429	0,333	0,332	0,341
7	0,331	0,331	0,339	0,441	0,343	0,346	0,352
Média	0,305	0,303	0,311	0,401	0,314	0,301	0,320
Desvio Padrão	0,028	0,027	0,028	0,037	0,028	0,028	0,027

Na Figura 43 é possível observar o resumo dos resultados obtidos de forma gráfica em que, à exceção do método 4, todos os restantes métodos originaram resultados idênticos.

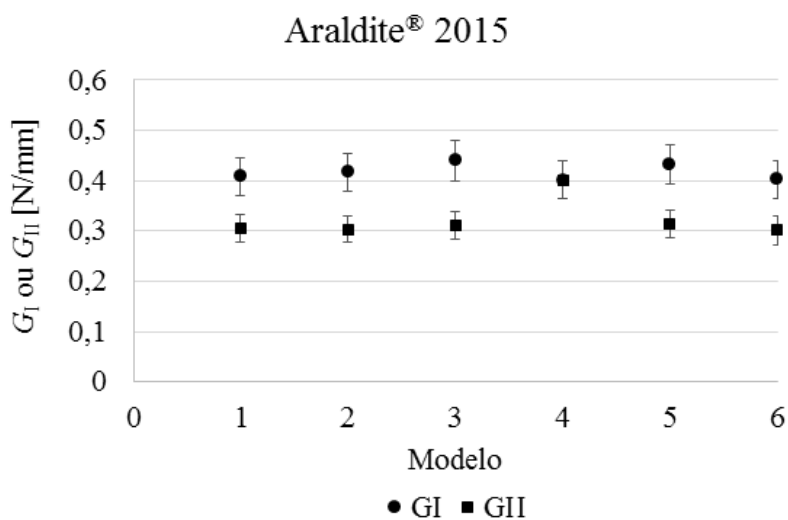


Figura 43 - Resumo dos resultados experimentais obtidos do adesivo Araldite® 2015 [63]

3.2.4.2.3 Determinação dos envelopes de fratura

Na Figura 44 está representado o envelope de fratura para o adesivo Araldite® 2015, onde é possível verificar que os vários ensaios dos provetes apresentaram resultados ligeiramente diferentes e que possuem uma dispersão significativa. No entanto, é possível concluir que os resultados obtidos se aproximam da curva relativa ao expoente de 0,5, o que permite concluir que para este adesivo este parâmetro da lei de propagação é o que melhor se adequa para a análise e previsão do comportamento do adesivo em questão.

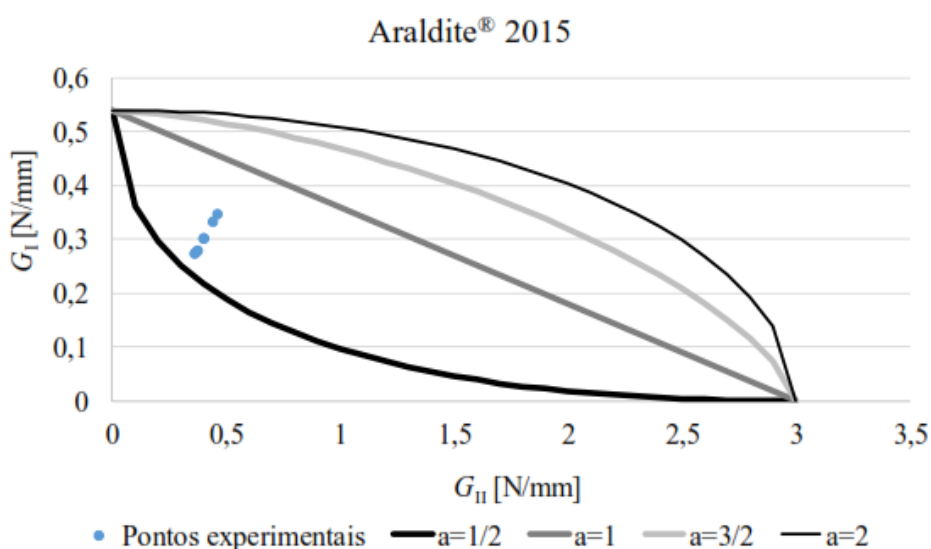


Figura 44 - Envelope de fratura experimental do adesivo Araldite® 2015 [63]

3.2.4.3 Sikaforce® 7752

3.2.4.3.1 Curvas $P-\delta$

Para o adesivo Sikaforce® 7752 foram testados 7 provetes, cujas curvas $P-\delta$ são apresentadas na Figura 45. Através da observação das curvas $P-\delta$ é possível concluir que o adesivo apresentou uma rigidez semelhante nos vários ensaios pois o declive das curvas até ao ponto de força máxima é semelhante. Após a rotura ocorre uma diminuição abrupta da força.

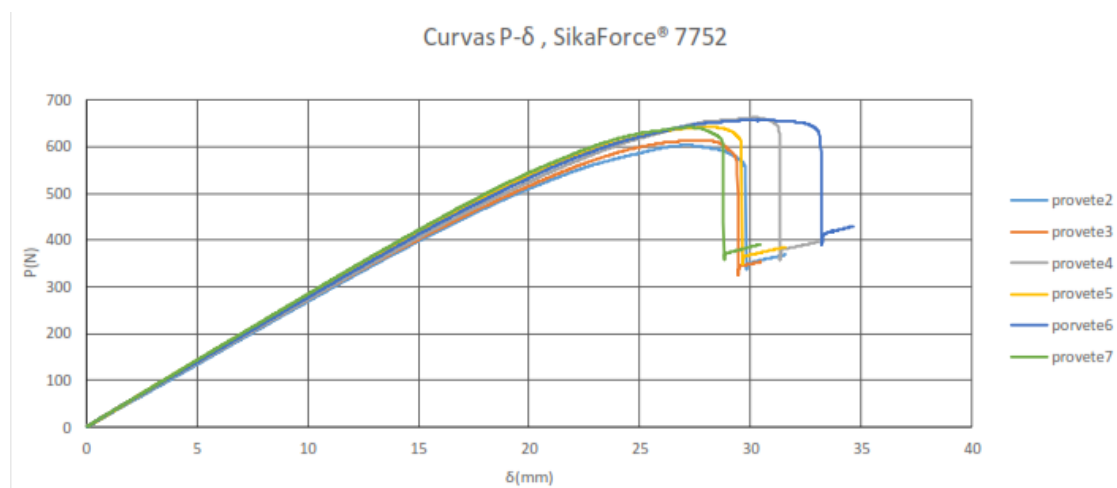


Figura 45 - Curvas P - δ obtidas do adesivo Sikaforce® 7752 [63]

Na Tabela 13 estão registados os máximos valores para a força e deslocamento à carga máxima que os provetes atingiram durante os ensaios. Os valores referentes ao provete 1 foram ignorados porque durante o ensaio o provete ficou fora do alcance da máquina fotográfica, pelo que se tornou impossível a monitorização do comprimento da fenda.

Tabela 13 – Valores máximos de P e respetivo δ obtidos nos ensaios do adesivo Sikaforce® 7752 [63]

# Proвете	Deslocamento à carga máxima (mm)	Força máxima (N)
2	27,07	603,6
3	27,63	613,4
4	30,28	662,8
5	28,23	642,9
6	29,97	657,4
7	27,21	642,1
Média	28,40	637,1
Desvio Padrão	1,40	23,7

3.2.4.3.2 Determinação de G_I e G_{II}

Após terem sido adquiridos os resultados experimentais, procedeu-se à análise de modo a obter os valores de G_I e de G_{II} resultantes dos vários provetes ensaiados. Na Figura 46 e na Figura 47 estão representadas as curvas-R referentes aos modelos utilizados para a determinação de G_I e G_{II} para um provete representativo dos resultados obtidos.

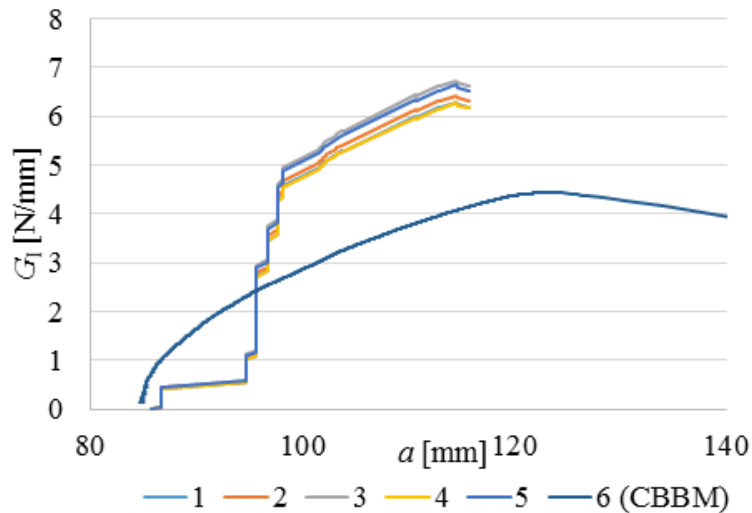


Figura 46 - Curvas-R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #6 do adesivo Sikaforce® 7752 [63]

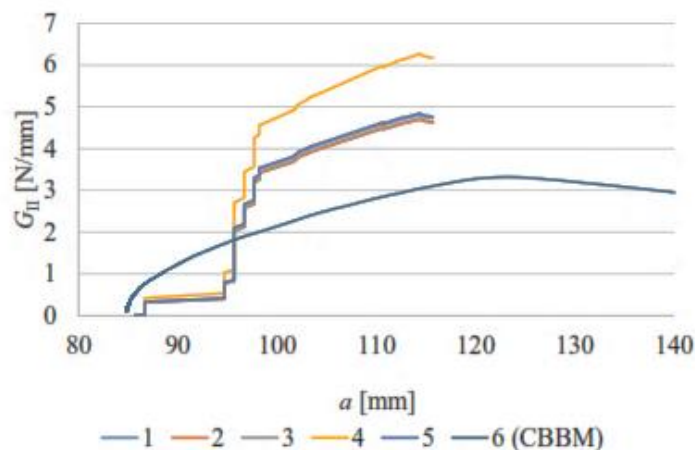


Figura 47 - Curvas-R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #6 do adesivo Sikaforce® 7752 [63]

Através da análise das curvas-R verifica-se que o método CBBM, ao contrário do que aconteceu com os restantes adesivos, não teve o comprimento de fenda equivalente deslocado para a direita, aproximando-se assim dos comprimentos de fenda reais. É também possível constatar que, apesar de ser possível identificar um patamar, este

possui um declive considerável, o que indica que a propagação da fenda não ocorreu com valores de G_I e G_{II} constantes. Devido a este facto apenas foi considerada a zona inicial de propagação de fenda para o cálculo dos valores de G_I e G_{II} . Os valores de G_I e G_{II} estão representados na Tabela 14 e Tabela 15, respetivamente.

Tabela 14 – Valores de G_I obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752 [63]

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
2	3,196	3,272	3,453	3,182	3,397	3,318	3,287
3	3,184	3,256	3,246	3,171	3,373	3,401	3,284
4	3,475	3,559	3,758	3,459	3,696	3,650	3,580
5	3,250	3,330	3,519	3,235	3,460	3,524	3,366
6	3,137	3,211	3,388	3,123	3,333	3,418	3,249
7	3,356	3,432	3,611	3,343	3,555	3,612	3,466
Média	3,266	3,343	3,526	3,252	3,469	3,487	3,372
Desvio Padrão	0,127	0,130	0,138	0,126	0,136	0,130	0,128

Tabela 15 Valores de G_{II} obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752 [63]

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
2	2,386	2,386	2,443	3,182	2,468	2,468	2,534
3	2,378	2,378	2,432	3,171	2,455	2,548	2,534
4	2,594	2,594	2,657	3,459	2,684	2,716	2,757
5	2,426	2,426	2,486	3,235	2,511	2,640	2,593
6	2,342	2,342	2,398	3,123	2,422	2,559	2,504
7	2,507	2,507	2,0563	3,343	2,588	2,705	2,675
Média	2,439	2,439	2,496	3,252	2,521	2,609	2,599
Desvio Padrão	0,095	0,095	0,097	0,126	0,098	0,93	0,098

Na Figura 48 é possível observar o resumo dos resultados obtidos de forma gráfica em que, à exceção do método 4, todos os restantes métodos originaram resultados idênticos.

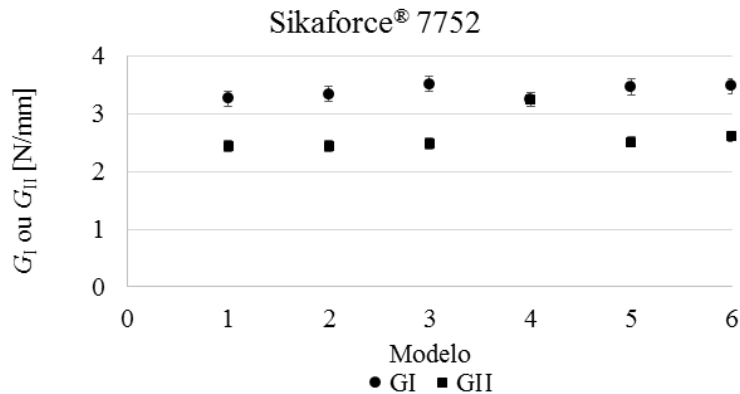


Figura 48 - Resumo dos resultados experimentais obtidos do adesivo Sikaforce® 7752 [63]

3.2.4.3.3 Determinação dos envelopes de fratura

Tendo como base o método CBBM, na Figura 49 está representado o envelope de fratura do adesivo Sikaforce® 7752. Neste envelope de fratura estão representados vários expoentes de modo a ser possível visualizar qual representa o comportamento do adesivo. Pela figura pode-se constatar que os resultados são ligeiramente diferentes e que possuem uma dispersão não desprezável. Também se pode observar que os resultados obtidos se aproximam da curva relativa ao expoente 2 que, apesar da dispersão verificada, permite concluir que este é o critério que melhor representa o comportamento do adesivo.

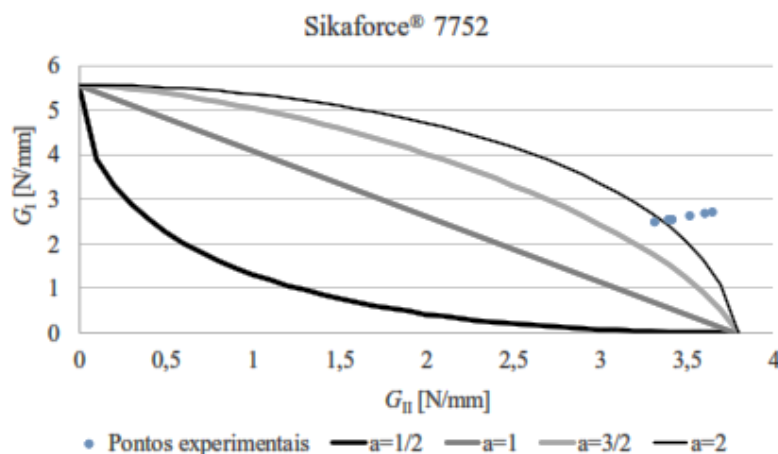


Figura 49 - Envelope de fratura experimental do adesivo Sikaforce® 7752 [63]

3.2.4.4 Análise dos resultados

Após a análise dos vários adesivos utilizados é possível observar que os vários modelos estudados produziram resultados bastante semelhantes para cada adesivo à exceção do modelo 4, que apresentou valores de G_{II} superiores aos outros métodos. Para G_I os resultados dos vários provetes apresentam uma variação reduzida. Para o adesivo Araldite® AV138 obteve-se uma variação aproximada de 5% relativamente ao valor médio calculado. O adesivo Araldite® 2015 apresentou uma variação superior à do Araldite® AV138, de 8%. Relativamente ao adesivo Sikaforce® 7752, este apresentou a menor variação, de 4%. Para G_{II} a variação entre os vários resultados foi semelhante à variação obtida para G_I .

Através da observação dos envelopes de fratura de cada adesivo é possível verificar que os provetes apresentaram comportamentos semelhantes. É também possível observar que os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 seguem uma lei de libertação de energia com expoente de 0,5, enquanto para o adesivo Sikaforce® 7752 um expoente de 2 se adequa melhor. Os expoentes e as respetivas curvas permitem efetuar previsões sobre como o adesivo se irá comportar sob cargas em modo misto. No caso do adesivo Sikaforce® 7752 (expoente 2) existe uma menor diminuição dos valores de G_I e de G_{II} em relação aos valores de modo puro do que no caso dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (expoente 0,5). Também é possível observar que, para adesivo Sikaforce® 7752, os valores de G_{II} obtidos são aproximados dos valores de referência para o modo II puro, o que permite constatar que este adesivo apresenta um excelente comportamento quando sujeito a esforços de corte. Relativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 é possível observar que os valores de G_I são mais aproximados dos valores em modo puro do que os de G_{II} .

Na Tabela 16 apresentam-se os valores médios obtidos nos ensaios experimentais para os três adesivos estudados. Pela análise dos resultados obtidos pode-se verificar que o adesivo SikaForce® 7752 é aquele que necessita de mais energia de deformação para ocorrer a propagação do dano. Pode-se observar que o adesivo Sikaforce® obteve valores de G_I e G_{II} mais de 50 vezes superiores aos registados para o adesivo Araldite® AV138 e mais de 7 vezes superiores aos obtidos para o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 16 - Resumo dos resultados obtidos para os 3 adesivos estudados [63]

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	Sikaforce® 7752
G_I	0,0582	0,415	3,372
G_{II}	0,0450	0,320	2,259

Através dos resultados obtidos é possível concluir que o adesivo SikaForce®7752 é o mais dúctil, sendo o Araldite® AV138 o mais frágil.

As propriedades dos adesivos influenciam a resistência da junta. No entanto, um adesivo mais forte não significa necessariamente que tenha uma resistência superior na junta. Um adesivo resistente mas frágil atinge localmente nos bordos da junta adesiva uma tensão elevada mas não permite a redistribuição do esforço para o interior desta, o que faz com que a tensão de corte média de rotura seja muito baixa. Este é o comportamento expectável do adesivo Araldite® AV138. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e de baixo módulo têm geralmente uma resistência baixa mas têm a capacidade de distribuir as tensões de forma mais uniforme ao longo da junta por deformação plástica (devido à baixa rigidez), o que torna as juntas mais resistentes do que com adesivos mais resistentes e frágeis [64]. Nesta categoria enquadra-se o adesivo Araldite® 2015 que apresenta uma ductilidade moderada para adesivos estruturais e uma resistência à tração e corte inferiores ao Araldite® AV138. A maior ductilidade de um adesivo dá a capacidade à junta de acomodar mais facilmente o movimento dos aderentes durante o carregamento, o que leva a que a tensão seja distribuída ao longo de uma área maior. O SikaForce® 7752, uma vez que combina elevada resistência com grande ductilidade, está em vantagem comparativamente aos anteriores no que concerne à aplicação em juntas adesivas, pois atinge tensões de corte elevadas na junta e apresenta uma capacidade superior de redistribuição de tensões na camada de adesivo após o seu limite elástico ser atingido. Por outro lado, a resistência à fadiga de juntas coladas é tipicamente menor para adesivos frágeis. Esta diferença é justificada pela distribuição de tensões mais uniformes e maior energia de amortecimento dos adesivos dúcteis. Os adesivos frágeis são muito sensíveis a defeitos, tais como espaços vazios e microfissuras [64]. Os adesivos dúcteis têm uma maior capacidade para suportar esforços de clivagem e de arrancamento, daí a preferência do seu uso para unir chapas finas.

3.3 Validação dos envelopes de fratura obtidos em juntas de sobreposição

3.3.1 Geometria das juntas

A geometria e as dimensões características das JSS e JSD estão representadas na Figura 50. Os parâmetros geométricos são:

- L_T - comprimento total dos provetes;
- t_p - espessura do substrato;
- t_A - espessura do adesivo;
- L_0 - comprimento de sobreposição.

Foi efetuado um estudo paramétrico do valor de L_0 , considerando os valores de 12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm.

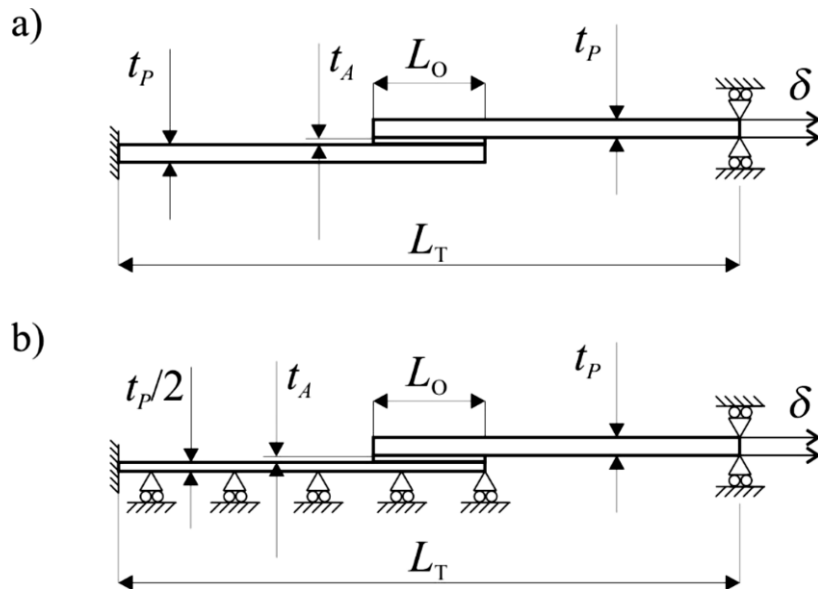


Figura 50 - Configuração da geometria dos provetes de JSS a) e JSD b) [65]

As dimensões referidas anteriormente são apresentadas Tabela 17.

Tabela 17 – Dimensões das JSS e JSD [65]

Parâmetro	Valor [mm]			
L_0	12,5	25,0	37,5	50,0
L_T	170,0	170,0	170,0	170,0
t_p	3,0	3,0	3,0	3,0
t_A	0,2	0,2	0,2	0,2

3.3.2 Processo de fabrico

O processo de fabrico das JSD foi idêntico ao seguido para as JSS. Foram fornecidos 60 substratos de forma a garantir 5 provetes para cada configuração de junta, já nas suas dimensões finais, $140 \times 25 \times 3 \text{ mm}^3$.

Primeiramente procedeu-se à preparação de superfície e limpeza dos substratos. Os substratos foram submetidos a um processo de lixagem (Figura 51 a) com o objetivo de remover algumas camadas de óxidos existentes e dar rugosidade à superfície de forma

a melhorar o processo de colagem e ancoragem do adesivo. A limpeza dos substratos foi feita com acetona (Figura 51 b). Na Figura 52 está presente um conjunto de substratos após o processo de lixagem e limpeza.



Figura 51 - Preparação de superfície por lixagem (a) e limpeza dos substratos (b) [65]



Figura 52 - Aspeto dos substratos após preparação superficial e limpeza [65]

De seguida, procedeu-se à preparação do *setup* necessário para se poder aplicar o adesivo nos substratos (Figura 53). Foi necessária a utilização de barras de apoio para fixar e alinhar os substratos, assim como colocar fio de pesca calibrado com diâmetro de 0,2 mm nas extremidades da zona de sobreposição de forma a garantir uma espessura de adesivo constante (Figura 54).

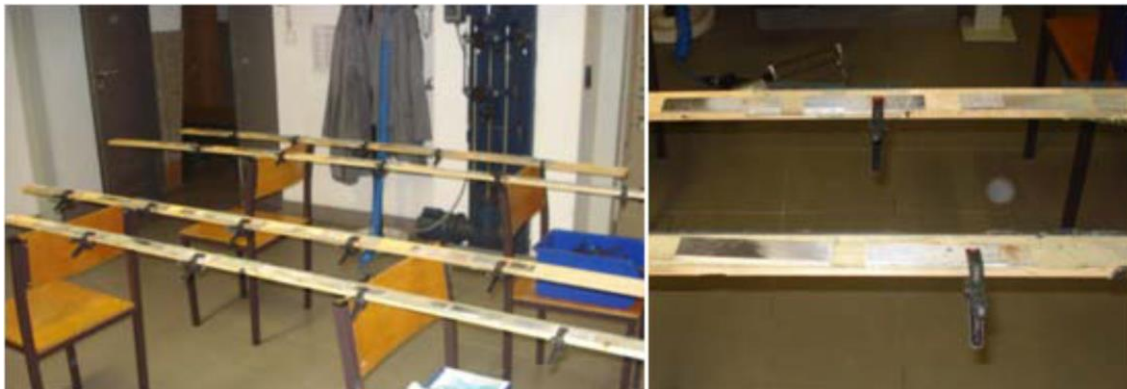


Figura 53 - Fixação e alinhamento dos substratos [65]



Figura 54 - Substratos com fio de pesca calibrado de 0,2 mm [65]

Deu-se início à colagem dos substratos. Após a aplicação do adesivo na face de colagem de um dos substratos procedeu-se ao correto posicionamento entre os substratos. Seguidamente foram colocados grampos na zona de sobreposição com o objetivo de, através da pressão exercida pelos grampos, ser garantido o valor de t_A desejado, sendo expulso o excesso de adesivo (Figura 55). O excesso de adesivo entre os substratos exteriores dos provetes foi removido com o auxílio de um x-ato após alguns minutos do processo de colagem. Finalizado este processo, procedeu-se à cura dos provetes à temperatura ambiente durante uma semana. Após a cura total dos provetes, seguiu-se a remoção do excesso de adesivo nas arestas exteriores com o auxílio de uma mó (Figura 56). Este procedimento torna-se necessário pois o excesso de adesivo influencia a resistência da junta relativamente à geometria teórica.



Figura 55 - Colocação de grampos [65]



Figura 56 – Remoção do excesso de adesivo [65]

3.3.3 Ensaio das juntas

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina de ensaios Shimadzu[®] (Figura 57), modelo AG-X 100, equipada com uma célula de carga de 100 kN e com uma distância entre maxilas de 170 mm (Figura 57), à temperatura ambiente. A velocidade de ensaio foi de 1 mm/min para todos os provetes.



Figura 57 – Máquina de ensaios Shimadzu e fixação do provete [65]

3.3.4 Resultados obtidos

3.3.4.1 Juntas de sobreposição simples

3.3.4.1.1 Curvas P - δ experimentais

Na Figura 58 estão representadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente para o adesivo Araldite® AV138 para os diferentes valores de L_0 .

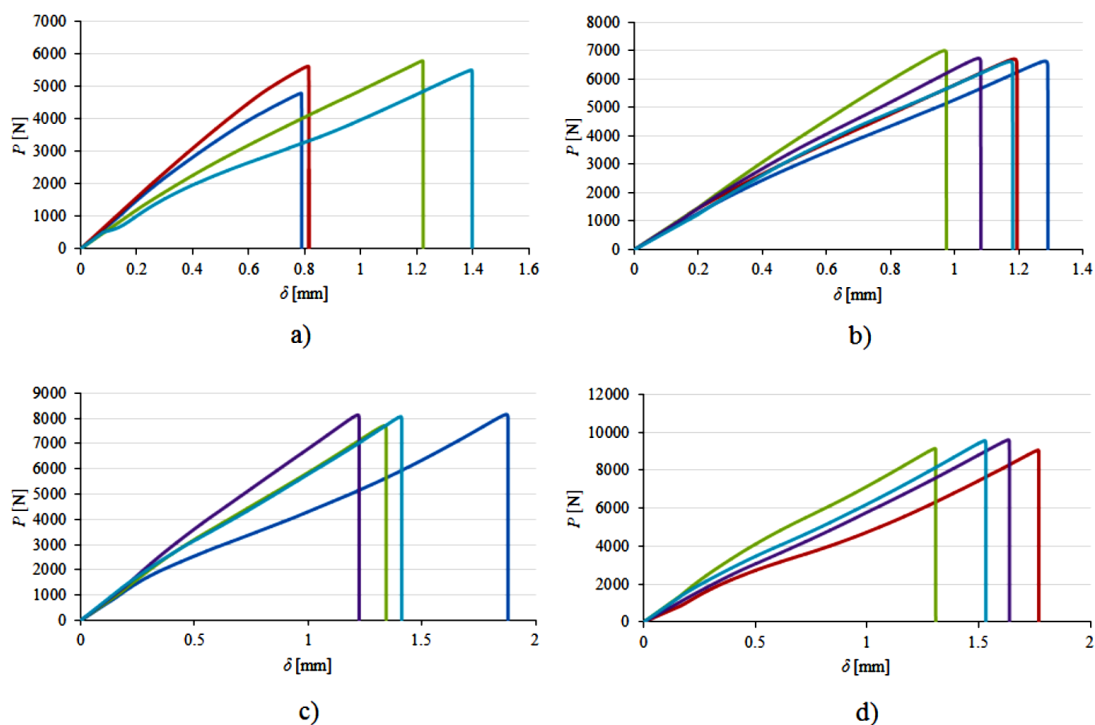


Figura 58 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSS com o adesivo Araldite® AV138, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Nas curvas P - δ obtidas é possível verificar uma repetibilidade de curvas razoável nos casos da Figura 75 b) e Figura 75 d). Na Figura 75 a) é possível verificar que dois dos provetes se diferenciam dos restantes pois apresentam um $\delta_{P_{\text{máx}}}$ bastante inferior aos restantes. Em relação às curvas obtidas para um $L_0 = 37,5$ mm (Figura 75 c), verifica-se que um dos provetes atingiu um valor de $\delta_{P_{\text{máx}}}$ bastante superior aos restantes. De uma forma geral, verifica-se um comportamento maioritariamente linear até à rotura de todos os provetes apresentados apesar de se verificarem algumas oscilações na rigidez elástica dos provetes devido à flexibilidade, folgas da máquina e ao escorregamento entre amarras e provetes.

Na Figura 59 estão representadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente para o adesivo Araldite® 2015 para os diferentes valores de L_0 .

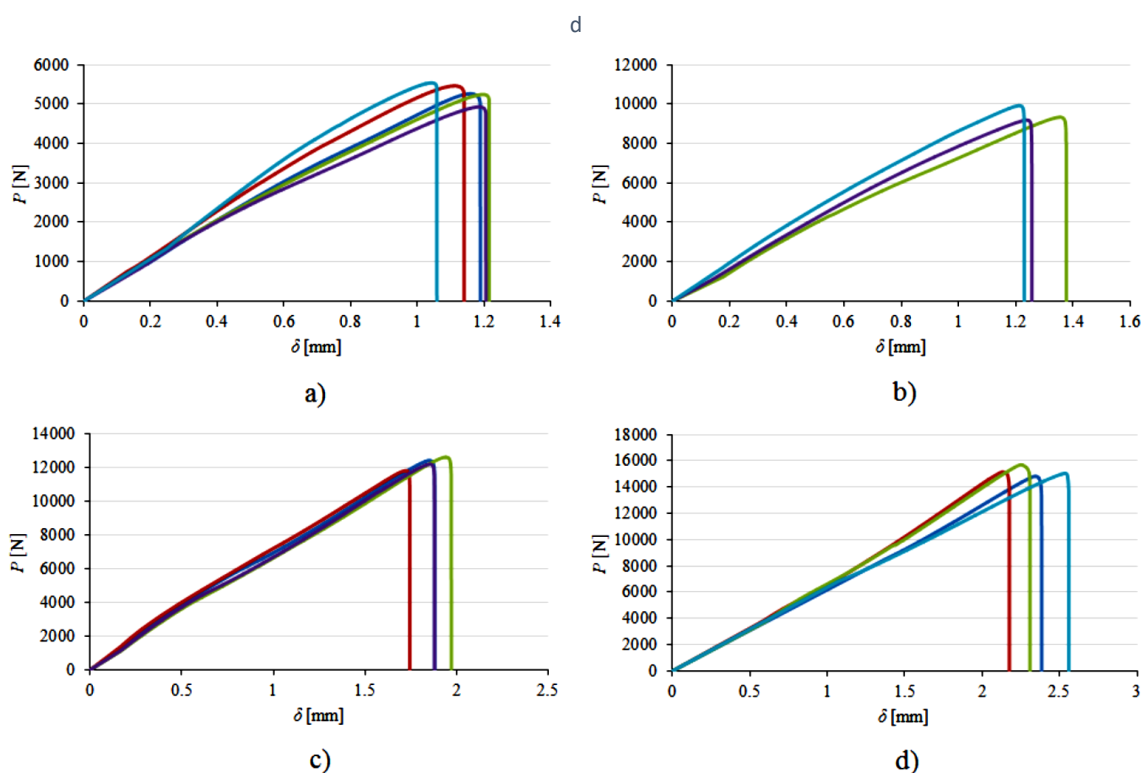


Figura 59 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSS com o adesivo Araldite® 2015, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Através da observação da Figura 59 é possível constatar que para o Araldite® 2015 se obteve uma melhor repetibilidade de curvas em comparação com o adesivo Araldite® AV138, no que diz respeito à rigidez dos provetes e aos valores de $\delta_{P_{\text{máx}}}$ e $P_{\text{máx}}$. O comportamento das juntas é na globalidade linear até à rotura, apenas com alguns desvios devido ao escorregamento entre amarras e provetes.

Na Figura 60 estão representadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente para o adesivo Sikaforce® 7752 para os diferentes valores de L_0 .

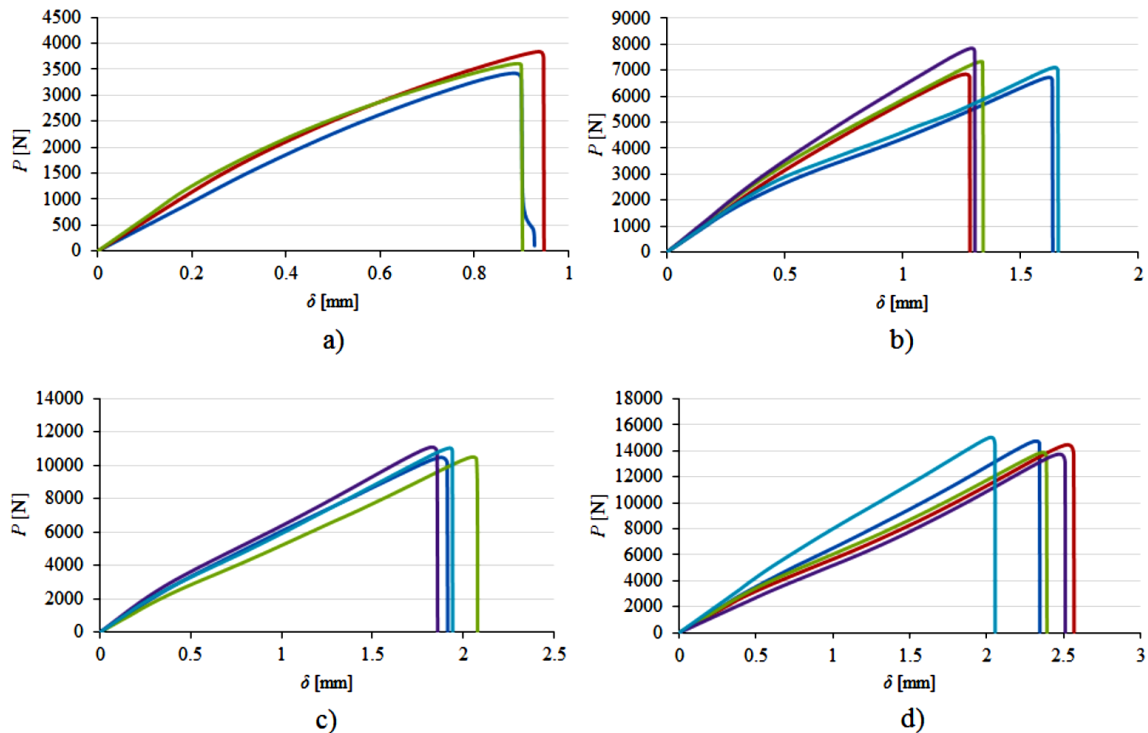


Figura 60 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSS com o adesivo Sikaforce® 7752, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Na Figura 60 é possível verificar uma repetibilidade de curvas de nível intermédio entre todos os provetes para os vários valores de L_0 , superior à obtida para o adesivo Araldite® AV138 mas inferior à obtida para o adesivo Araldite® 2015. O Adesivo Sikaforce® 7752 é caracterizado por uma menor resistência e uma maior ductilidade quando comparado com os outros adesivos utilizados. Devido a esta particularidade do adesivo Sikaforce® 7752, é possível verificar a ocorrência de transição elasto-plástica do adesivo no domínio de forças atingidas nos ensaios. Após a plastificação do adesivo, as juntas comportam-se de forma praticamente linear até à rotura, salvo algumas exceções devido a escorregamentos entre as amarras e os provetes, à flexibilidade do equipamento e a folgas existentes no mesmo. É possível constatar que, à medida que se aumenta o valor de L_0 , aumenta também os valores de $\delta_{P_{máx}}$ e $P_{máx}$.

Alguns provetes não estão representados nas Figura 58, Figura 59 e Figura 60 por terem sido considerados inválidos após apresentarem comportamentos díspares dos restantes provetes.

3.3.4.1.2 Modos de rotura

A Figura 61 apresenta alguns exemplos de modos de rotura obtidos para as JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138 para os diversos valores de L_0 .

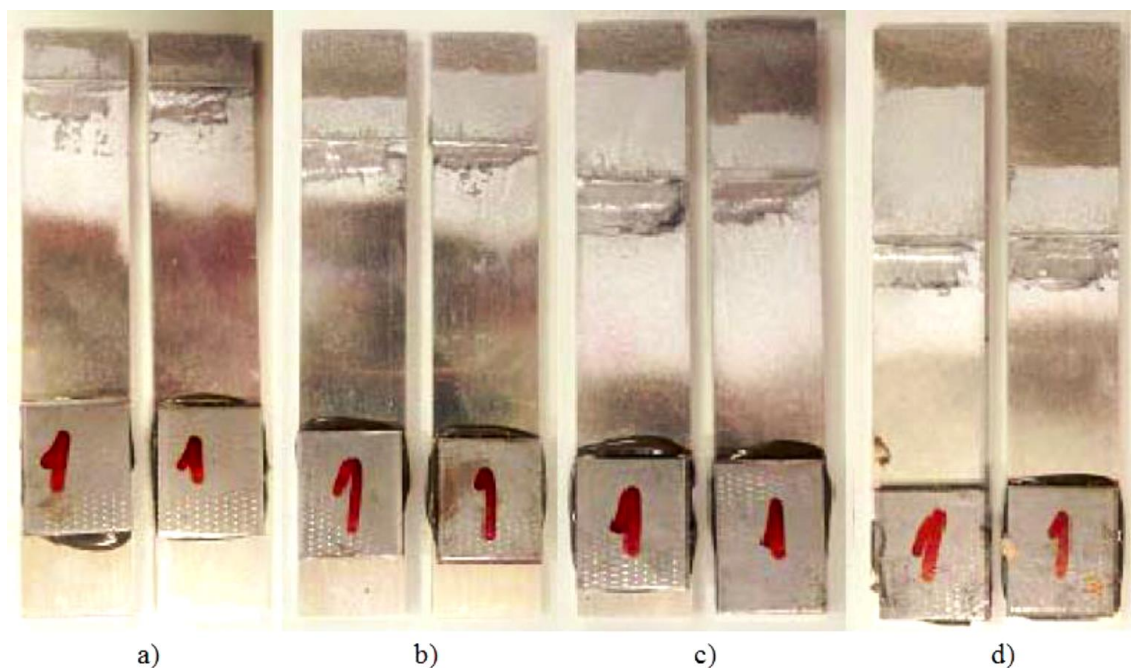


Figura 61 – Superfícies de rotura de JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Através da observação da Figura 61 (representativa dos 20 provetes ensaiados, 1 por cada valor de L_0) constata-se que ocorreu rotura coesiva em todos eles, com remanescência de adesivo em ambos os substratos. No entanto, uma vez que a rotura ocorreu muito próxima de uma das interfaces adesivo/substrato, a rotura coesiva não se constata com muita facilidade. A Figura 62 representa alguns exemplos para cada valor de L_0 dos modos de rotura das JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015.

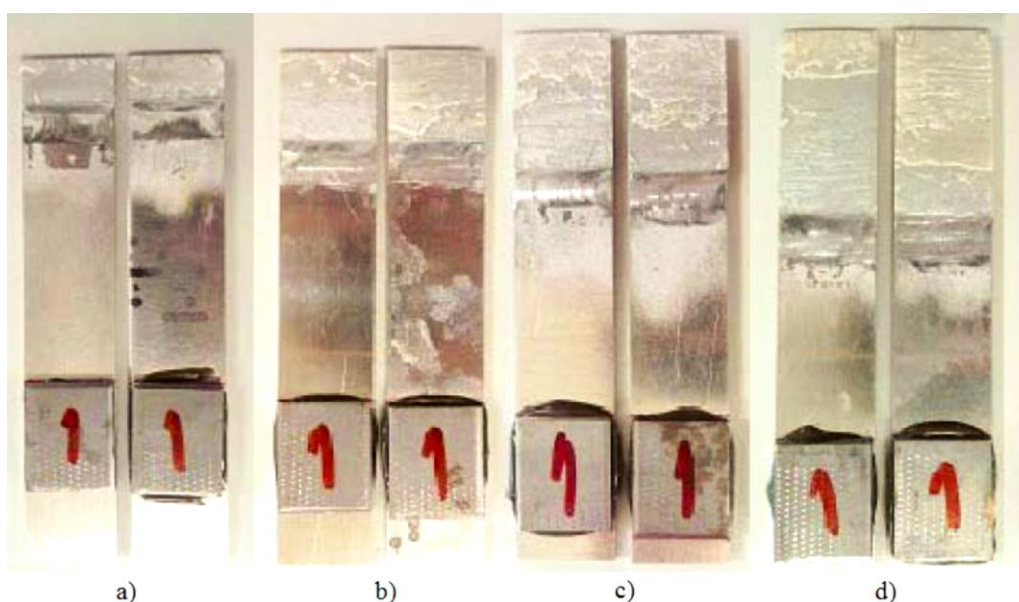


Figura 62 – Superfícies de rotura de JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Na Figura 62 verifica-se, tal como aconteceu para o adesivo Araldite® AV138, a ocorrência de roturas coesivas em todos os provetes. Para os provetes representativos dos ensaios de JSS com valores de L_0 de 12,5 mm, 25 mm e 37,5 mm, denota-se uma distribuição aproximadamente equitativa de adesivo em cada uma das superfícies dos substratos. No que diz respeito ao provete representativo para $L_0=50$ mm, a distribuição do adesivo pelas superfícies dos substratos não foi uniforme.

A Figura 63 representa os modos de rotura obtidos para a totalidade das JSS ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752, para cada valor de L_0 .

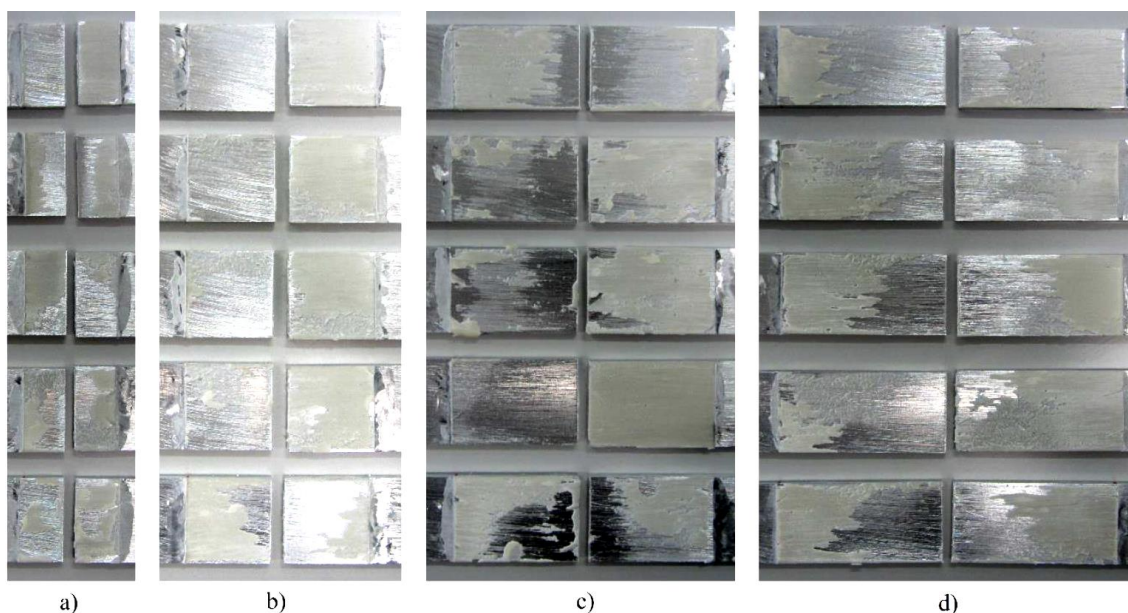


Figura 63 – Superfícies de rotura de JSS ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Através da análise da Figura 63, observa-se que os provetes sofreram rotura coesiva em todos os ensaios realizados, apesar de em alguns locais dos substratos não ser perfeitamente perceptível a ocorrência de rotura coesiva devido à falta de adesivo num dos substratos, pois a distribuição de adesivo em cada um dos provetes apresentados nem sempre foi equitativa. No entanto, a remanescência de uma película de adesivo em cada uma das superfícies dos substratos corrobora o facto de a rotura ser coesiva.

3.3.4.1.3 Resistência das JSS

A Tabela 18 representa a influência de L_0 no aumento percentual da carga máxima média ($P_{\text{máx méd}}$) para as JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138. Como é possível observar na Tabela 18, o valor de $P_{\text{máx}}$ aumenta à medida que o valor de L_0 também aumenta. O aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%] quantifica o aumento de resistência entre valores de L_0 consecutivos. Deste modo, verifica-se que o maior aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre entre as juntas com $L_0=12,5$ mm e as juntas com $L_0=25$ mm, sendo este de 24,3%. Entre as juntas com menor ($L_0=12,5$ mm) e maior valor ($L_0=50$ mm) de L_0 ocorre um

aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ de 72,3%. O maior desvio padrão entre $P_{\text{máx méd}}$ ocorre nas juntas com menor valor de L_0 (12,5 mm), que no caso é de 439,4 N. De referir ainda que o aumento de $P_{\text{máx méd}}$ entre valores de L_0 consecutivos é aproximadamente constante (≈ 1300 N).

Tabela 18 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSS com o adesivo Araldite® AV138 [66]

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}}$ [N]	5421,7	6738,2	8016,3	9342,2
Desvio padrão [N]	439,4	155,4	206,3	278,5
Aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%]	-	24,3	19,0	16,5

Na Tabela 19 observa-se a variação de $P_{\text{máx méd}}$ em função do valor de L_0 para as JSS ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015. Como é possível observar na Tabela 19, o valor de $P_{\text{máx}}$ aumenta à medida que o valor de L_0 também aumenta. Verifica-se que o maior aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre entre as juntas com $L_0=12,5$ mm e as juntas com $L_0=25$ mm, sendo este de 79,3%. Entre as juntas com menor ($L_0=12,5$ mm) e maior valor ($L_0=50$ mm) de L_0 ocorre um aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ de 187,1%. O maior desvio padrão entre $P_{\text{máx méd}}$ ocorre nas juntas com valor de $L_0=25$ mm, que no caso é de 386,6 N.

Tabela 19 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSS com o adesivo Araldite® 2015 [66]

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}}$ [N]	5287,8	9480,7	12235,2	15182,2
Desvio padrão [N]	237,2	386,6	343,9	370,4
Aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%]	-	79,3	29,1	24,1

A Tabela 20 representa a influência de L_0 no aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para o adesivo SikaForce® 7752. O maior aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ entre duas séries de juntas consecutivas ocorre entre a série com valor de $L_0=12,5$ mm e a série com $L_0=25$ mm, correspondendo a um aumento de 97,0%. Após este aumento, ocorre um decréscimo do valor de $P_{\text{máx méd}}$ até ser atingido um valor de 50% entre $L_0=37,5$ mm e

$L_0=50$ mm. O aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 com este adesivo é de 296,7%, o maior dos três adesivos testados, e que corresponde a um aumento quase linear entre $P_{\text{máx}}$ e L_0 (variação de ≈ 3600 N entre valores de L_0 consecutivos). A dispersão dos valores de $P_{\text{máx}}$ atingidos neste adesivo é mais acentuada nas juntas com $L_0=25$ mm, 37,5 mm e 50 mm, sendo também em média ligeiramente superior aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

Tabela 20 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSS com o adesivo SikaForce® 7752 [66]

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}}$ [N]	3625,6	7175,5	10774,1	14383,7
Desvio padrão [N]	206,8	445,5	334,1	553,6
Aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%]	-	97,0	50,2	33,5

Na Figura 64 está representado o resumo dos aumentos de $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 para os três adesivos ensaiados com os desvios padrão associados.

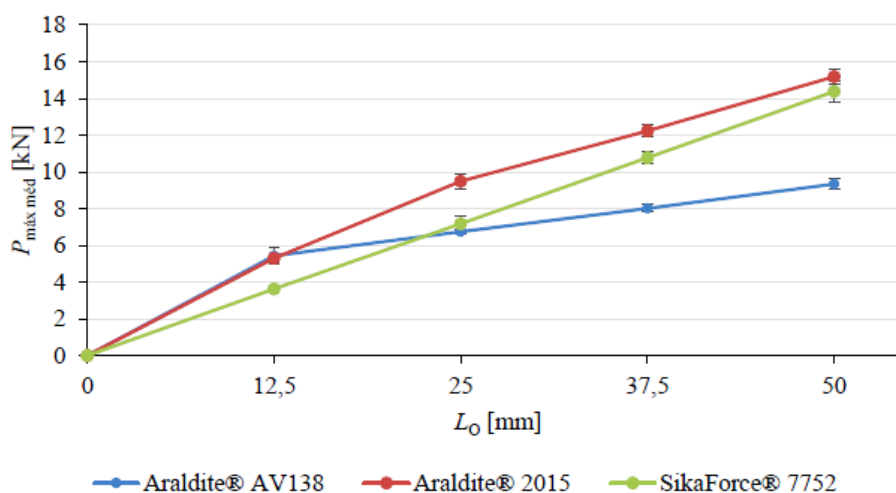


Figura 64 – $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 para cada adesivo ensaiado em JSS [66]

Na Figura 64 denota-se que o aumento de $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 depende claramente do adesivo utilizado na junta. Deste modo, o adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 são os que oferecem maior resistência para juntas com $L_0=12,5$ mm, seguidos do Sikaforce® 7752, que apresenta um decréscimo significativo em termos de resistência face aos dois referidos adesivos. Neste contexto, o adesivo Araldite® AV138 demarca-se ligeiramente do Araldite® 2015 com uma diferença percentual de 2,5% e do Sikaforce®

7752 com um desvio percentual de 49,5%. Para o valor de L_0 subsequente, o Araldite® AV138 é ultrapassado em termos de resistência pelo Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015, estes últimos com um acréscimo percentual de 6,5% e de 40,7%, respetivamente, relativamente ao Araldite® AV138. Para o valor de L_0 de 37,5 mm, o Araldite® AV138 é o menos resistente ($P_{\text{máx méd}} \approx 8\text{kN}$), sendo claramente ultrapassado pelo Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 com respetivos desvios percentuais de 34,4% e de 52,6%. Esta diferença é ainda mais notória para $L_0=50$ mm, já que os adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 surgem com valores de $P_{\text{máx méd}}$ claramente superiores ao Araldite® AV138, situados na ordem dos 14 kN e 15 kN, respetivamente, e que correspondem a desvios percentuais de 54,0% e de 62,5% relativamente ao Araldite® AV138.

Constata-se que o adesivo Sikaforce® 7752 é o que revela maior proporcionalidade no aumento de $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 , seguido do Araldite® 2015 e finalmente do Araldite® AV138, que se revela o menos proporcional dos 3 adesivos devido à sua fragilidade. Verifica-se também que o adesivo Araldite® AV138 é o adesivo que apresenta o menor aumento de $P_{\text{máx méd}}$ entre valores limite de L_0 . Tal acontece devido à reduzida capacidade de plastificação do adesivo decorrente da sua fragilidade, o que implica uma rotura da junta assim que são atingidas as tensões limite nas extremidades de L_0 . É também visível através da Tabela 19 e Figura 64 a maior dispersão de valores de $P_{\text{máx méd}}$ entre provetes ensaiados para o adesivo Sikaforce® 7752.

3.3.4.2 Juntas de sobreposição dupla

3.3.4.2.1 Curvas P - δ experimentais

Na Figura 65 estão representadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente nos ensaios JSD com o adesivo Araldite® AV138 para os vários valores de L_0 . É possível observar uma semelhança razoável entre as curvas P - δ no que diz respeito à rigidez da junta, ao $P_{\text{máx}}$ e ao $\delta_{\text{máx}}$. Relativamente às Figura 65 b) c) d), foram desconsiderados alguns provetes por apresentarem resultados significativamente diferentes do comportamento médio da respetiva configuração de junta. Os provetes apresentam um comportamento linear até à rotura, apesar da ocorrência de algumas oscilações de rigidez entre provetes devido a questões de escorregamento, folgas e flexibilidade do equipamento.

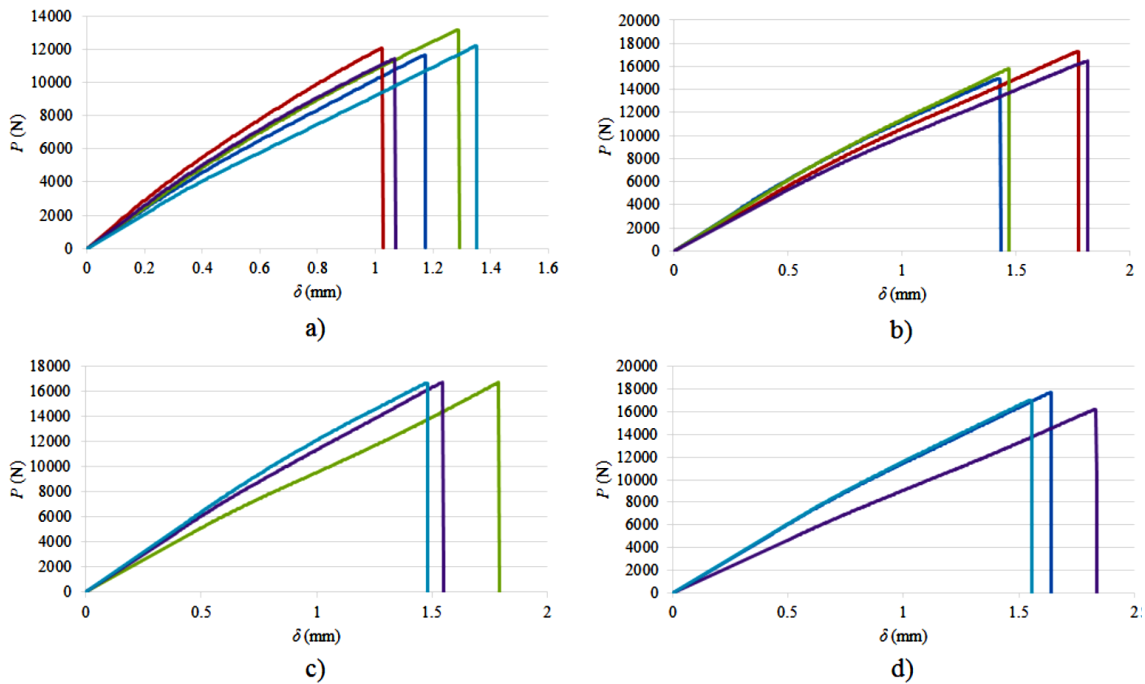


Figura 65 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSD com o adesivo Araldite® AV138, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Na Figura 66 estão representadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente para as JSD com o adesivo Araldite® 2015 para os respectivos valores de L_0 .

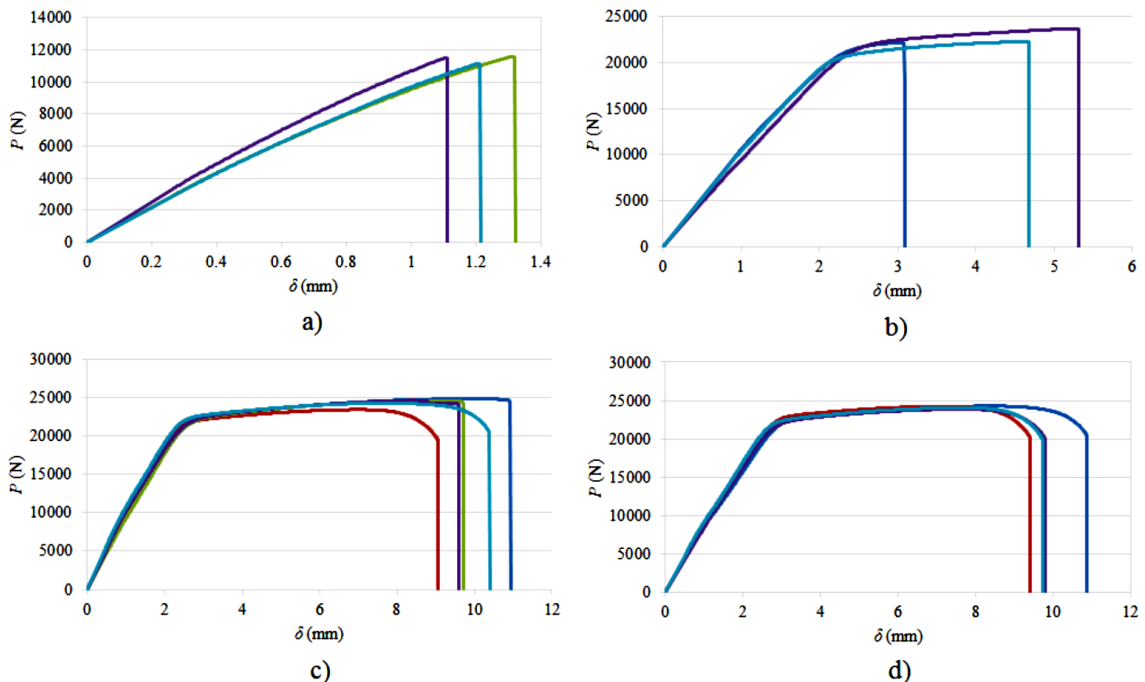


Figura 66 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente do ensaio de JSD com o adesivo Araldite® 2015, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Através da observação das curvas $P-\delta$, é possível verificar uma boa repetibilidade de curvas em comparação com as curvas $P-\delta$ obtidas para o adesivo Araldite® AV138, no que diz respeito à rigidez, ao $P_{\text{máx}}$ e ao $\delta_{\text{máx}}$. No entanto, as juntas representadas pela Figura 66 b) são uma exceção pois os valores obtidos para $\delta_{\text{máx}}$ apresentaram uma dispersão maior. Na Figura 66 b) c) d) observa-se uma plastificação acentuada dos provetes que resulta da combinação da cedência do adesivo com a dos substratos. Considerando a secção resistente, a tensão de cedência e a solitação a que os substratos incorrem fundamentalmente durante o ensaio, que é de tração, a plastificação dos mesmos tem início na ordem dos 20 kN. É possível verificar a maior ductilidade do adesivo Araldite® 2015 em comparação com o adesivo Araldite® AV138 através da superioridade dos valores de $\delta_{\text{máx}}$ obtidos nas curvas $P-\delta$ adesivo Araldite® 2015 em relação ao Araldite® AV138. Verifica-se em todos os gráficos da Figura 66 um comportamento linear das juntas até ao início da plastificação dos substratos, excetuando o caso da Figura 66 a) onde só existe plastificação do adesivo.

A Figura 67 evidencia as curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente dos ensaios de JSD com o adesivo SikaForce® 7752 para os diferentes valores de L_0 .

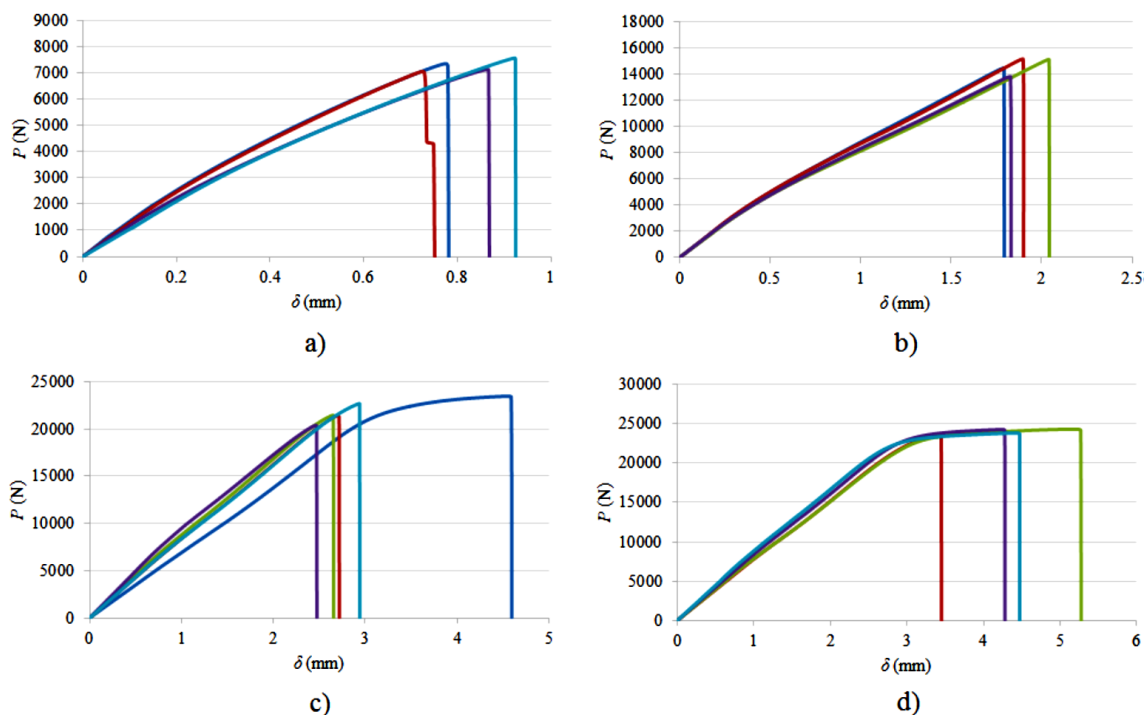


Figura 67 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente do ensaio de JSD com o adesivo Sikaforce® 7752, para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Na Figura 67 observa-se uma boa repetibilidade de curvas, semelhante à obtida com o adesivo Araldite® 2015 e superior à do adesivo Araldite® AV138, no que respeita à rigidez elástica e $P_{\text{máx}}$. O mesmo não se aplica para $\delta_{\text{máx}}$, pois neste caso é o adesivo Araldite® AV138 que apresenta a melhor repetibilidade de valores. Tal como sucede com o

adesivo Araldite® 2015, com o Sikaforce® 7752 denota-se também uma plastificação dos substratos, mas neste caso apenas nas juntas com $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm. Tal apenas se observa para estes dois valores de L_0 porque o adesivo Sikaforce® 7752, comparativamente ao Araldite® 2015, apresenta propriedades de resistência mecânica inferiores, o que resulta em valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais reduzidos. A grandeza dos valores de $\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$ com este adesivo é superior à obtida com o adesivo Araldite® AV138, mas claramente inferior à do adesivo Araldite® 2015. Isto sucede-se porque apesar do Sikaforce® 7752 ser o mais flexível dos 3 adesivos, este apresenta propriedades de resistência mecânicas inferiores, o que se traduz também em valores de deslocamento de rotura intermédios. Verificam-se algumas oscilações na rigidez elástica entre as juntas ensaiadas, devido aos típicos escorregamentos entre amarras e provetes, folgas e flexibilidade do equipamento.

3.3.4.2.2 Modos de rotura

Na Figura 68 estão representados os modos de rotura obtidos para as JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138 para os 4 valores de L_0 .

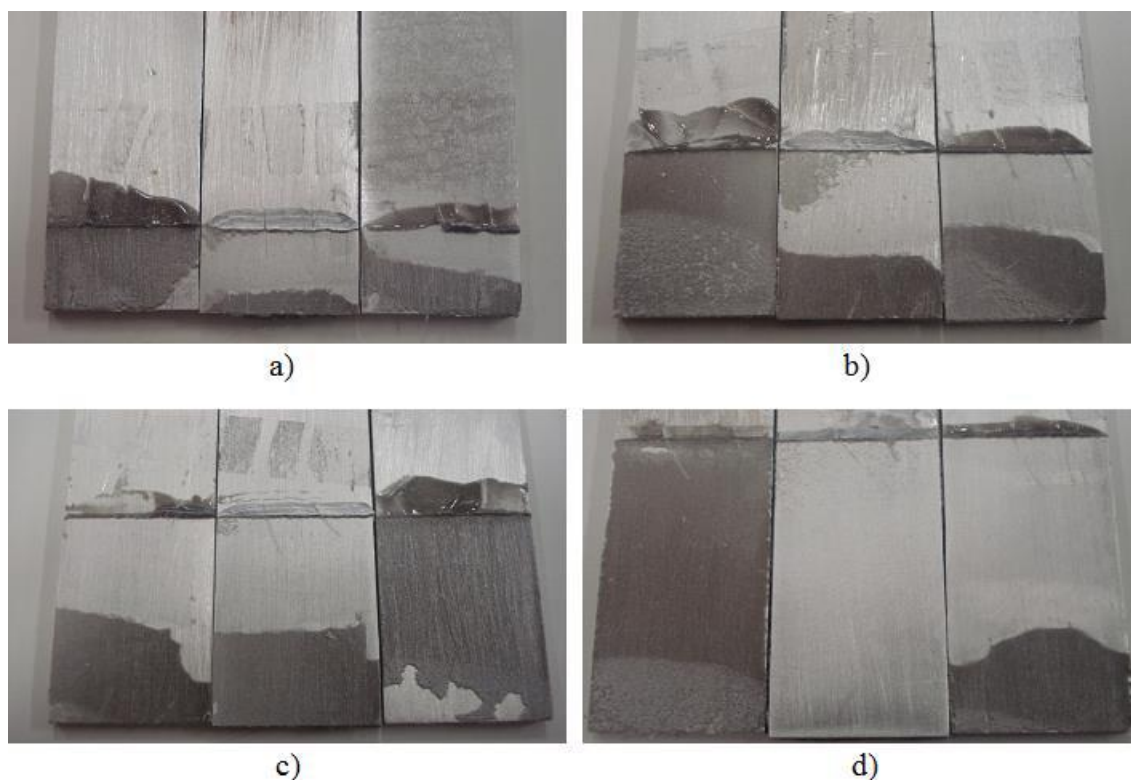


Figura 68 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Através da análise da Figura 68 verifica-se que ocorreu rotura coesiva em todos os provetes. No entanto, a distribuição de adesivo nas superfícies dos substratos não é equitativa, sendo essa assimetria mais notória na junta com $L_0=50$ mm, pois neste caso

a rotura ocorreu na proximidade da interface adesivo/substrato, deixando uma fina película de adesivo em algumas das superfícies das juntas e uma camada mais espessa nas restantes.

Na Figura 69 estão representados os modos de rotura obtidos para as JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015 para os 4 valores de L_0 .

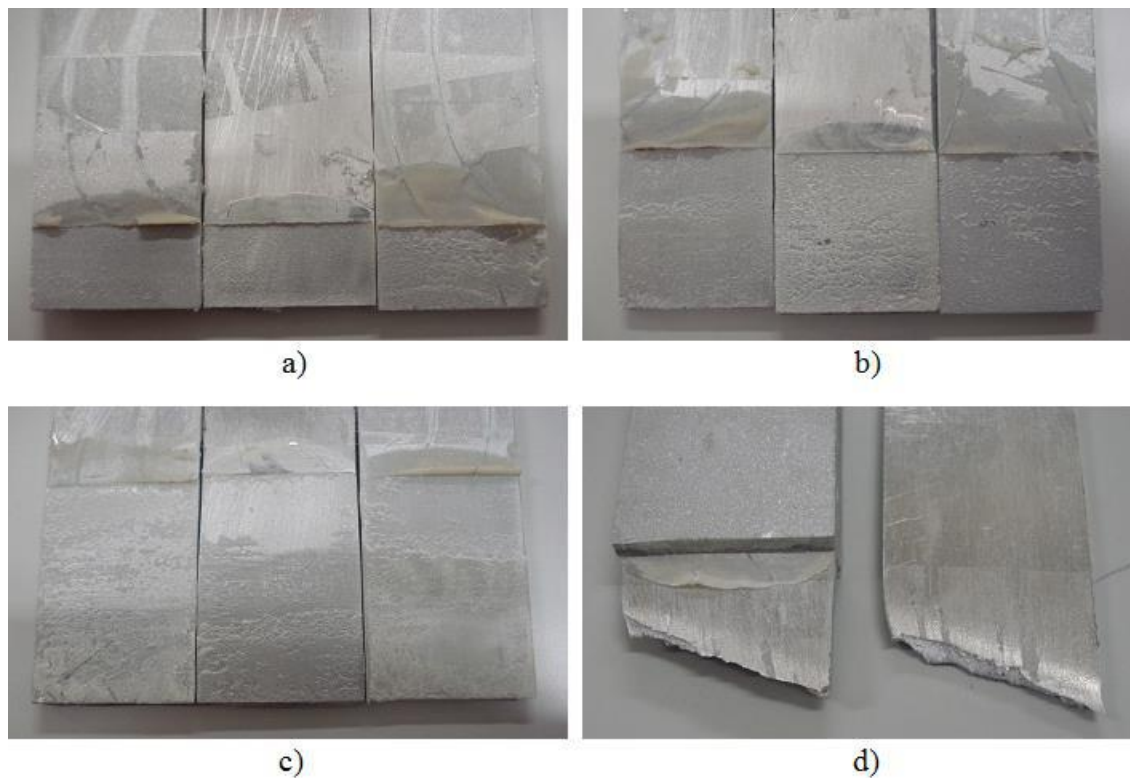


Figura 69 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo Araldite® 2015 para valores de L_0 de: a) 12,5 mm, b) 25 mm, c) 37,5 mm e d) 50 mm [66]

Através da análise da Figura 69 verifica-se que ocorreu rotura coesiva sem plastificação dos substratos para os provetes com $L_0=12,5$ mm. No caso das juntas com $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm, registou-se rotura coesiva do adesivo mas com plastificação extensa dos substratos. Por fim, nas juntas com $L_0=50$ mm, verificou-se rotura dos substratos (Figura 69 d), pois a resistência do adesivo foi superior à resistência dos substratos.

As seguintes figuras representam as superfícies de rotura dos provetes JSD ensaiados com o adesivo SikaForce® 7752 para os diversos valores de L_0 .

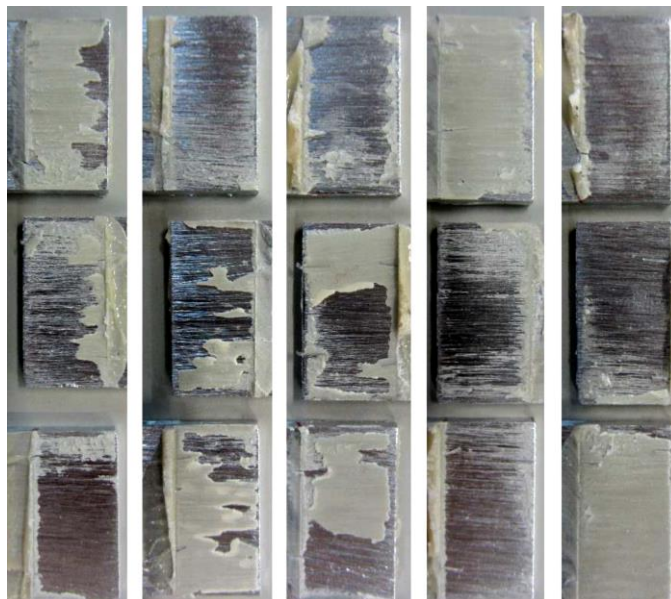


Figura 70 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=12,5$ mm [66]

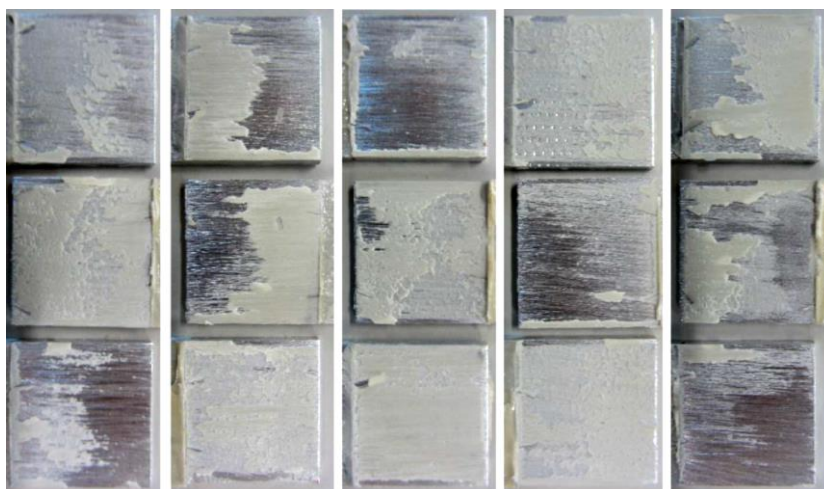


Figura 71 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=25$ mm [66]

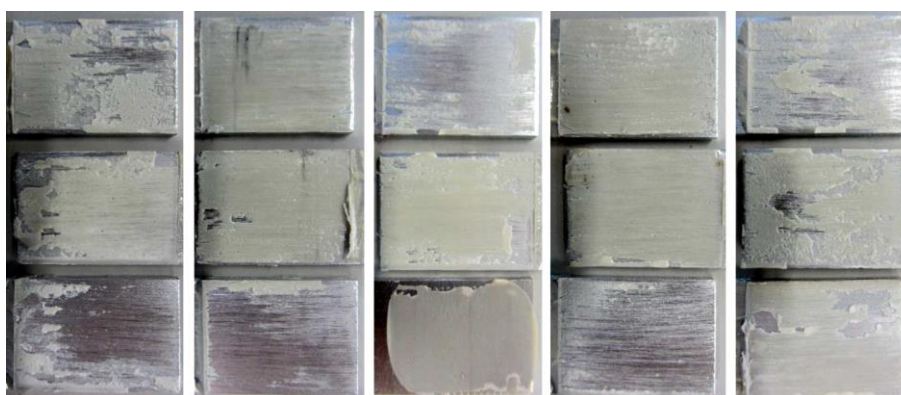


Figura 72 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=37,5$ mm [66]



Figura 73 – Superfícies de rotura de JSD ensaiadas com o adesivo SikaForce® 7752 para valores de $L_0=50$ mm [66]

Através de uma análise da Figura 70 à Figura 73 é possível verificar que, à semelhança do que aconteceu com as JSD ensaiadas com os dois adesivos anteriores, todos os provetes sofreram rotura coesiva. Denota-se uma remanescência de adesivo aproximadamente equitativa entre as superfícies dos substratos de cada provete, à semelhança do que se verificou com as JSD testadas com o adesivo Araldite® 2015 para os valores de $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm. No entanto, registaram-se em alguns provetes, casos pontuais, em que uma das superfícies dos substratos apresenta apenas uma fina película de adesivo devido ao facto de a rotura ocorrer na proximidade da interface adesivo/substrato.

3.3.4.2.3 Resistência das JSD

A Tabela 21 representa a evolução de $P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$ das JSD com o adesivo Araldite® AV138 em função do valor de L_0 .

Tabela 21 – Valores de $P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$ para cada valor de L_0 de JSD com o adesivo Araldite® AV138 [66]

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$ [N]	12141,4	16116,5	16671,2	16980,8
Desvio padrão [N]	664,1	984,9	23,1	724,8
Aumento de $P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$ [%]	-	32,7	3,4	1,9

Verifica-se que o maior aumento percentual de $P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$ entre 2 juntas consecutivas ocorre para as juntas com $L_0=12,5$ mm e com $L_0=25$ mm, com um valor de 32,7%. De seguida, entre as juntas com $L_0=25$ mm e com $L_0=37,5$ mm ocorre um aumento de 3,4%, e um decréscimo deste para 1,9% entre as últimas 2 juntas com maiores valores

de L_0 . A maior dispersão de valores de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre nas juntas ensaiadas com $L_0=25$ mm, com um valor de 984,9 N. O aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ entre as juntas com maior e menor valor de L_0 é de 39,9%. Denota-se que $P_{\text{máx méd}}$ nunca evolui de forma linear com o incremento do valor de L_0 .

A Tabela 22 representa a evolução de $P_{\text{máx méd}}$ das JSD com o adesivo Araldite® 2015 em função do valor de L_0 . Denota-se um aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ entre as juntas consecutivas com $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm de 99,3%. De seguida, entre as juntas com $L_0=25$ mm e com $L_0=37,5$ mm ocorre um decréscimo até ao valor de 7,1%, passando a negativo, -1,0%, entre as últimas 2 juntas com maiores valores de L_0 . A maior dispersão de valores de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre nas juntas ensaiadas com $L_0=25$ mm, com um valor de 836,5 N. Neste caso em particular, o incremento de valores de L_0 não se traduziu sempre num aumento de valores de $P_{\text{máx méd}}$, verificando-se um decréscimo percentual de $P_{\text{máx méd}}$ de -1,0% entre as juntas com $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm. Isto deve-se apenas à variação estatística na rotura por tração dos substratos entre estas 2 configurações de junta. Com este adesivo verifica-se um aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ de 111,3% entre os valores limite de L_0 . Neste caso a rotura dos provetes rege-se pela plastificação generalizada ou rotura dos substratos, com a exceção da série de provetes com $L_0=12,5$ mm, onde a rotura é coesiva no adesivo.

Tabela 22 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSD com o adesivo Araldite® 2015 [66]

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}}$ [N]	11405,4	22732,6	24349,2	24104,4
Desvio padrão [N]	234,5	836,5	557,5	188,6
Aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%]	-	99,3	7,1	-1,0

A Tabela 23 evidencia a evolução de $P_{\text{máx méd}}$ das JSD em função do valor de L_0 para o adesivo Sikaforce® 7752. Observa-se um aumento percentual significativo de $P_{\text{máx méd}}$ de 101,0% entre as juntas com $L_0=12,5$ mm e com $L_0=25$ mm, o de maior intensidade, seguido por um aumento menor de 49,6% entre as juntas com valores de $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm, culminando no menor aumento de 9,6% entre as juntas com $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm. Verifica-se um aumento percentual total de $P_{\text{máx méd}}$ entre $L_0=50$ mm e $L_0=12,5$ mm de 229,5%, o maior dos três adesivos ensaiados, à semelhança do que também aconteceu com o mesmo adesivo nas JSS. Denota-se também neste adesivo que o valor de L_0 tem maior influência no aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ do que com os restantes adesivos. Neste caso, para o conjunto de JSD ensaiadas com valores de

$L_0=50$ mm, a rotura dos provetes rege-se pela cedência generalizada dos substratos, que induziu a rotura coesiva do adesivo. Este modo de rotura contrasta com a rotura observada para as outras configurações de junta, que sofreram rotura tipicamente sem plastificação generalizada dos substratos.

Tabela 23 – Valores de $P_{\text{máx méd}}$, desvio padrão e aumento percentual de $P_{\text{máx méd}}$ para cada valor de L_0 de JSD com o adesivo Sikaforce® 7752 [66]

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx méd}}$ [N]	7276,4	14622,8	21872,6	23973,4
Desvio padrão [N]	230,2	635,5	1210,1	387,8
Aumento de $P_{\text{máx méd}}$ [%]	-	101,0	49,6	9,6

A Figura 74 resume o aumento de $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 para os três adesivos ensaiados com os desvios padrão associados.

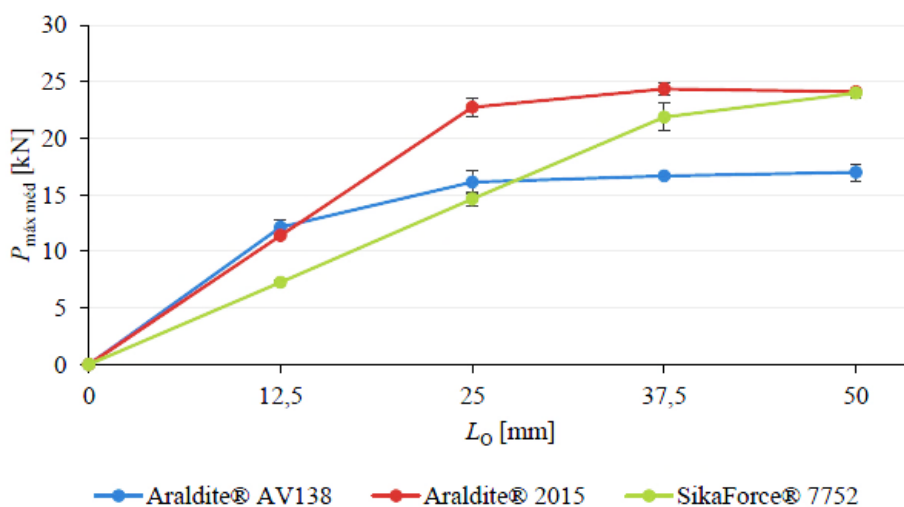


Figura 74 – $P_{\text{máx méd}}$ em função de L_0 para cada adesivo ensaiado em JSD [66]

Para $L_0=12,5$ mm, as JSD com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 revelam-se as mais resistentes, ambas com cargas de rotura na ordem dos 12 kN, ao passo que a junta com o SikaForce® 7752 é a que apresenta a menor resistência, na ordem dos 7,5 kN. Este último adesivo demarca-se negativamente dos primeiros dois adesivos com uma variação percentual de -66,9% e de -56,7%, respetivamente. Para o valor subsequente de L_0 (25 mm), a junta com o adesivo Araldite® 2015 destaca-se das restantes, com uma resistência de ≈ 22 kN, enquanto as juntas ensaiadas com o Araldite® AV138 e SikaForce® 7752 atingem valores de resistência próximos, entre os 14,5 kN e

16,5 kN, pela mesma ordem. Deste modo o adesivo Araldite® 2015 superioriza-se aos restantes adesivos com uma diferença percentual de 41,1% e de 55,5%, respetivamente. Para o valor L_0 de 25 mm e subsequentes denota-se que a evolução de $P_{\text{máx méd}}$ das juntas com o adesivo Araldite® AV138 é praticamente nula, permanecendo na casa dos 16 kN. No caso de $L_0=37,5$ mm ocorre uma aproximação de resistência entre o adesivo SikaForce® 7752 e Araldite® 2015, que registam valores de $P_{\text{máx méd}}=22$ kN e $P_{\text{máx méd}}=24$ kN, respetivamente, enquanto o Araldite® AV138 fica aquém dos restantes adesivos, com $P_{\text{máx méd}} \approx 16$ kN. Assim, constata-se uma diferença percentual deste último adesivo relativamente ao SikaForce® 7752 e Araldite® 2015 de 31,2% e de 46,1%, respetivamente. Para o valor maior de L_0 considerado (50 mm), os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 equiparam-se em termos de resistência, ambos situados na ordem dos 24 kN, enquanto o Araldite® AV138 permanece praticamente sem alterações. Desta forma, verifica-se uma diferença percentual do Araldite® 2015 relativamente aos restantes de 0,5% (SikaForce® 7752) e de 42,0% (Araldite® AV138). De salientar que a resistência das JSD testadas com o adesivo Araldite® 2015 ($L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm, $L_0=50$ mm) e SikaForce® 7752 ($L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm) é limitada pela resistência do material dos substratos.

No que respeita à proporcionalidade das curvas representadas na Figura 74, nenhum dos adesivos apresenta uma proporcionalidade total da resistência em função dos valores de L_0 , muito em virtude da plastificação dos substratos. O adesivo Araldite® AV138 não apresenta proporcionalidade de todo. O Araldite® 2015 apresenta proporcionalidade até $L_0=25$ mm, enquanto o SikaForce® 7752 regista proporcionalidade de valores até $L_0=37,5$ mm. À semelhança das JSS, a maior variação de $P_{\text{máx méd}}$ entre valores limite de L_0 ocorre também nas juntas ensaiadas com o SikaForce® 7752, dada a sua elevada ductilidade, ao passo que a menor variação de $P_{\text{máx méd}}$ é novamente atribuída ao adesivo Araldite® AV138. Tal sucede-se devido à reduzida capacidade de plastificação do adesivo Araldite® AV138, decorrente da referida fragilidade, o que implica uma rotura da junta assim que são atingidas as tensões limite nas extremidades da mesma. A maior dispersão de valores de $P_{\text{máx méd}}$ ocorre para os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, com preponderância deste último adesivo.

3.3.5 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada com o *software* ABAQUS® que se baseia no método de EF e possibilita a utilização do MDC para a previsão da resistência de JSD. Inicialmente foi utilizada uma análise de tensões na camada do adesivo com o objetivo de perceber melhor o comportamento das juntas. Para esta análise considerou-se uma malha muito refinada e a modelação dos substratos e adesivos por elementos sólidos bidimensionais de estado plano de deformação.

Para as análises de dano e resistência, considerou-se uma malha mais grosseira do que a utilizada para a análise de tensões. Os substratos foram modelados como elementos sólidos bidimensionais de estado plano de deformação e o adesivo com elementos coesivos, como é possível observar na Figura 75.

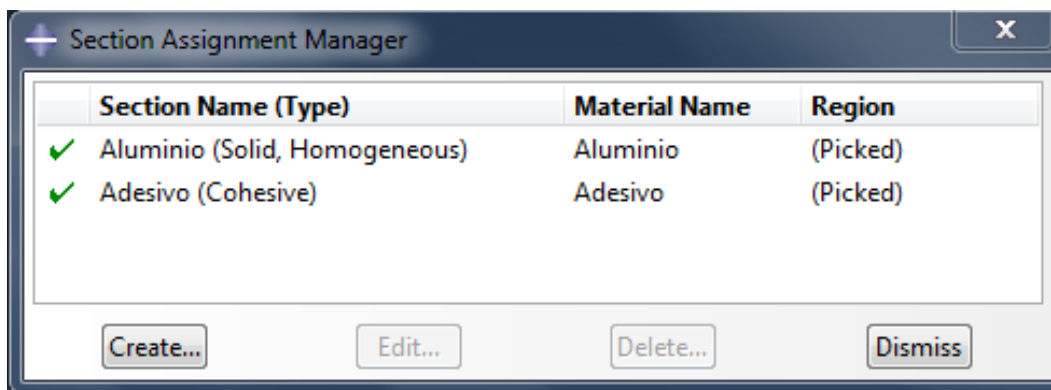


Figura 75 – Definição do tipo de elementos para os diferentes constituintes das juntas para as análises de dano e resistência no ABAQUS® [65]




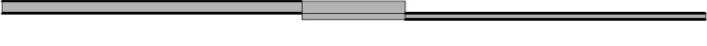
Foi também necessário introduzir as propriedades mecânicas dos materiais em estudo: substratos (Tabela 24) e adesivos.

Tabela 24 – Propriedades dos substratos de liga de Al6082-T651 [65]

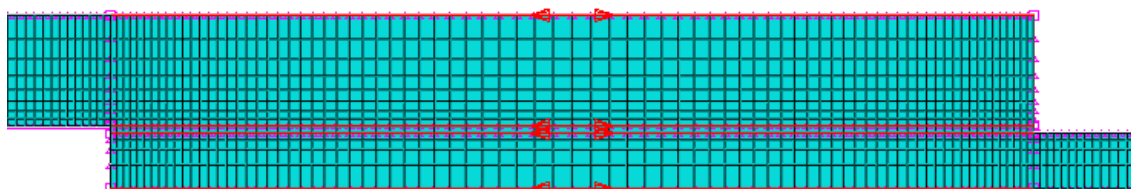
Substrato	E [MPa]	ν	σ_y [MPa]	σ_f [MPa]
AW6082-T651	70070	0,3	261,67	324

As malhas para os modelos de análise de tensões são bastante refinadas. O refinamento da malha possibilita, com alguma precisão, a obtenção dos picos de tensões nas extremidades de sobreposição, teoricamente consideradas regiões singulares [67]. Ao longo da junta há variação na dimensão da malha pois a malha é mais refinada na zona da camada de adesivo, como se pode verificar na Tabela 25. O número de elementos e rácio *bias* (rácio de refinamento) de cada aresta da junta foram escolhidos de forma a garantir um maior refinamento nas zonas mais críticas da junta.

Tabela 25 – Variação das dimensões da malha nas JSD em função de L_0 [mm] [65]

	12,5	25	37,5	50
Zona de sobreposição				
Número de elementos	40	80	120	160
Rácio de <i>bias</i>	3	3	3	3
Altura do substrato superior				
Número de elementos	8	8	8	8
Rácio de <i>bias</i>	3,5	3,5	3,5	3,5
Altura do substrato inferior				
Número de elementos	4	4	4	4
Rácio de <i>bias</i>	3,5	3,5	3,5	3,5
Comprimento não ligado dos substratos				
Número de elementos	100	90	80	80
Rácio de <i>bias</i>	12	12	12	12

Ao longo de L_0 o efeito *bias* foi construído a partir da região central do adesivo até às extremidades da zona de sobreposição (Figura 76). Na região relativa ao comprimento dos substratos em que não há contacto com o adesivo, a malha foi refinada no sentido da camada adesiva (Figura 77).

Figura 76 – Sentido do efeito *bias* da malha na região da sobreposição

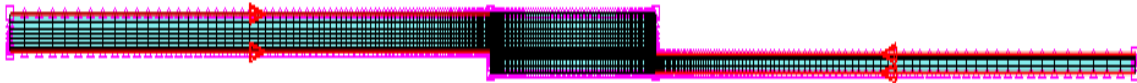


Figura 77 – Sentido do efeito *bias* da malha na região dos substratos sem contacto com o adesivo [65]

Por fim, foi aplicado um refinamento crescente da malha ao longo da espessura dos substratos, como é possível observar na Figura 78.

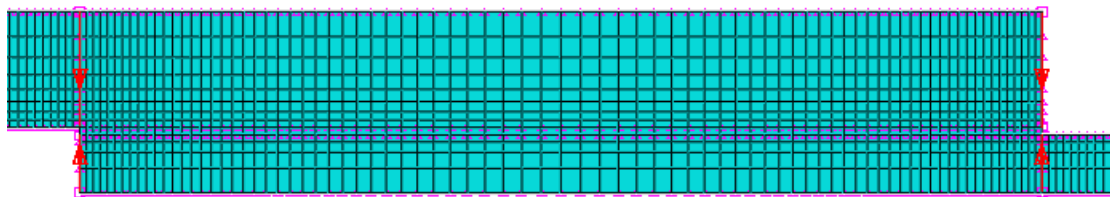


Figura 78 – Sentido do efeito *bias* da malha ao longo da espessura dos substratos [65]

As variações do número de elementos e do efeito *bias* na malha para os diferentes L_0 têm como objetivo diminuir o esforço computacional, o que permite uma redução do tempo na obtenção dos resultados, sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensão. Quanto às condições fronteira (Figura 79) utilizadas nos modelos numéricos, com o objetivo de simular as condições reais dos ensaios experimentais, considerou-se uma das extremidades da junta encastrada enquanto que na outra extremidade da junta foi aplicada uma restrição vertical e um deslocamento de tração.



Figura 79 - Condições fronteira impostas nos modelos numéricos [65]

Na análise por MDC o adesivo foi modelado com elementos coesivos pela aproximação contínua, com uma única linha de elementos coesivos e uma lei de tração separação triangular. Os deslocamentos aplicados nos modelos numéricos em função de L_0 variam para os diferentes adesivos utilizados (Tabela 26).

Tabela 26 – Deslocamentos aplicados nos modelos numéricos

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Adesivo				
Araldite® AV138	0,5	0,5	6	8
Araldite® 2015	0,5	0,5	6	8
Sikaforce® 7752	0,5	0,5	8	8

3.3.6 Modelo de dano coesivo

Existem diferentes formas de leis coesivas que devem ser consideradas em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação de forma a obter resultados mais precisos [10]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos dos quais se destacam:

- Triangular;
- Linear parabólico;
- Exponencial;
- Polinomial;
- Trapezoidal.

A simplicidade, o reduzido número de parâmetros a serem determinados e os resultados precisos para a maioria das condições reais, tornam a lei triangular na lei mais utilizada [24]. O modelo triangular 2D implementado no *software* ABAQUS® está representado na Figura 80, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro e a lei de menores dimensões a lei em modo misto. O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto são utilizados critérios de tensões e energéticos de forma a combinar esforços de tensão e corte [59]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente normal de deformação e de uma deformação de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas entre substratos rígidos as tensões de membrana são desprezadas.

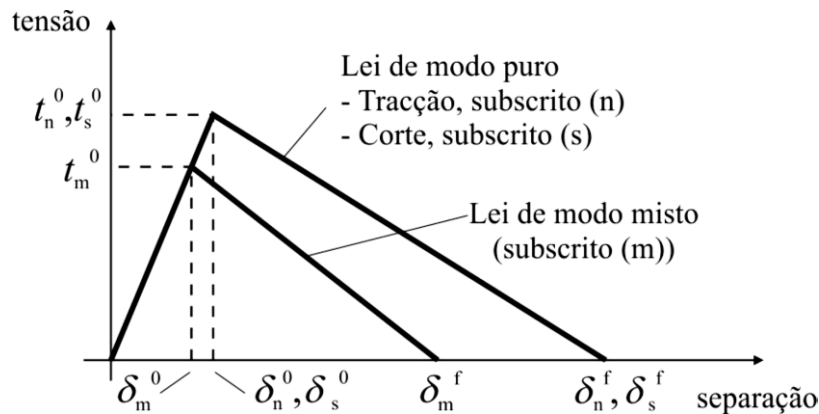


Figura 80- MDC triangular implementado no software ABAQUS® [65]

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 através dos elementos coesivos e é dada por:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{COH}} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (24)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, usada para simular fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0, \quad (25)$$

em que E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Em modo misto a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios como por exemplo, o critério quadrático de tensões definido pela seguinte expressão:

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1, \quad (26)$$

em que $\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay que indicam que uma tensão de compressão não provoca dano. Este critério distingue-se pela sua precisão. Quanto t_m^0 é atingido pela igualdade da equação (26), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f) é prevista por um critério energético em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} expresso pela seguinte igualdade:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\phi + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\lambda = 1, \quad (27)$$

onde ϕ e λ representam o expoente do critério de dano.

3.3.7 Leis coesivas para simulação do adesivo

Com o objetivo de validar os envelopes de fratura obtidos em ensaios de fratura em modo misto para a previsão de resistência de juntas em modo misto, utilizou-se o *software* ABAQUS®. Assim sendo, iniciou-se a introdução dos parâmetros obtidos pelo método inverso.

Relativamente à determinação da lei coesiva à tração verificou-se a obtenção dos seguintes parâmetros (Tabela 27).

Tabela 27 - Valores de entrada da lei coesiva à tração no *software* ABAQUS® de todos os adesivos

Adesivo	t_n^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	E [MPa]	G [MPa]
Araldite® AV138	39,45	0,20	4890	1560
Araldite® 2015	21,63	0,43	1850	560
Sikaforce® 7752	11,48	2,36	490	190

Em relação à lei coesiva em corte verificou-se os seguintes valores de entrada (Tabela 28).

Tabela 28 - Valores de entrada da lei coesiva em corte no *software* ABAQUS® de todos os adesivos

Adesivo	t_s^0 [MPa]	G_{IIC} [N/mm]	E [MPa]	G [MPa]
Araldite® AV138	30,2	0,38	4890	1560
Araldite® 2015	17,9	4,70	1850	560
Sikaforce® 7752	10,17	5,41	490	190

3.3.8 Análise de tensões na junta

Neste subcapítulo analisam-se as tensões instaladas em regime elástico nas JSS e JSD, comparando as tensões σ_y e τ_{xy} obtidas numericamente no ABAQUS®. A análise é realizada a meio da espessura de adesivo, para os diversos adesivos e valores de L_0 das juntas. Esta análise tem como objetivo compreender a influência de cada uma das configurações de junta na distribuição de tensões e resistência das juntas, auxiliando a fundamentar os resultados obtidos de $P_{m\acute{a}x}$. Os gráficos das tensões apresentados nos capítulos seguinte foram obtidos mediante um procedimento de normalização de tensões, que consistiu em dividir as tensões σ_y e τ_{xy} por $\tau_{m\acute{e}d}$ para cada valor de L_0 . O valor de L_0 também foi normalizado para x/L_0 (x representa a distância desde uma das extremidades de sobreposição), de tal forma que $0 \leq x/L_0 \leq 1$.

3.3.8.1 Tensões de arrancamento

A Figura 81, Figura 82 e Figura 83 apresentam as distribuições de tensões σ_y para as JSS, em função de L_0 . As tensões σ_y registam uma magnitude inferior a $\tau_{m\acute{e}d}$, com exceção das extremidades de ligação das juntas, em virtude de estas constituírem zonas de singularidade de tensão devido à rotação dos substratos [6, 68, 69]. Por causa desta rotação, nestas regiões geram-se tensões de tração, ao passo que nas zonas mais interiores se geram tensões de compressão. Isto verifica-se porque a deformação dos substratos durante a solitação provoca a deformação transversal da junta, o que resulta no tracionamento das extremidades da ligação adesiva e compressão na zona intermédia da mesma. A resistência destas juntas é significativamente afetada pelas tensões σ_y , dada a criticidade das mesmas para a ligação adesiva, pelo que estas podem conduzir à rotura precoce da junta [17, 67, 70].

O estudo paramétrico de L_0 demonstrou que os picos das tensões σ_y aumentaram com o incremento de L_0 . Na proximidade das singularidades observam-se picos compressivos de σ_y que também tendem a aumentar de intensidade com o aumento de L_0 , enquanto as tensões compressivas no sentido do interior da ligação tendem a diminuir. De referir que o aumento dos picos de tensão σ_y com o incremento de L_0 tende a diminuir a resistência média da junta na área de ligação, especialmente nas juntas com adesivos frágeis [71].

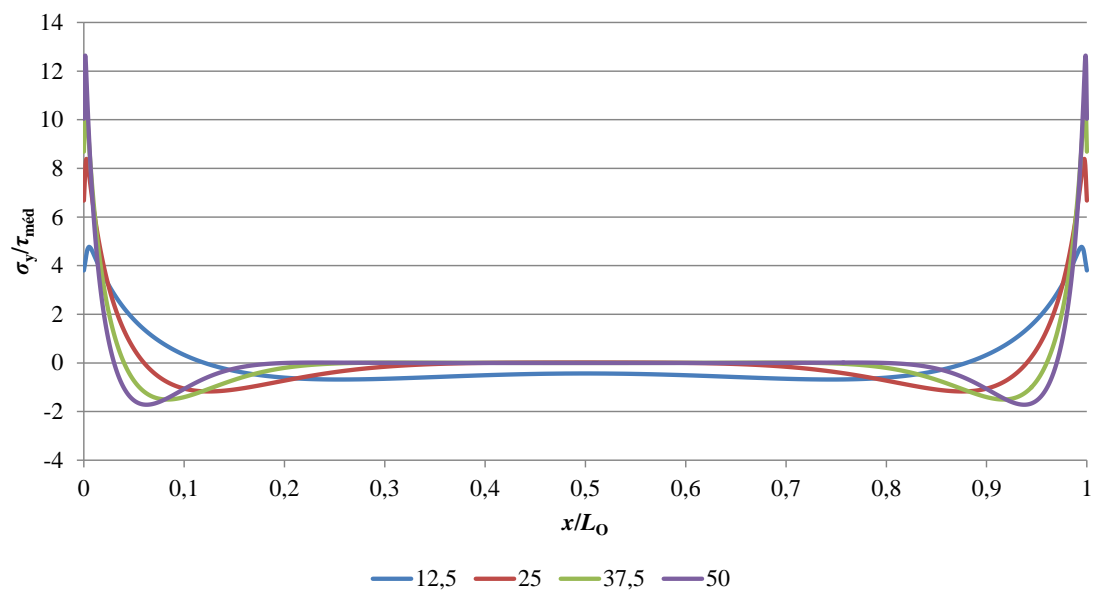


Figura 81 - Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0

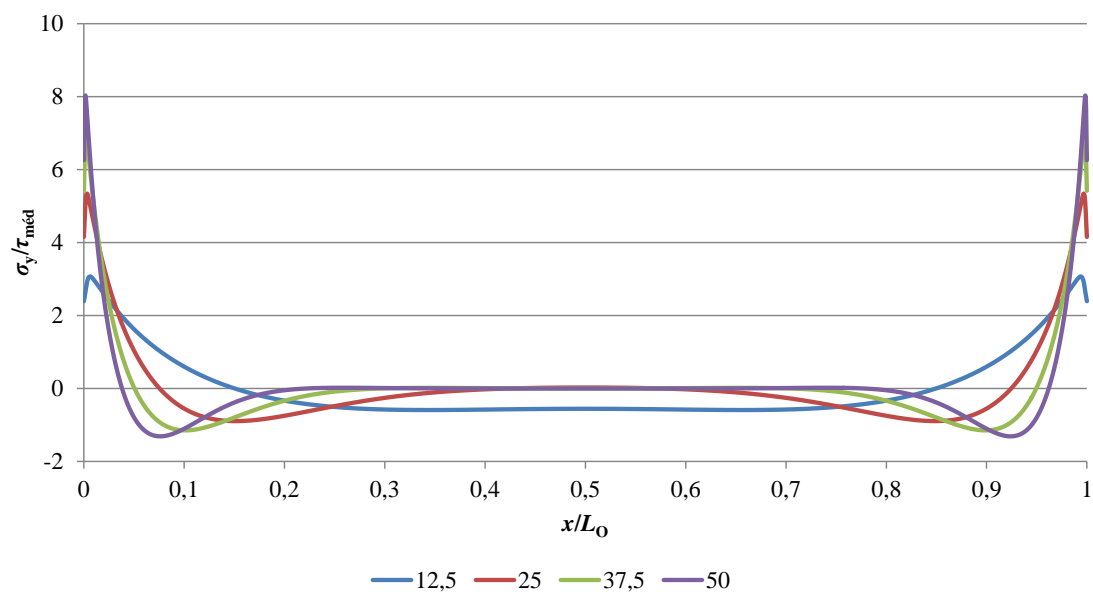


Figura 82 - Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0

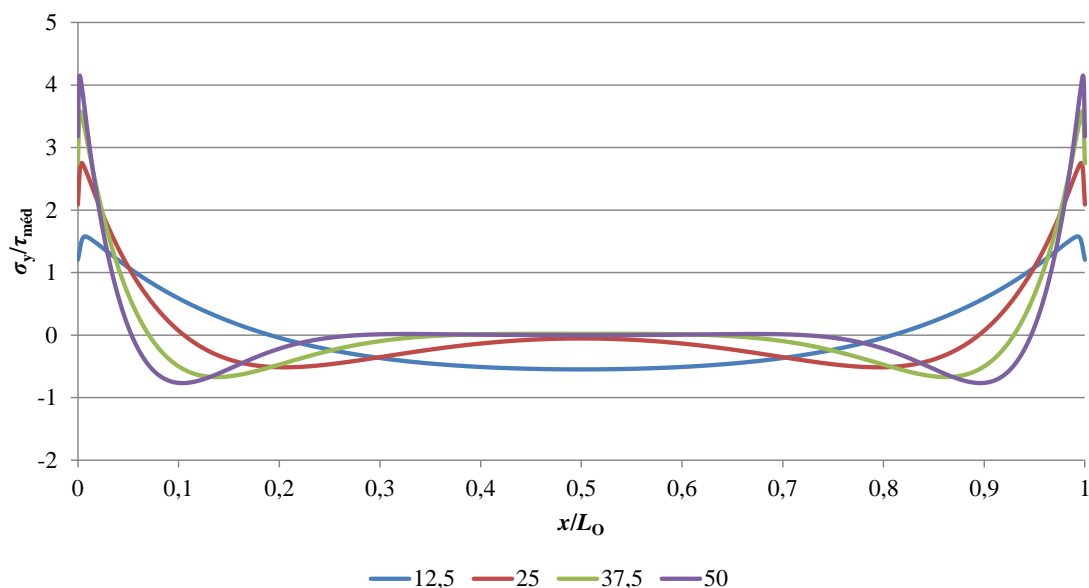


Figura 83 - Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0

Observa-se que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta o maior gradiente de tensões σ_y para os diversos valores de L_0 . Isto justifica-se pela sua superior rigidez, que influencia a distribuição de tensões na camada adesiva, e que pode induzir à rotura prematura da mesma. Por outro lado, os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 revelam distribuições de tensões mais uniformes. Terminando, no contexto da análise das tensões σ_y , para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam valores de pico de tensão σ_y normalizada em tração de 12,6, 8,0 e de 4,1, respetivamente, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos.

A Figura 84, Figura 85 e Figura 86 representam a distribuição das tensões σ_y para as JSD, com diversos adesivos e valores de L_0 . À semelhança das JSS, nestas juntas σ_y também regista uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , com exceção das extremidades da ligação devido à singularidade de tensão [6, 68, 69]. No entanto, o perfil de tensões das JSD não é totalmente semelhante ao das JSS. Na extremidade esquerda das JSD, correspondente à extremidade exterior da sobreposição, verificam-se picos de tração [72], e picos de compressão na extremidade interior da sobreposição [73]. Estas diferenças nos perfis de tensões devem-se sobretudo ao facto das JSD não apresentarem deflexão transversal do substrato interior devido ao carregamento simétrico [32, 74]. Isto promove uma redução generalizada das tensões de pico σ_y nas JSD em todos os valores de L_0 [75]. Já os valores das tensões σ_y na região central são aproximadamente nulos, com gradientes crescentes para as extremidades da ligação com o incremento de L_0 , à semelhança das JSS. Deste modo, as tensões compressivas na extremidade interna das JSD, combinadas com tensões de pico σ_y inferiores na extremidade externa face às JSS, deixam antever

benefícios significativos no que respeita à resistência da junta para a mesma área de ligação [73].

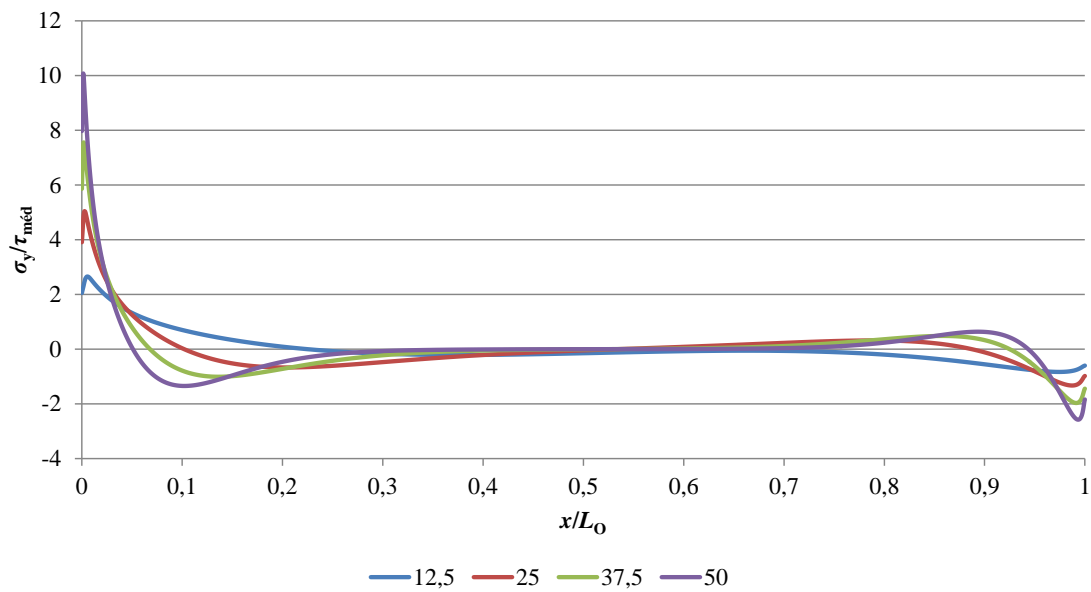


Figura 84 - Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0

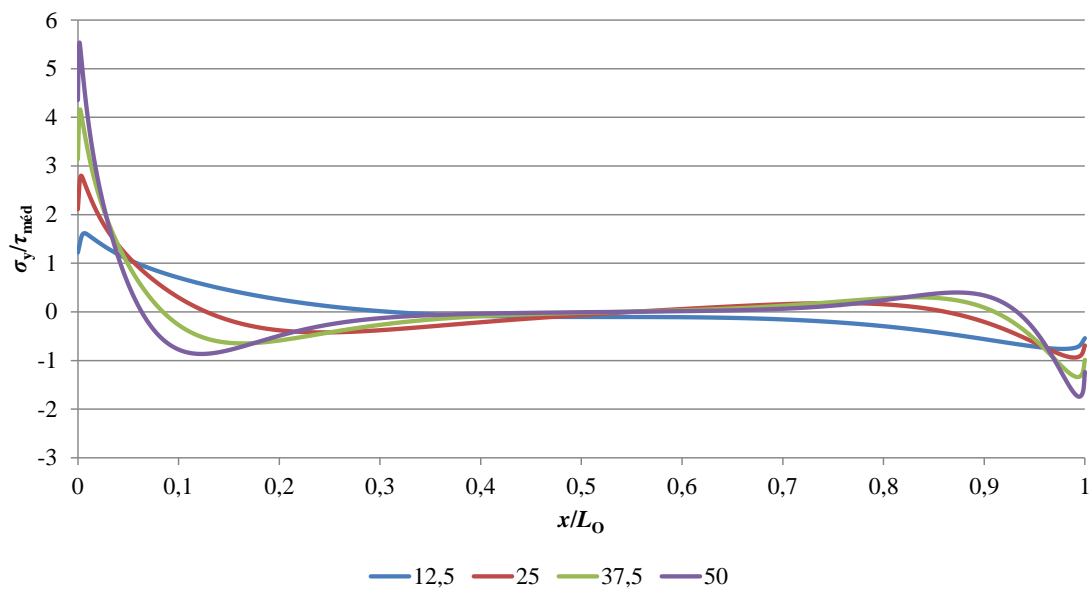


Figura 85 - Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0

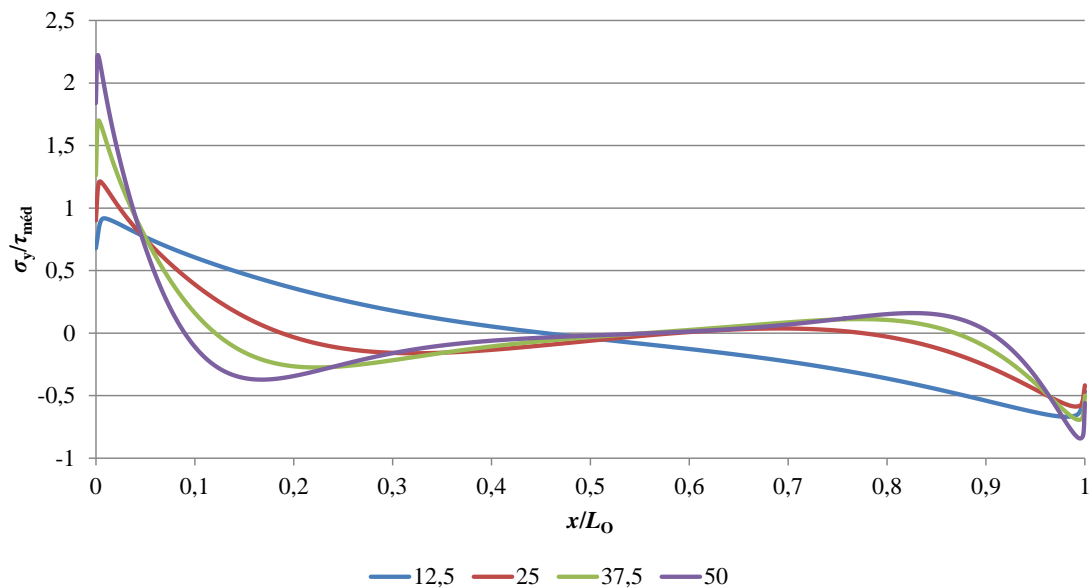


Figura 86 - Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0

Fazendo uma analogia entre os três adesivos das JSD, denota-se que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta os valores de pico de tensão σ_y mais pronunciados na extremidade exterior. Isto verifica-se devido à elevada rigidez do adesivo, o que limita a uniformidade da distribuição de tensões ao longo da sobreposição. Para além disso, como referido anteriormente para as JSS, uma elevada rigidez pode induzir à rotura prematura da junta.

Para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam respetivamente, valores de pico de tensão σ_y normalizados em tração de 10,0, 5,5 e de 2,2, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos. Os valores de pico de tensão σ_y apresentados revelam um decréscimo, face aos homólogos das JSS, de aproximadamente 20,6%, 31,3% e de 46,3%, respetivamente.

3.3.8.2 Tensões de corte

Na Figura 87, Figura 88 e Figura 89 observam-se as distribuições de tensões τ_{xy} para os diversos adesivos e valores de L_0 (JSS). Na zona interior da sobreposição as tensões τ_{xy} possuem uma grandeza inferior a $\tau_{méd}$, excetuando nas extremidades da sobreposição, que constituem zonas de concentração de tensão [68, 69, 76]. Este comportamento ocorre devido à deformação diferencial longitudinal de cada um dos substratos ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre dos mesmos e aumenta até à extremidade oposta [72, 77]. No entanto, na região central da sobreposição, o referido efeito é anulado, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Verifica-se ainda um aumento progressivo das tensões de pico

τ_{xy} com o aumento de L_0 . Esta tendência deve-se ao gradiente crescente de deformações longitudinais dos substratos à medida que se aumenta o valor de L_0 , o que por sua vez é decorrente do aumento das áreas de ligação e cargas transmitidas [10]. À semelhança dos gradientes de tensões σ_y , verifica-se que os gradientes de tensão τ_{xy} são extremamente prejudiciais para a resistência das juntas, nomeadamente se forem utilizados adesivos frágeis, cuja fratura ocorre no momento em que é atingida τ_f e pela capacidade de plastificação quase nula destes adesivos [77]. Este efeito pode ser contornado pela utilização de adesivos dúcteis, uma vez que estes permitem a plastificação do adesivo e rotura da junta para valores mais elevados de $\tau_{méd}$ [78]. Tal verifica-se porque a capacidade de plastificação destes adesivos conduz a uma melhor redistribuição de tensões ao longo da sobreposição, enquanto a baixa rigidez contribui para um menor gradiente de tensões, o que se traduz num decréscimo de tensões τ_{xy} nas extremidades da sobreposição face aos adesivos frágeis, e simultaneamente num aumento das referidas tensões na região interna da sobreposição, o que culmina no aumento da resistência da junta [79, 80]. Deste modo, numa situação limite, toda a região da sobreposição estaria a ser solicitada no momento da rotura [78].

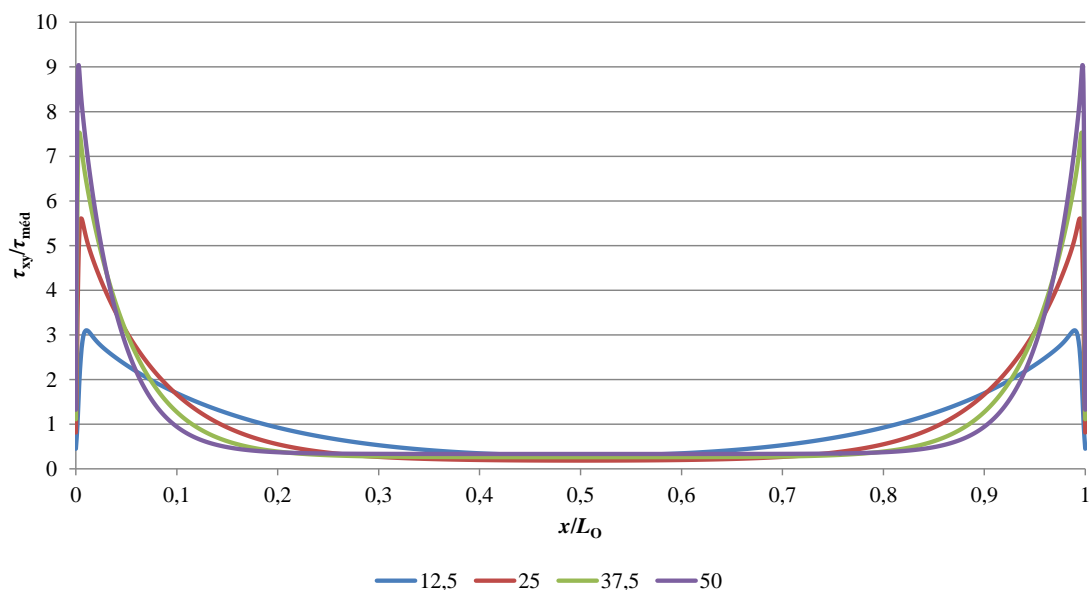


Figura 87 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0

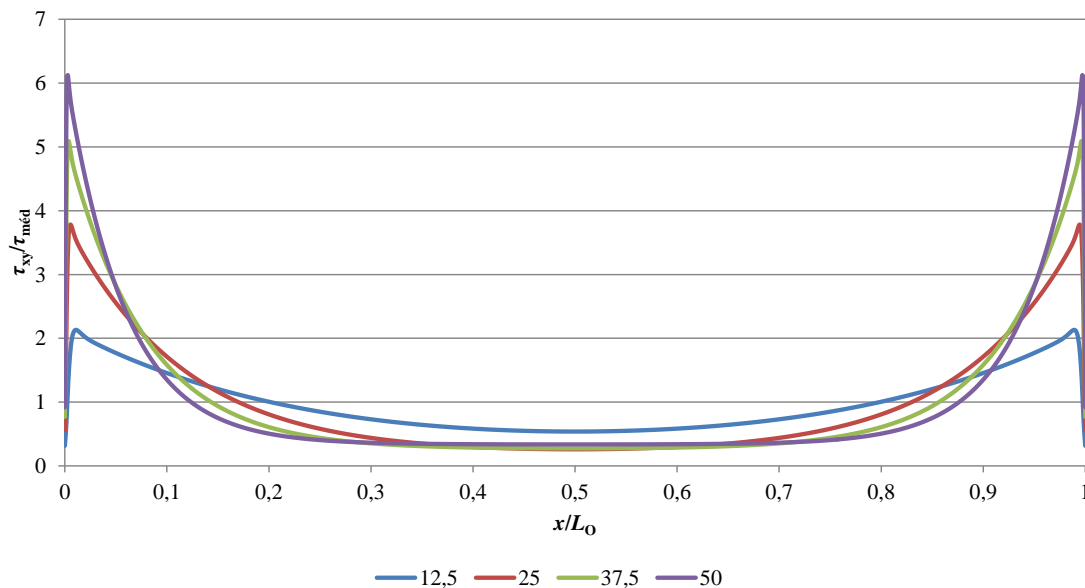


Figura 88 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0

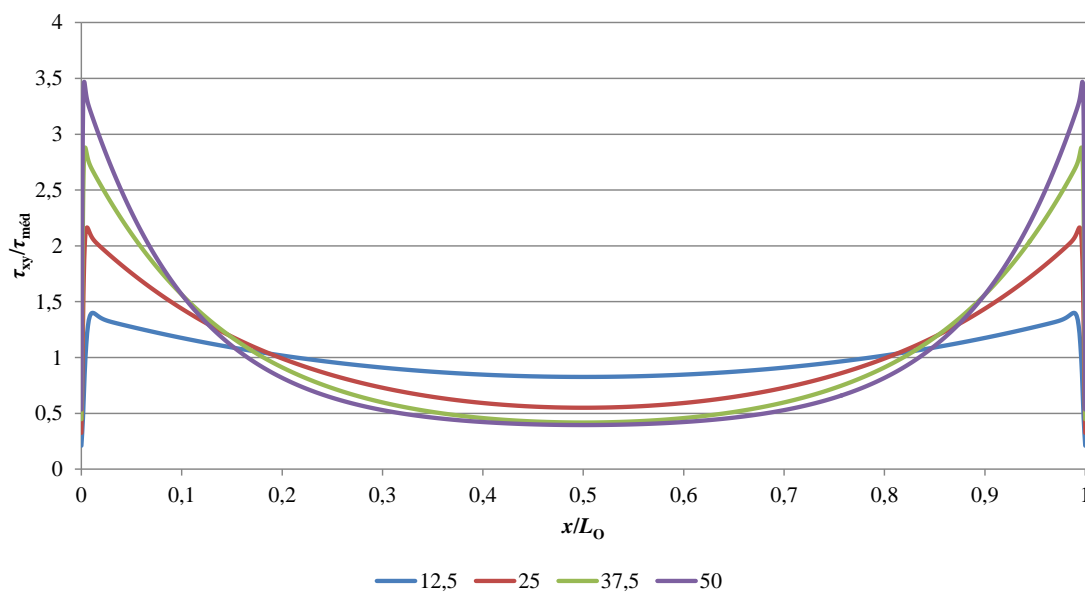


Figura 89 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0

Através da comparação entre as tensões τ_{xy} instaladas nos adesivos das JSS, denota-se que o adesivo mais frágil (Araldite® AV138) dos três adesivos é o que apresenta valores de pico superiores, o que corresponde a gradientes de tensões mais elevados ao longo da sobreposição. Estes factos devem-se sobretudo à elevada rigidez do adesivo em questão, que influencia a distribuição de tensões na camada adesiva. Para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam

valores de pico de tensão τ_{xy} em tração de 9,04, 6,1 e de 3,5, respetivamente, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos.

Na Figura 90, Figura 91 e Figura 92 estão representadas as distribuições de tensões τ_{xy} para as JSD, para os três adesivos e quatro valores de L_0 . Observa-se que a distribuição de tensões não é simétrica, contrariamente ao registado nas JSS. De facto, a extremidade exterior das JSD apresenta uma magnitude de tensões τ_{xy} bem superior à extremidade oposta, devido à solicitação a que o substrato intermédio é sujeito, o que se traduz em cargas elevadas na proximidade de $x/L_0=0$. Comparando os picos das tensões τ_{xy} com os equivalentes nas JSS, denota-se que na extremidade interior de sobreposição ocorre um decréscimo significativo na magnitude dos mesmos. Já na extremidade exterior também se verifica uma diminuição do pico das tensões τ_{xy} , embora de forma menos significativa [81]. Esta diferença deve-se à menor variação das deformações longitudinais entre os dois substratos exteriores e o substrato interior, o que se traduz na redução do efeito da deformação diferencial dos mesmos [73]. As modificações no perfil de tensões τ_{xy} das JSD, devem-se refletir numa resistência da junta superior a 2 vezes a das JSS, correspondente à relação entre as áreas coladas de ambas as configurações de junta [80]. À semelhança do que se verificou nas JSS, o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ nas JSD também não deve ser proporcional ao aumento de L_0 , dado que os picos das tensões σ_y e τ_{xy} sofrem um acréscimo de intensidade com o aumento de L_0 . Isto será ainda mais evidente nas juntas com adesivos frágeis, uma vez que o adesivo não permitirá plastificação nas extremidades da sobreposição quando são atingidas as tensões limite [77].

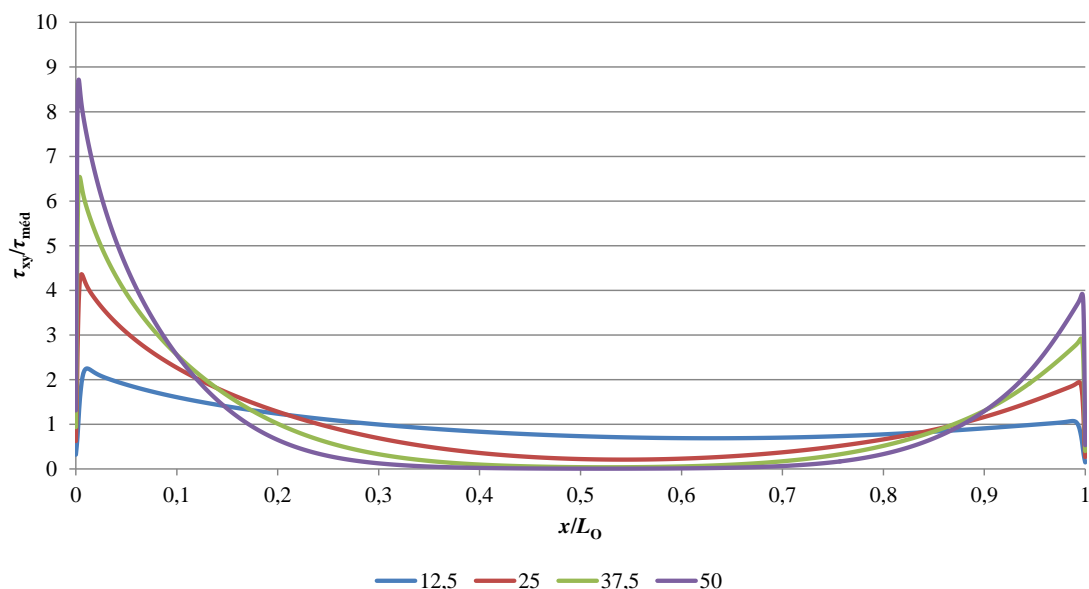


Figura 90 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0

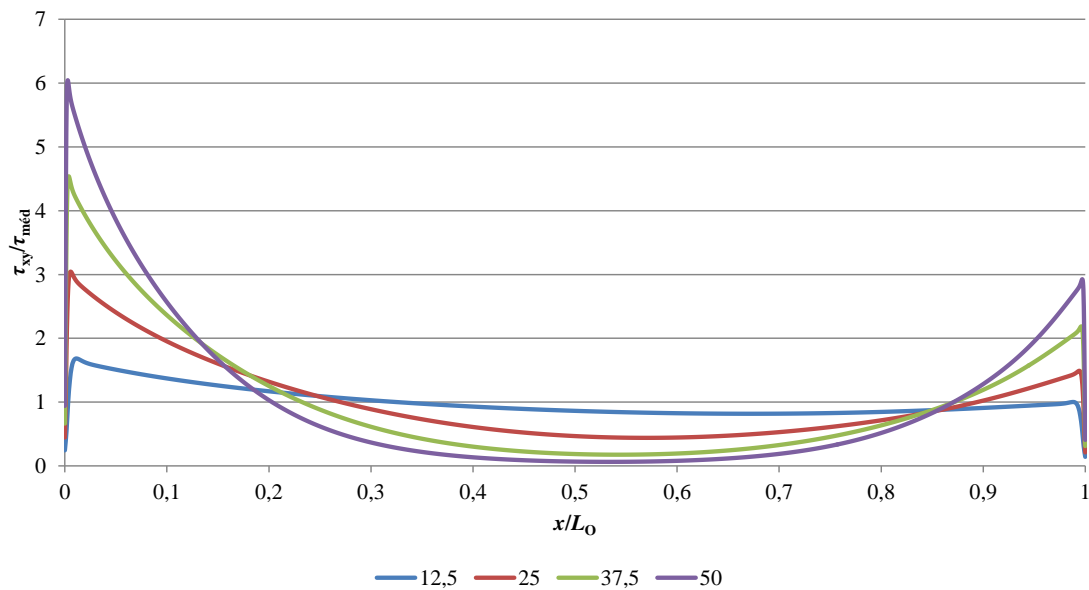


Figura 91 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0

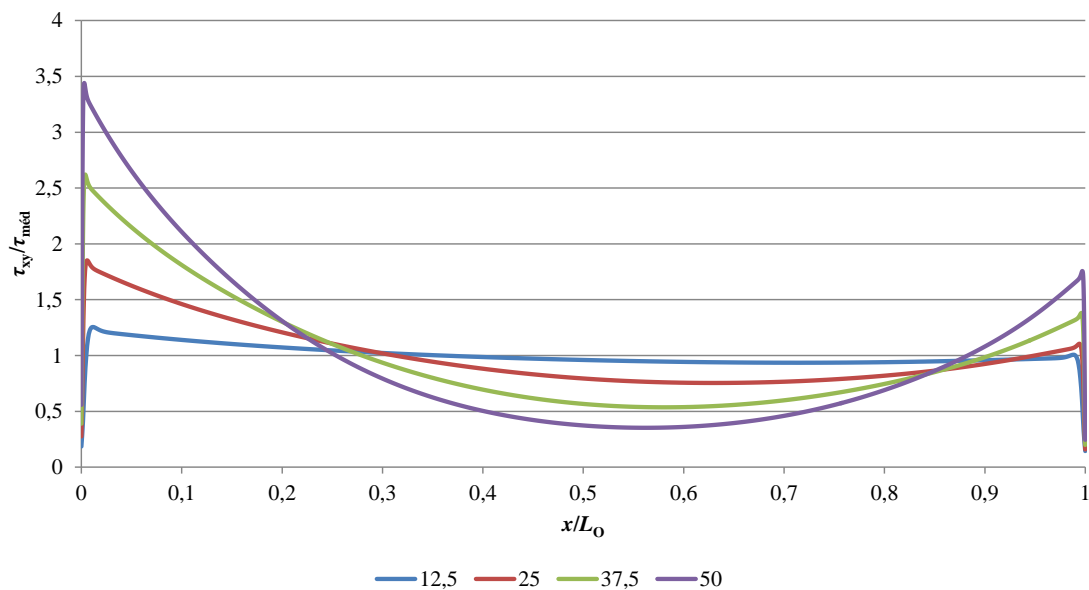


Figura 92 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0

Pela comparação entre os três adesivos ensaiados, observa-se que o adesivo Araldite® AV138, devido à sua fragilidade, é que apresenta o maior gradiente de tensões τ_{xy} , devido à sua rigidez. Para além disso, denota preponderância no que concerne às tensões de pico τ_{xy} nas extremidades da ligação.

Quantificando os picos de tensões τ_{xy} normalizada nas extremidades das JSD, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, e $L_0=50$ mm, obtiveram-se valores de 8,72, 6,0 e 3,44, respetivamente. Esta variação está em concordância com a

ordem de decrescente de rigidez dos adesivos, à semelhança do sucedido nas JSS. Comparando os valores de tensões τ_{xy} apresentados nas mesmas condições face às JSS, regista-se um decréscimo percentual nas referidas tensões de pico τ_{xy} de 3,7%, 2,17% e de 0,9%, respetivamente. Este decréscimo deve ser responsável por um aumento da resistência das JSD face às JSS com igual valor de L_0 superior a 2 vezes (relação de áreas coladas).

3.3.9 Estudo da variável de dano

O estudo da variável de dano SDEG dos elementos coesivos da camada de adesivo ao longo de x/L_0 é uma das ferramentas que ajuda à comparação entre JSS e JSD. Esta variável varia entre SDEG=0 (material não danificado) até SDEG=1 (rotura completa) e fornece a degradação da rigidez da lei coesiva em modo misto do MDC. A Figura 93 apresenta a variável de dano na camada de adesivo no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é obtido para as JSS [82], sendo que nesta análise só se consideram os valores menores e maiores de L_0 (12,5 e 50 mm), uma vez que representam os comportamentos limite das juntas, enquanto as juntas entre estes valores extremos mostram um comportamento intermédio entre estas configurações de juntas.

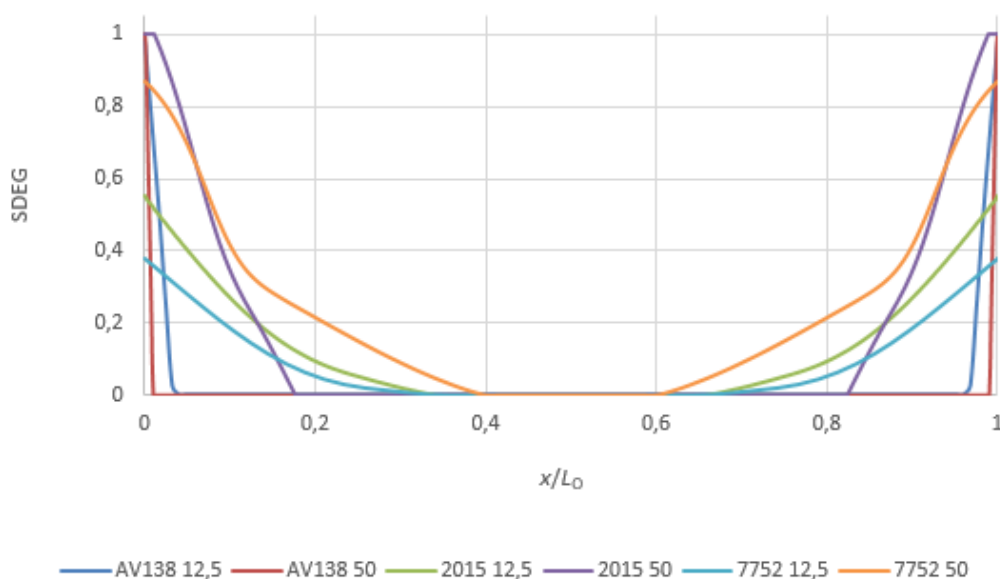


Figura 93 - Variável de dano na camada de adesivo no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingido para as JSS [82]

Através da análise da Figura 93, é possível verificar que o dano se estende por uma área mais alargada para $L_0=12,5$ mm, porque o gradiente das tensões τ_{xy} (que governam o processo de rotura) é menor para L_0 reduzidos, exceto para o Sikaforce® 7752, devido à grande ductilidade deste adesivo. Comparando os três adesivos usados, verifica-se que a curva da variável de dano se torna mais plana ao longo de L_0 para o adesivo Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 devido à capacidade de plastificação e redistribuição de tensões

destes adesivos. Este comportamento é responsável pelo elevado valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido para estes dois adesivos. Para o Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm, $P_{m\acute{a}x}$ ocorre sem que se observe dano total em qualquer porção de L_0 , devido à grande ductilidade do adesivo. Por outro lado, este valor é de 2,0% para o Araldite® 2015 e quase nulo para a Araldite® AV138.

A análise da evolução da variável de dano com o carregamento aplicado é também bastante útil. Este estudo foi realizado para as JSS [82] e apenas para os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. A variável de dano é representada para valores crescentes de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \times 100$ [%], onde $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ é o deslocamento em $P_{m\acute{a}x}$ (como resultado, um valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ de 100% corresponde a $P_{m\acute{a}x}$).

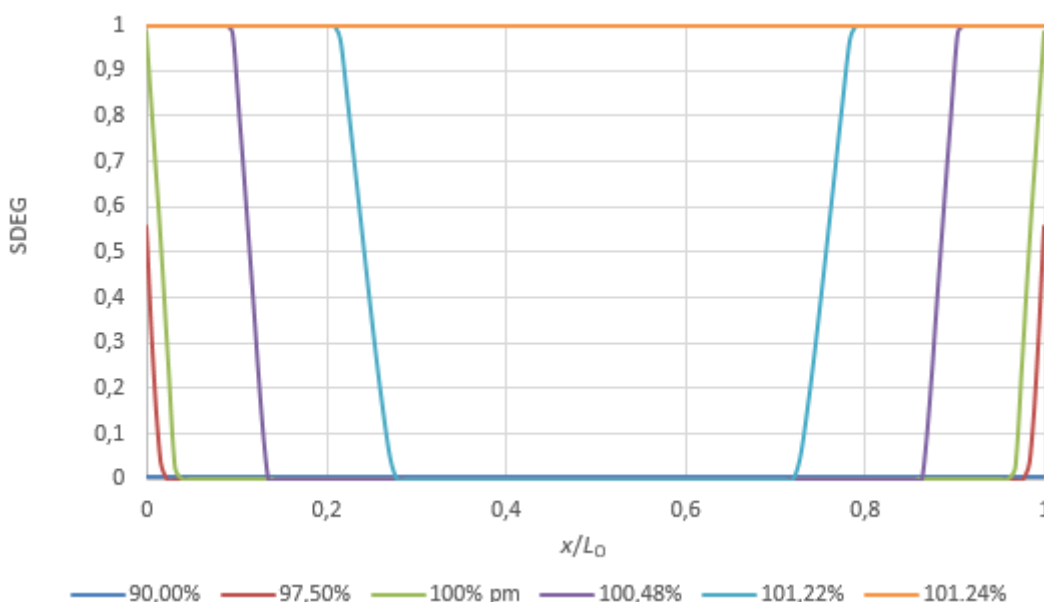


Figura 94 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Araldite® AV138 para $L_0=12,5$ mm

Para as JSS e o adesivo Araldite® AV138 (Figura 94), por este ser um adesivo frágil, o valor de SDEG na sobreposição varia entre SDEG=0 (ausência de dano) e SDEG=1 (dano completo) numa extensão muito reduzida, o que resulta numa zona de dano muito pequena. O valor de $P_{m\acute{a}x}$ é atingido com um grau insignificante de plastificação do adesivo nas extremidades de sobreposição. Este comportamento é responsável pelo aumento reduzido de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 . A rotura completa ocorre muito rapidamente (entre $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}=100\%$ e 101,24% para $L_0=12,5$ mm e entre 100% e 102,47% para $L_0=50$ mm). A principal diferença para as JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 96 e Figura 97) foi a variação mais gradual de SDEG através da zona adesiva. Este fenómeno acontece devido a este adesivo ter uma ductilidade significativa. Para $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}=100\%$, por exemplo, apenas uma fração de $\approx 21,7\%$ ($L_0=12,5$ mm) e 19,9% ($L_0=50$ mm) da sobreposição está sem dano. A porção restante da sobreposição está na fase de amaciamento da lei coesiva ou já atingiu mesmo a rotura. Para $L_0=12,5$ mm, a rotura

completa ocorreu em $\delta/\delta_{p_{max}} \approx 162,63\%$, enquanto para $L_0=50$ mm corresponde a um $\delta/\delta_{p_{max}} \approx 102,71\%$, o que corresponde a um processo de rotura muito mais gradual do que para o Araldite® AV138.

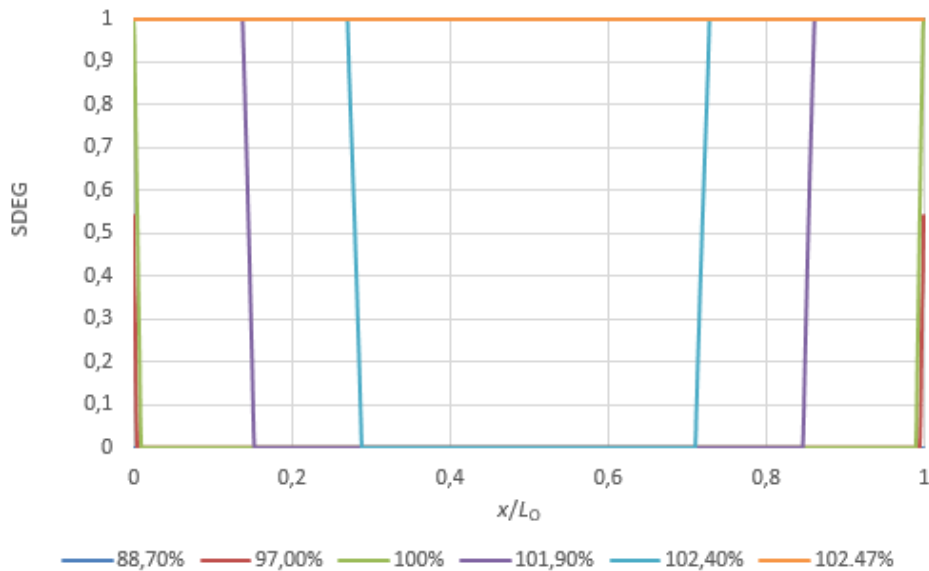


Figura 95 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Araldite® AV138 para $L_0=50$ mm

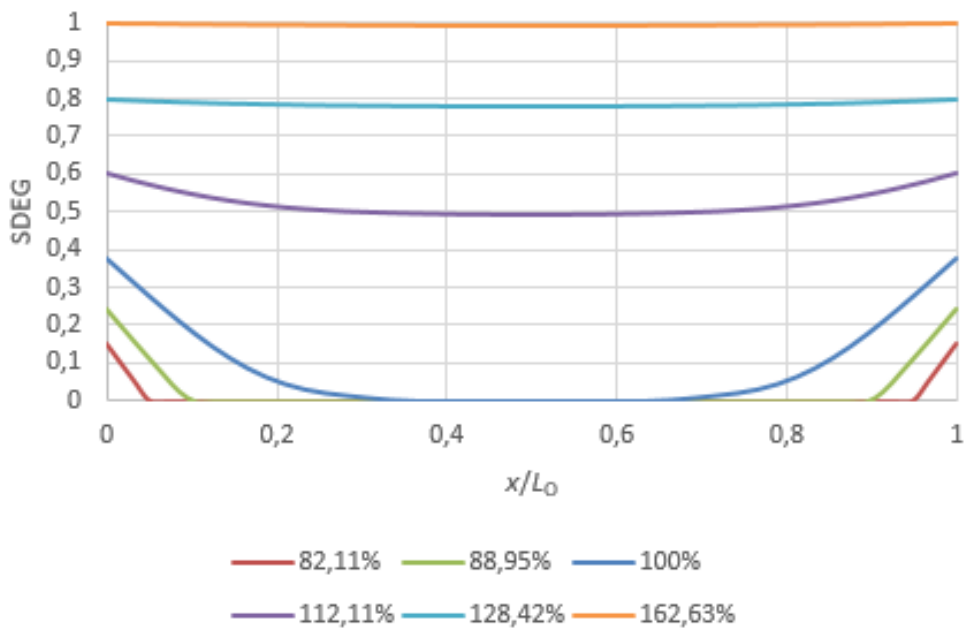


Figura 96 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Sikaforce® 7752 para $L_0=12,5$ mm

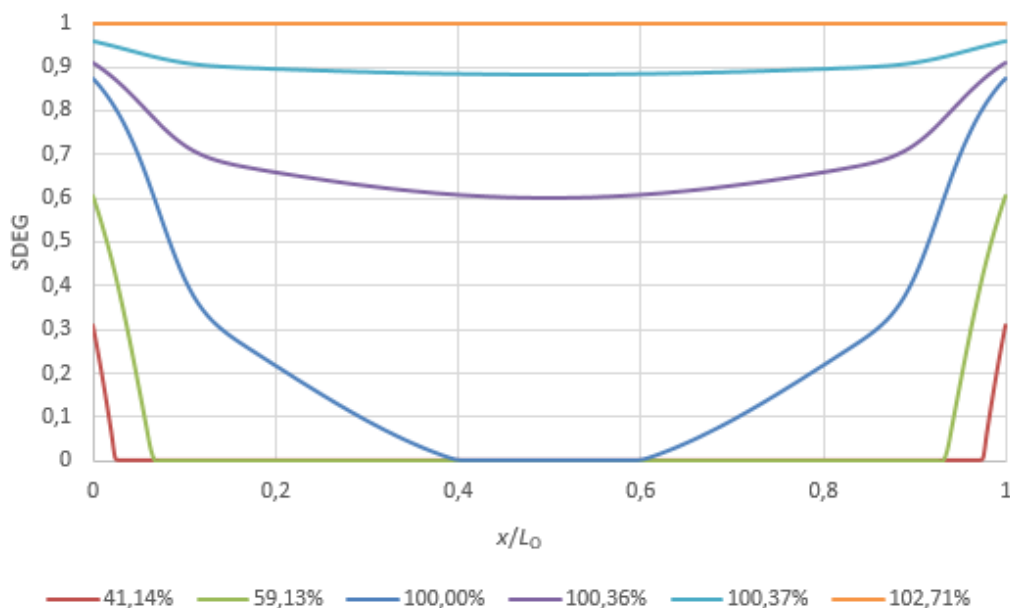


Figura 97 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Sikaforce® 7752 para $L_0=50$ mm

Para as JSD (Figura 98) e para todos os adesivos, considerando o instante de $P_{m\acute{a}x}$, o dano propaga-se ao longo da zona colada numa extensão que depende do adesivo utilizado, e este deixa de ser simétrico devido às distribuições também assimétricas das tensões σ_y e τ_{xy} ao longo da sobreposição (Figura 84 a Figura 86 e Figura 90 a Figura 92). De facto, devido à maior deformação longitudinal dos substratos na extremidade exterior da sobreposição, as tensões σ_y e τ_{xy} concentram-se nesta zona, tornando este o local do início do dano. Tal como nas JSS, o dano apresenta uma distribuição mais uniforme para $L_0=12,5$ mm do que para 50 mm, devido à menor magnitude dos picos de tensões σ_y e τ_{xy} . Pela comparação das configurações de junta com $L_0=12,5$ e 50 mm, e ao contrário do observado nas JSS, no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingida, a extensão do dano para o interior da zona colada nem sempre é maior para as juntas com $L_0=50$ mm, dependendo antes do adesivo. O elevado grau de dano para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 quando $P_{m\acute{a}x}$ é atingida para $L_0=12,5$ ou 50 mm é indicativo do elevado grau de plastificação até à rotura e, correspondentemente, dos valores mais elevados de $P_{m\acute{a}x}$ que se esperam relativamente ao adesivo Araldite® AV138. De igual forma às JSS, os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 possibilitam que uma região plástica considerável contribua para a resistência das juntas, ao contrário do adesivo frágil Araldite® AV138, que concentra o dano na extremidade da sobreposição. Quando o $P_{m\acute{a}x}$ é atingido, as juntas adesivas com o Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm apresentam dano total em 35,1% na zona de ligação, comparado com os 10,7% para as juntas com o Araldite® AV138. Relativamente às juntas adesivas com o Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm o dano chega a 79% verificando-se a partir desse ponto uma estrição do substrato, sem que se observe mais dano.

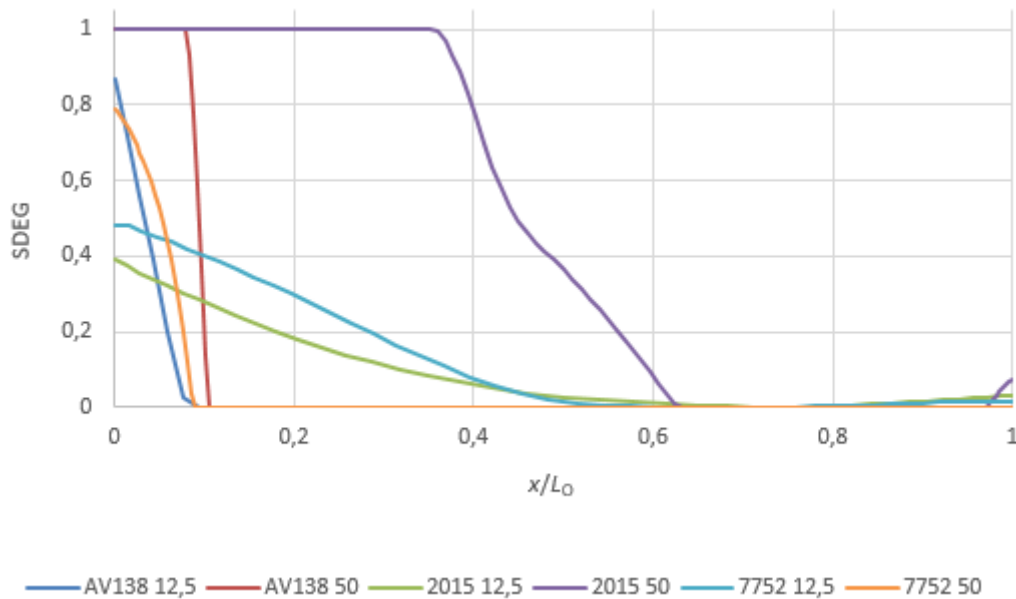


Figura 98 - Variável de dano na camada de adesivo no instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$ para as JSD

Apresenta-se na Figura 99 e Figura 100 a evolução de SDEG com $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ para o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm e 50 mm, respetivamente. As Figura 101 e Figura 102 representam uma análise idêntica para o adesivo Sikaforce® 7752. Para as JSD coladas com o Araldite® AV138, a rápida variação de SDEG desde o estado não danificado até dano completo que se observou para as JSS é também observada nestas juntas, especialmente para $L_0=50$ mm. Como resultado, a rotura destas juntas ocorre com um grau muito pequeno de plastificação. Para $L_0=12,5$ mm, a rotura completa ocorreu a menos de 100,1% de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$, enquanto para $L_0=50$ mm este valor aumentou para 110,9%. Comparando com as configurações de junta correspondentes das JSS [82], além da ausência de simetria nos gráficos de dano, $P_{m\acute{a}x}$ é atingido com maior (mas ainda reduzida) porção de dano na sobreposição, o que é resultado da melhoria nas distribuições das tensões das JSD relativamente às JSS. Esta diferença deve ser responsável por valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores em mais de 2x aos apresentados para as JSS. Em comparação com o Araldite® AV138, o dano do Sikaforce® 7752 estende-se muito mais gradualmente através das juntas devido à capacidade de plastificação deste adesivo. Também devido a este facto, para $P_{m\acute{a}x}$ ($\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}=100\%$) e para $L_0=12,5$ mm, só $\approx 16\%$ do adesivo está sem dano. Para $L_0=50$ mm, este valor é $\approx 91\%$. Comparando com os resultados das JSS [82], deixa de haver simetria nas curvas de dano. A rotura completa ocorre para $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \approx 166,91\%$ para as juntas com $L_0=12,5$ mm, e para $L_0=50$ mm não ocorre rotura completa, devido à estricção ocorrida no substrato, já anteriormente explicada. O valor menor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ para valores maiores de L_0 é justificado pela plastificação do substrato interior, o que desencadeia uma rotura prematura do adesivo. Contudo, em ambos os casos a rotura é muito mais progressiva do que para o adesivo Araldite® AV138. A quantidade significativa de dano completo para $L_0=50$ mm e para

$\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=100\%$ (31,1%) é o resultado da plastificação do substrato interior, que reduz o valor efetivo de L_0 que contribui para $P_{\text{máx}}$. Isto irá provavelmente conduzir a um rácio de resistência entre esta JSD e a JSS correspondente menor do que a relação de área colada, de 2x, entre estas duas configurações de junta.

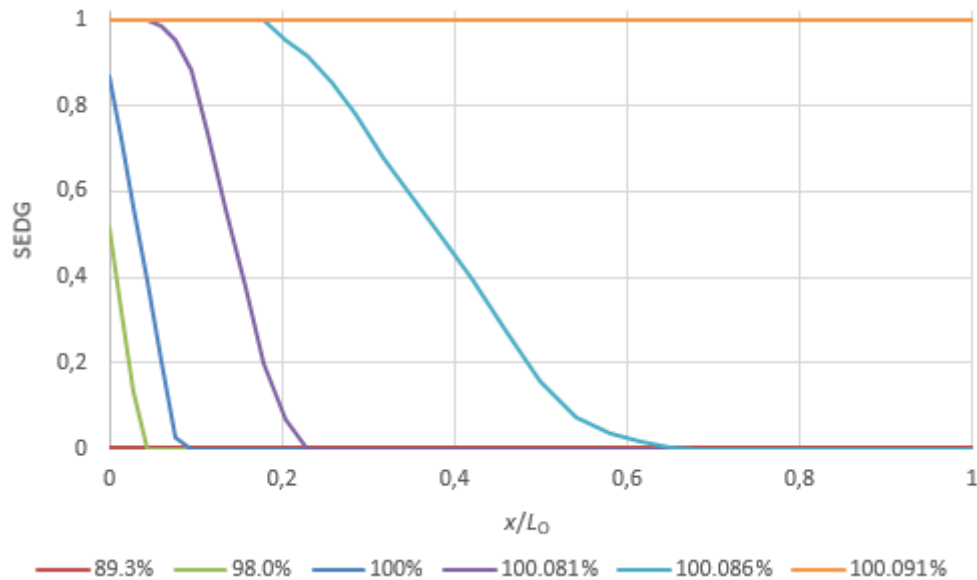


Figura 99 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm

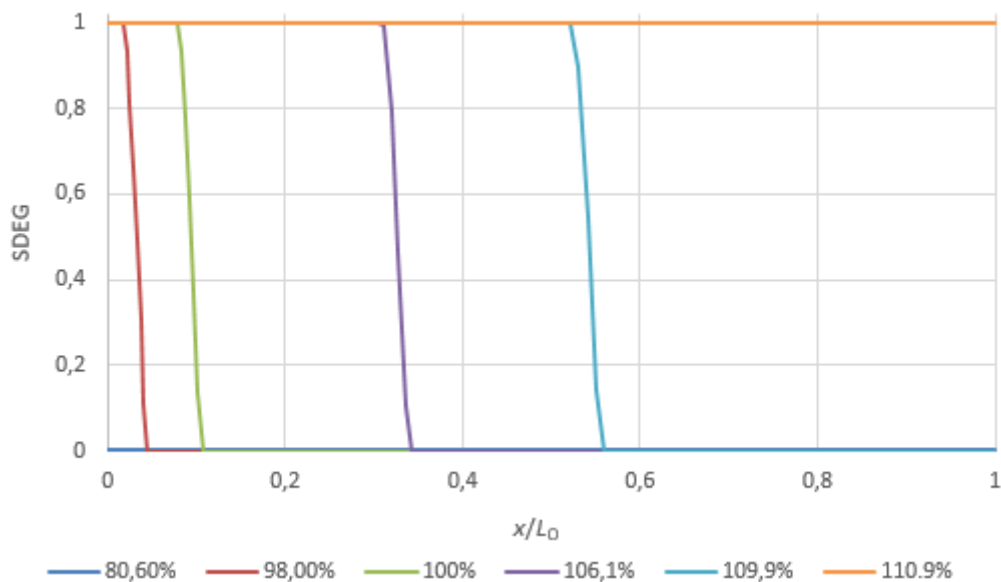


Figura 100 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm

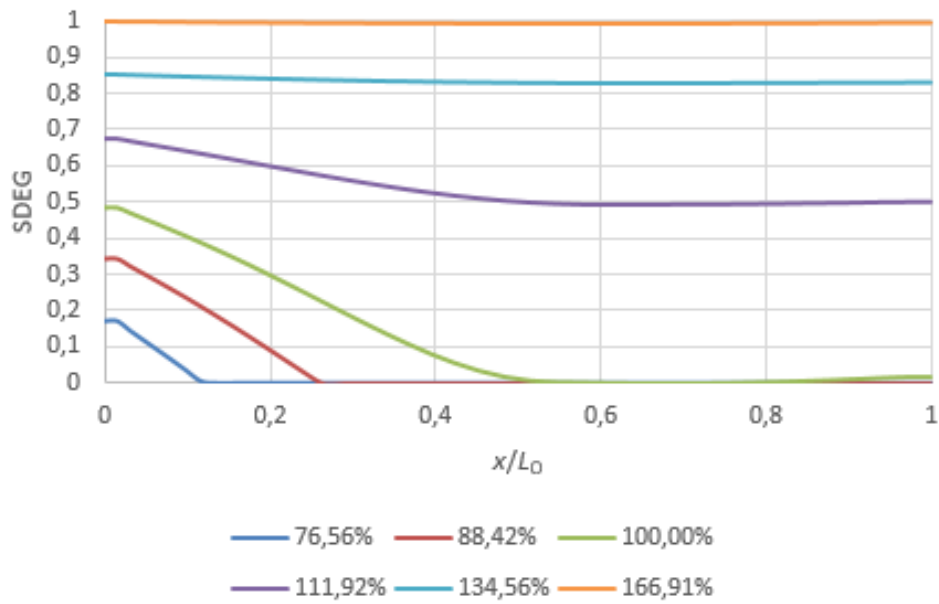


Figura 101 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm

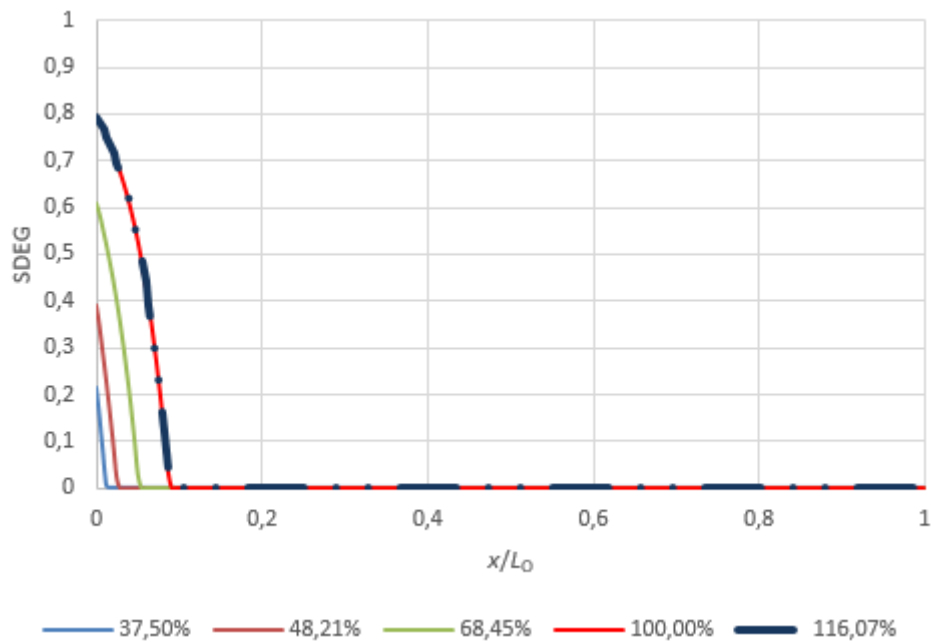


Figura 102 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm

3.3.10 Previsão da resistência

Neste capítulo são apresentadas, através de gráficos, as previsões numéricas por MDC dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para JSS e JSD em que foram utilizados os expoentes apresentados na Tabela 29 para o critério energético de propagação de dano (equação (27)).

Tabela 29 – Expoentes utilizados para critério de propagação de dano

Critério	ϕ	λ
a	1	1
b	2	2
c	3/2	3/2
d	1/2	1/2

São ainda apresentadas as curvas P - δ de cada adesivo, para cada valor de L_0 e critério energético citado anteriormente.

3.3.10.1 Juntas de sobreposição simples

Na Figura 103 estão representadas as curvas P - δ numéricas obtidas para cada expoente e JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diferentes valores de L_0 .

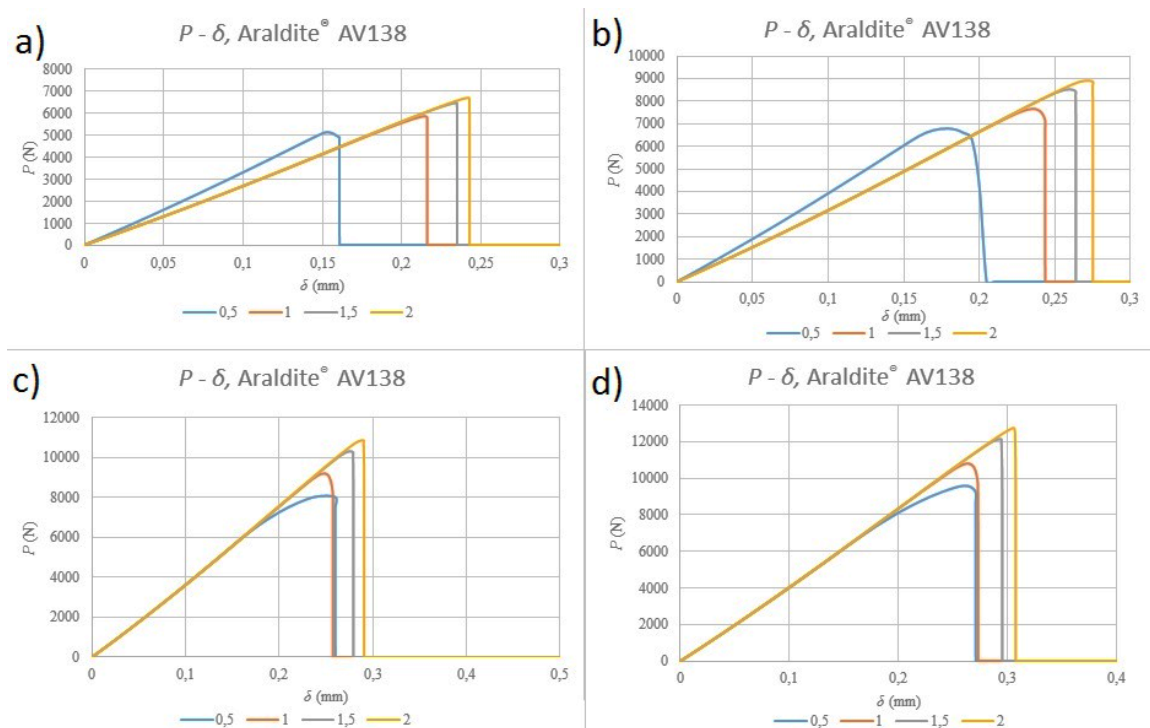


Figura 103- Curvas P - δ de uma JSS com adesivo Araldite® AV138 para a) $L_0=12,5$ mm; b) $L_0=25$ mm; c) $L_0=37,5$ mm; d) $L_0=50$ mm

Na Figura 103 observa-se uma repetibilidade de curvas razoável entre as curvas P - δ representadas na Figura 103 a) e b) e entre as curvas P - δ representadas na Figura 103 c) e d).

e d). Em todos os casos verifica-se uma queda abrupta da força após haver rotura das JSS. Nas Figura 103 a) e b) verifica-se um aumento da força máxima e do deslocamento correspondente a $P_{m\acute{a}x}$ à medida que se aumenta o expoente de 0,5 até 2. Em relação às curvas P - δ representadas nas Figura 103 c) e d) verifica-se que o deslocamento para $P_{m\acute{a}x}$ correspondente às curvas com expoente igual a 0,5 é igual ao deslocamento para expoente igual a 1. No entanto, neste caso, o $P_{m\acute{a}x}$ é superior para a curva P - δ com expoente igual a 1. Na globalidade, é possível concluir que com o aumento do expoente, $P_{m\acute{a}x}$ também aumenta.

Na Tabela 30 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138, com os quatro valores de L_o e expoentes citados anteriormente.

Tabela 30 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] em função de L_o para JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138

L_o [mm]	12,5	25	37,5	50
Expoente				
0,5	5154,0	6761,6	8028,2	9624,4
1	5904,5	7667,5	9196,4	10808,5
1,5	6488,4	8527,5	10299,6	12111,2
2	6718,9	8926,5	10832,1	12745,6

Através da Tabela 30 é possível verificar que $P_{m\acute{a}x}$ aumentou com o incremento de L_o e também com o incremento do expoente utilizado no critério energético de propagação de dano. No entanto, o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ à medida que se incrementa o expoente relativo ao critério energético de propagação de dano é menor do que o aumento verificado com o incremento de L_o . O maior valor de $P_{m\acute{a}x}$ ocorre para a JSS com $L_o=50$ mm e para o expoente 2, enquanto o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$ ocorre para a JSS com $L_o=12,5$ mm e para o expoente 0,5.

Na Figura 104 estão representadas as curvas P - δ obtidas através de métodos numéricos para as JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diferentes valores de L_o . Nas Figura 104 b) e c) é possível verificar alguma repetibilidade e um aumento progressivo de $P_{m\acute{a}x}$ à medida que o expoente do critério energético de propagação de dano é incrementado. Para $L_o=12,5$ mm é possível verificar que o $P_{m\acute{a}x}$ obtido para os diferentes expoentes foi praticamente constante. No que diz respeito às JSS com $L_o=50$ mm verifica-se que para os expoentes de 1/1,5 e 2 o $P_{m\acute{a}x}$ atingido apresenta uma dispersão reduzida. No entanto, para o expoente de 0,5 o $P_{m\acute{a}x}$ foi muito menor, bem como o $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$.

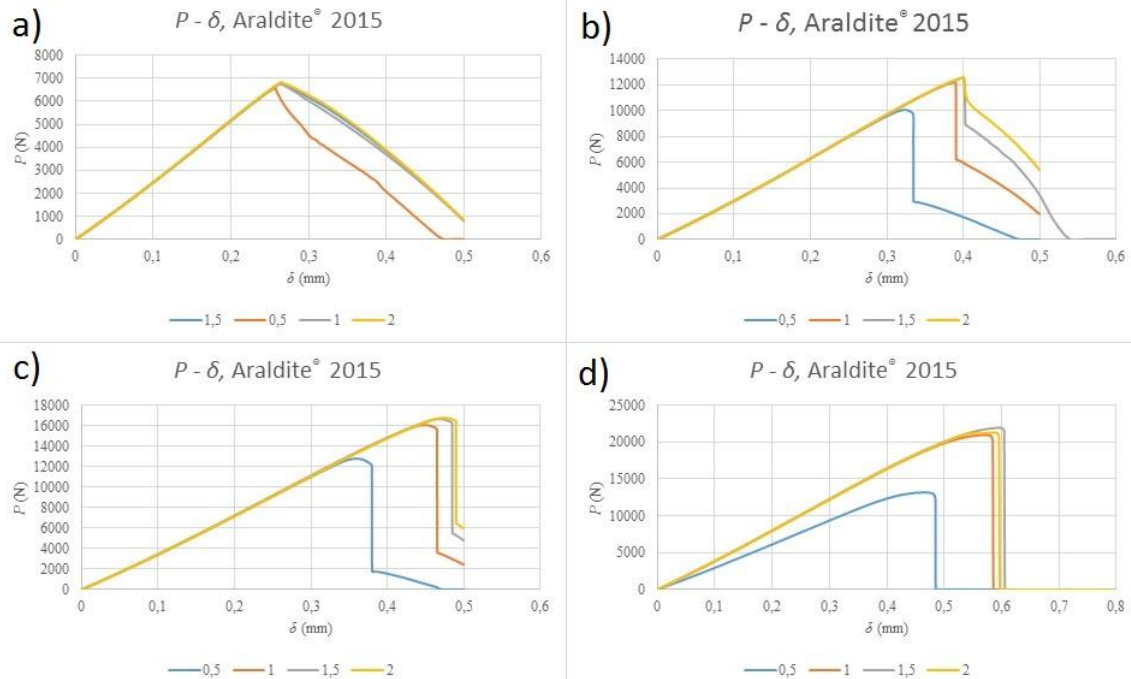


Figura 104- Curvas $P-\delta$ de uma JSS com adesivo Araldite® 2015 para a) $L_0=12,5$ mm; b) $L_0=25$ mm; c) $L_0=37,5$ mm; d) $L_0=50$ mm

Na Tabela 31 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as JSS coladas com o adesivo Araldite® 2015, com os quatro valores de L_0 e os expoentes citados anteriormente.

Tabela 31 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] em função de L_0 para JSS coladas com o adesivo Araldite® 2015

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Expoente				
0,5	6552,9	10072,4	12835,0	17211,6
1	6775,3	12175,4	16024,7	21009,3
1,5	6806,8	12608,4	16635,7	21924,8
2	6819,3	12567,7	16842,2	21367,1

Tal como verificado para as JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138, constatou-se que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ aumenta com o incremento de L_0 e do expoente relativo ao critério energético de propagação de dano. Para $L_0=12,5$ mm, o aumento que se verificou para o valor de $P_{m\acute{a}x}$ à medida que se incrementa o expoente é bastante menor que o que se verifica para os restantes valores de L_0 . Comparativamente aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ que se obteve para as JSS coladas com Araldite® AV138, as JSS coladas com Araldite® 2015

atingiram um $P_{\text{máx}}$ bastante mais elevado pois este é um adesivo mais dúctil que o Araldite® AV138.

Na Figura 105 estão representadas as curvas P - δ obtidas através de métodos numéricos para as JSS com o adesivo Sikaforce® 7752, e com os diferentes valores de L_0 .

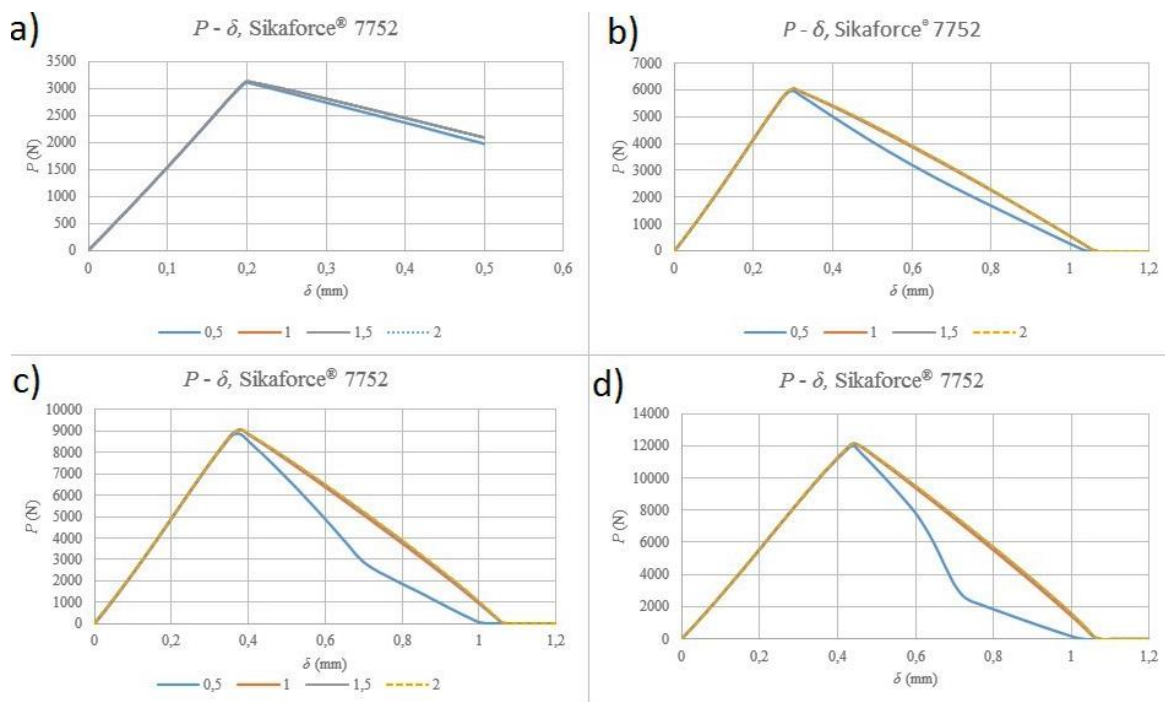


Figura 105- Curvas P - δ de uma JSS com adesivo Sikaforce® 7752 para a) $L_0=12,5$ mm; b) $L_0=25$ mm; c) $L_0=37,5$ mm; d) $L_0=50$ mm

É possível constatar que, para todos os valores de L_0 , existe uma excelente repetibilidade das curvas até ser atingido o $P_{\text{máx}}$. Após a plastificação do adesivo, as juntas comportam-se de forma linear até à rotura. Verifica-se que após ser atingida $P_{\text{máx}}$, para os expoentes de 1/1,5 e 2 a força diminui mais rapidamente em relação às curvas para expoente de 0,5. Pela observação da Figura 105 verifica-se um aumento dos valores de $P_{\text{máx}}$ nas juntas à medida que se incrementa o valor de L_0 . Ao contrário do sucedido para os restantes adesivos, em que o valor de $P_{\text{máx}}$ aumenta com o incremento do expoente, para o adesivo Sikaforce® 7752 o valor de $P_{\text{máx}}$ mantém-se praticamente constante com o incremento do expoente para os diferentes valores de L_0 .

Na Tabela 32 estão presentes os valores de $P_{\text{máx}}$ para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 para os quatro valores de L_0 e para os expoentes citados anteriormente.

Tabela 32 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] em função de L_o para JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752

L_o [mm]	12,5	25	37,5	50
Expoente				
0,5	3119,5	5956,4	8871,7	11998,8
1	3121,9	6033,2	9049,0	12104,8
1,5	3126,5	6053,9	9074,0	12119,1
2	3126,6	6049,0	9082,9	12124,1

Através da observação da Tabela 32 é possível concluir que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as JSS colada com o adesivo Sikaforce® 7752 permanecem constantes apesar do incremento dos expoentes, sendo que a dispersão dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de L_o é muito reduzida. A maior diferença de valores para $P_{m\acute{a}x}$ ocorre para as juntas com $L_o=37,5$ mm e para os expoentes de 0,5 e 1. No entanto, esta diferença registada é bastante pequena.

Na Figura 106 apresenta-se a comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente com os numéricos para os valores de L_o e para os expoentes da Tabela 29 para as JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138.

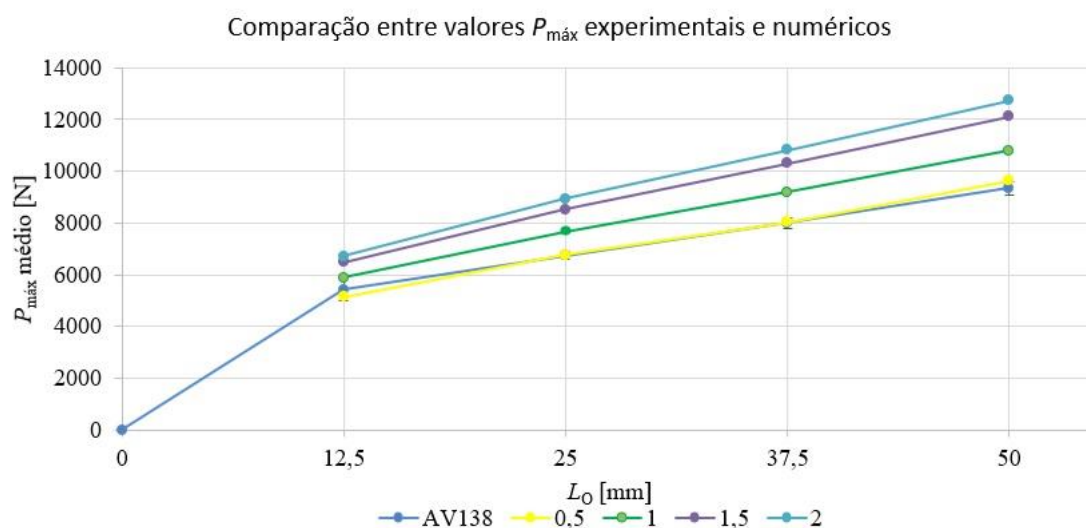


Figura 106- Comparação entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos para as JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138

Através da observação da Figura 106 verifica-se que a curva de valores para $P_{m\acute{a}x}$ que mais se aproxima dos valores obtidos experimentalmente é a curva em que foi utilizado

o expoente de 0,5 para o critério energético de propagação de dano. Considera-se assim validade o envelope de fratura obtido experimentalmente, pois tanto para os valores experimentais como para os numéricos, a curva relativa ao expoente 0,5 é aquela que mais se aproxima, o que representa que o expoente de 0,5 é o critério que melhor representa o comportamento do adesivo. O maior desvio percentual que se obteve para a curva relativa ao expoente de 0,5 foi de -4,94% ($L_0=12,5$ mm). A curva dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ que mais se distanciou dos resultados obtidos experimentalmente foi a curva para o expoente de 2, o que se reflete no elevado desvio percentual apresentado, que foi de 36,43%.

O gráfico presente Figura 107 reflete a comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente com os numéricos para os valores de L_0 e para os expoentes da Tabela 29 para as JSS coladas com o adesivo Araldite® 2015.

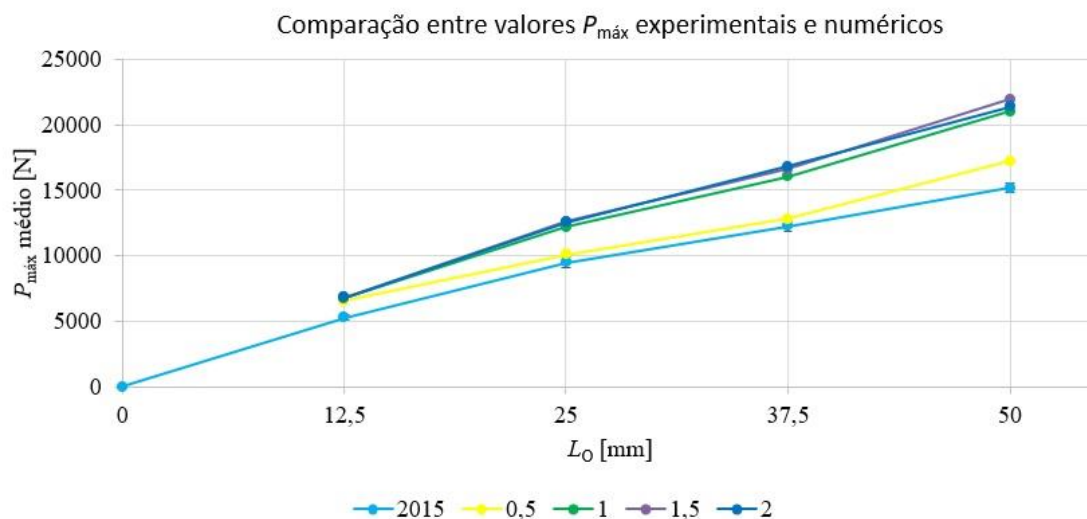


Figura 107- Comparação entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos para as JSS coladas com o adesivo Araldite® 2015

À semelhança do que se conclui para as JSS coladas com o adesivo Araldite® AV138, também para as JSS coladas com o adesivo Araldite® 2015 se verifica que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos com o expoente de 0,5 são os que mais se assemelham com os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente. Valida-se assim o envelope de fratura obtido experimentalmente em que se considera o expoente de 0,5 como o parâmetro da lei de propagação de dano que melhor se adequa para a análise e previsão do comportamento deste adesivo. Para a curva com expoente de 0,5 obteve-se um máximo desvio percentual de 23,9% ($L_0=12,5$ mm). A utilização dos restantes expoentes no critério energético de propagação de dano deu origem a valores de $P_{m\acute{a}x}$ bastante distantes dos obtidos experimentalmente.

Na Figura 108 apresenta-se a comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente com os numéricos para os valores de L_0 , para os expoentes da Tabela 29 e para as JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752.

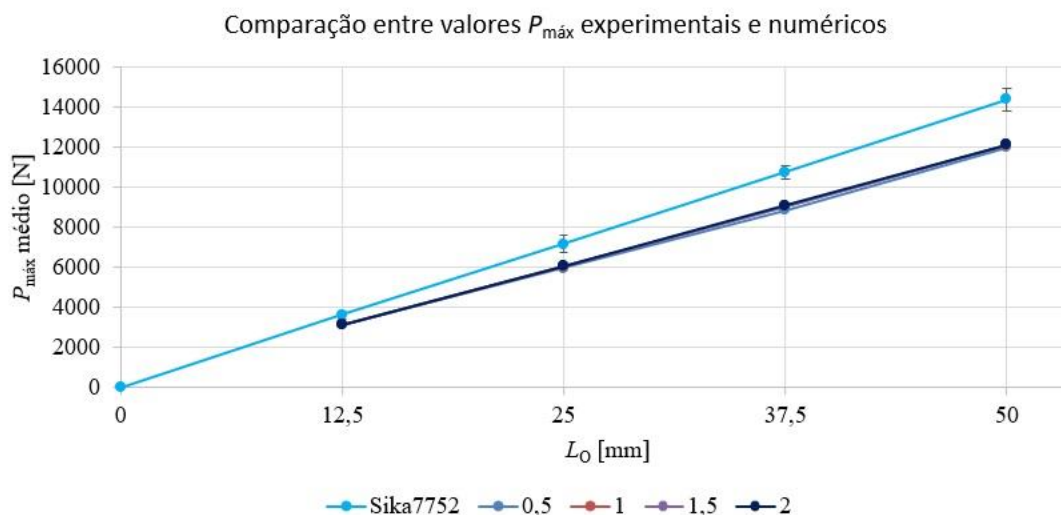


Figura 108- Comparação entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos para as JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752

Através da análise do gráfico verifica-se que comparativamente aos restantes adesivos, para as juntas JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 houve uma menor dispersão nos valores de $P_{m\acute{a}x}$. Apesar da dispersão ser reduzida para os quatro expoentes utilizados para o critério energético de propagação de dano, é possível concluir que são os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos com o expoente de 2 que mais se assemelham aos valores obtidos experimentalmente. O maior desvio percentual encontrado com o expoente 2 foi de -15,7% ($L_0=50$ mm). Constata-se que para o referido adesivo o expoente que melhor se adequa para o critério energético de propagação de dano é o 2. Valida-se assim o envelope de fratura obtido experimentalmente para o Sikaforce® 7752.

3.3.10.2 Juntas de sobreposição dupla

Na Figura 109 estão representadas as curvas $P-\delta$ obtidas através do método numérico para as JSD com o adesivo Araldite® AV138, para diferentes valores de L_0 e diferentes expoentes para o critério energético de propagação de dano (definidos na Tabela 29).

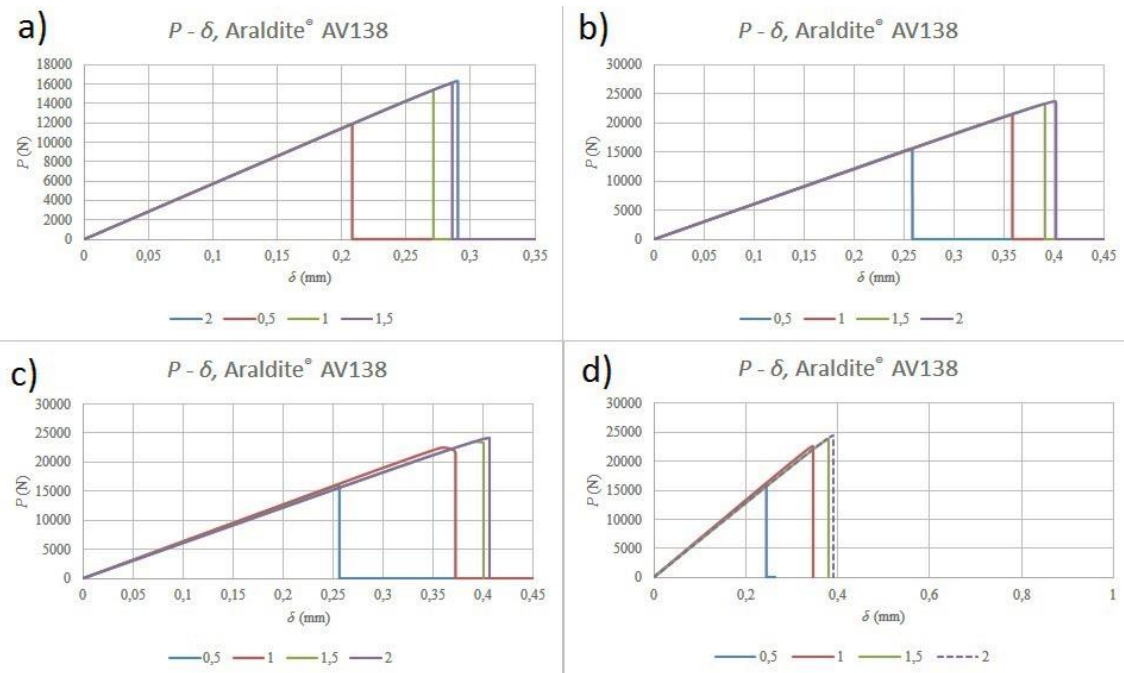


Figura 109- Curvas $P-\delta$ de uma JSD com adesivo Araldite® AV138 para a) $L_0=12,5$ mm; b) $L_0=25$ mm; c) $L_0=37,5$ mm; d) $L_0=50$ mm

Através da análise da Figura 109 verifica-se uma excelente repetibilidade das curvas $P-\delta$. Com o incremento do expoente verifica-se um aumento do valor de $P_{m\acute{a}x}$. O maior aumento do valor de $P_{m\acute{a}x}$ ocorre para as JSD entre o expoente de 0,5 e 1. No que diz respeito às curvas $P-\delta$ com o expoente de 1,5 e 2, conclui-se que estas apresentam uma pequena dispersão em relação a $P_{m\acute{a}x}$. Constata-se em todas as JSD uma queda abrupta do valor de P após atingir a rotura.

Na Tabela 33 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015 para os quatro valores de L_0 e para os expoentes definidos na Tabela 29.

Tabela 33 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] em função de L_0 para JSD coladas com o adesivo Araldite® AV138

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Expoente				
0,5	11895,6	15489,2	16030,1	16131,1
1	15314,0	21113,6	22472,0	22618,8
1,5	16061,1	22547,4	23548,0	23740,0
2	16321,2	23188,1	24147,0	24362,6

Tal como referido anteriormente, apesar do valor de $P_{m\acute{a}x}$ aumentar com o incremento do expoente, o maior aumento do valor de $P_{m\acute{a}x}$ ocorre entre as JSD para o expoente de 0,5 e 1. Entre os expoentes de 1/1,5 e 2, o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ é bastante reduzido.

Na Figura 110 estão representadas as curvas P - δ obtidas através do MDC para as JSD com o adesivo Araldite® 2015, diferentes valores de L_0 e diferentes expoentes do critério energético de propagação de dano.

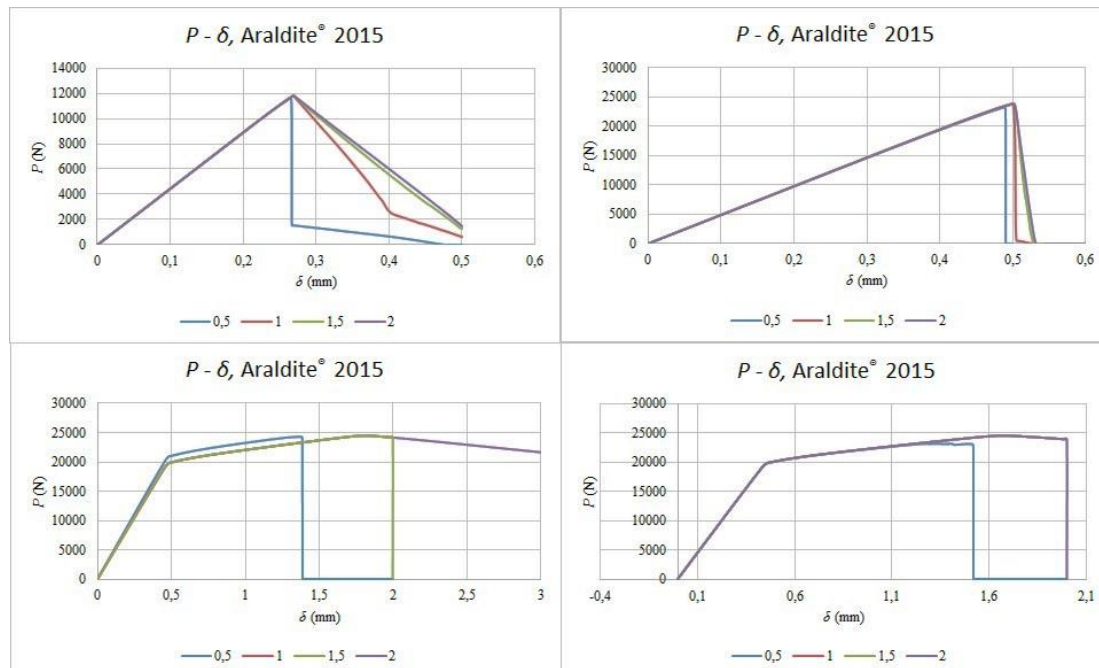


Figura 110- Curvas P - δ de uma JSD com adesivo Araldite® 2015 para a) $L_0=12,5$ mm; b) $L_0=25$ mm; c) $L_0=37,5$ mm; d) $L_0=50$ mm

Na Figura 110 a) apenas para o expoente de 0,5 se verifica uma queda abrupta após atingir $P_{m\acute{a}x}$. Para os restantes expoentes, após se atingir $P_{m\acute{a}x}$, P diminui de uma forma progressiva. No entanto, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é praticamente constante para os quatro expoentes. Na Figura 110 b) verifica-se uma repetibilidade razoável das curvas para todos os expoentes, com um ligeiro aumento do valor de $P_{m\acute{a}x}$ à medida que se incrementa o valor dos expoentes. Em relação às Figura 110 c) e d), o aumento do valor de P até que seja atingido o valor de $P_{m\acute{a}x}$ não ocorre de forma linear, sendo que na segunda fase ocorre um decréscimo no aumento dos valores de P . No entanto, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é praticamente constante à medida que se incrementa o expoente. Apenas para o expoente de 0,5 se verificou uma queda abrupta após ser atingido o valor de $P_{m\acute{a}x}$.

Na Tabela 34 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015 para os quatro valores de L_0 e para os expoentes definidos na Tabela 29.

Tabela 34 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] em função de L_0 para JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Expoente				
0,5	11662,3	23395,7	24376,7	23248,2
1	11826,9	23883,0	24599,8	24600,4
1,5	11851,6	23948,9	24596,7	24597,4
2	11862,9	23974,5	24597,1	24595,7

Como é possível verificar através da Tabela 34, para as JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015 o valor de $P_{m\acute{a}x}$ mantém-se praticamente constante com o incremento do expoente para o critério energético de propagação de dano. No entanto, tal como se verifica para os restantes adesivos, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ aumenta com o incremento de L_0 .

Na Figura 111 estão representadas as curvas P - δ obtidas através do MDC para as JSD coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, para os diferentes valores de L_0 e expoentes.

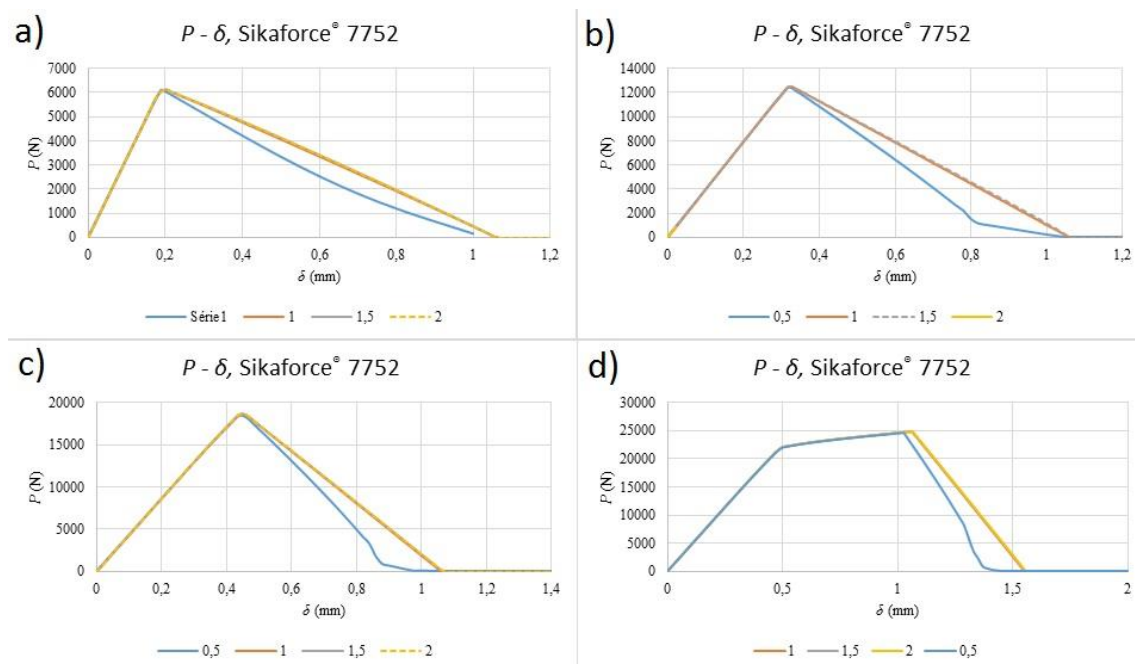


Figura 111- Curvas P - δ de uma JSD com adesivo Sikaforce® 7752 para a) $L_0=12,5$ mm; b) $L_0=25$ mm; c) $L_0=37,5$ mm; d) $L_0=50$ mm

Tal como se verificou para as JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015, também para as JSD coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 o valor de $P_{m\acute{a}x}$ permanece praticamente constante com o incremento do expoente no critério energético de propagação de dano. É possível observar uma boa repetibilidade nas curvas da Figura 111 a), b) e c), e em todas estas se verifica que, para o expoente de 0,5, após atingir $P_{m\acute{a}x}$ a diminuição de P ocorre mais rapidamente do que para os restantes expoentes. Na Figura 111 d) o crescimento de P até que se atinja $P_{m\acute{a}x}$ não ocorre de uma forma linear, pois numa segunda fase da curva o aumento de P ocorre de forma mais lenta. No entanto, apesar desta particularidade, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é praticamente o mesmo para todos os expoentes.

Na Tabela 35 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as JSD coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, os quatro valores de L_0 e os expoentes definidos na Tabela 29.

Tabela 35 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] em função de L_0 para JSD coladas com o adesivo Sikaforce® 7752

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Expoente				
0,5	6130,6	12455,9	18483,1	24709,2
1	6109,9	12465,9	18503,8	24868,1
1,5	6115,22	12467,1	18506,0	24856,3
2	6116,7	12467,4	18506,6	24873,1

Como também foi possível observar pela Figura 111, e tal como aconteceu para as JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ permanece constante apesar do incremento do expoente no critério energético de propagação de dano.

Na Figura 112 apresenta-se a comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente com os numéricos para as JSD coladas com o adesivo Araldite® AV138 para os quatro valores de L_0 e para os expoentes da Tabela 29. Com a análise da Figura 112 é possível concluir que o expoente mais indicado para o critério energético de propagação de dano na previsão de resistência das JSD coladas com adesivo Araldite® AV138 é 0,5, pois os valores correspondentes de $P_{m\acute{a}x}$ para os vários valores de L_0 são os que mais se aproximam dos valores obtidos experimentalmente. O maior desvio percentual para os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente para o expoente de 0,5 foi de -5,00% ($L_0=50$ mm). A dispersão para os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos com os restantes expoentes é reduzida entre estes, mas bastante elevada em relação aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente. Valida-se assim o envelope de fratura obtido experimentalmente, em que se considera o expoente de 0,5 como o parâmetro da lei

de propagação de dano que melhor se adequa para a análise e previsão do comportamento deste adesivo.

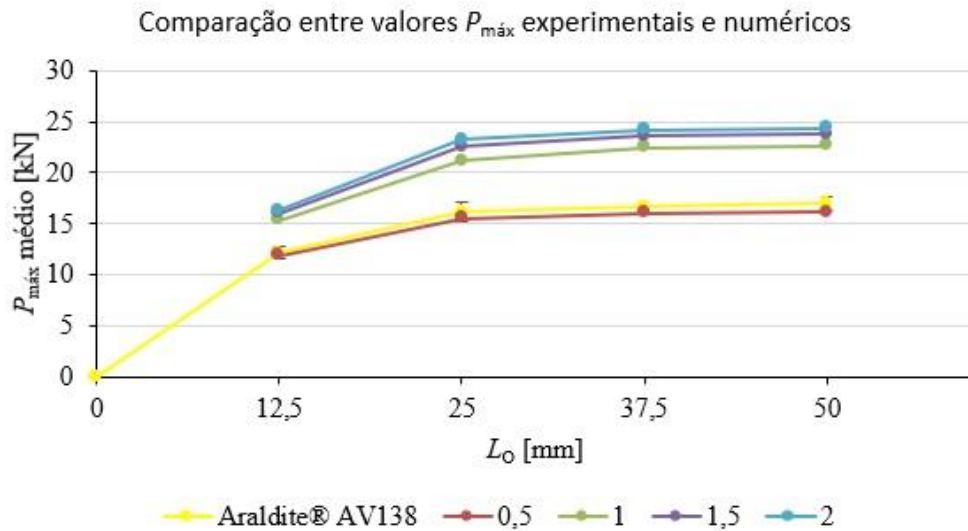


Figura 112- Comparação entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos para as JSD coladas com o adesivo Araldite® AV138

O gráfico da Figura 113 representa a comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente com os numéricos, para as JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015 para os quatro expoentes definidos anteriormente.

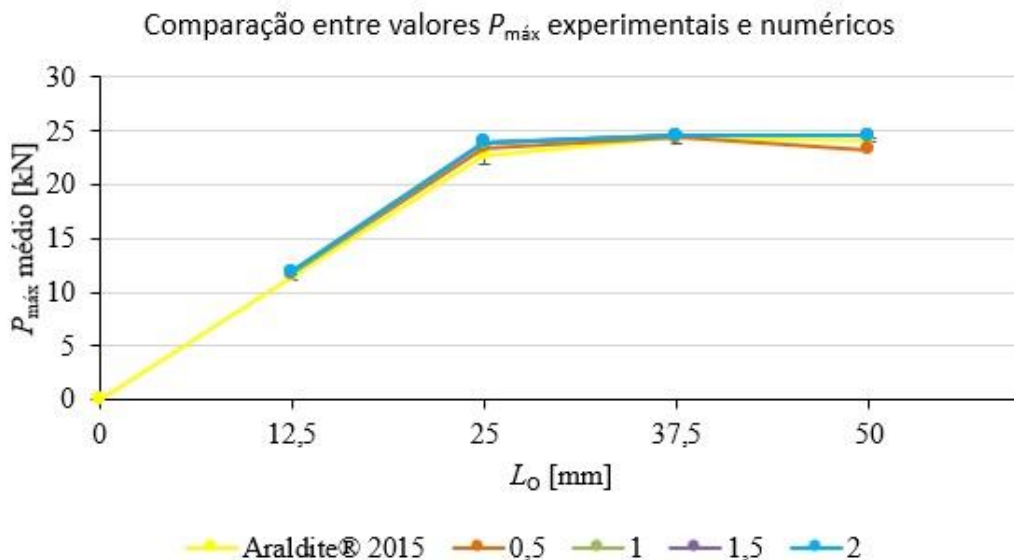


Figura 113- Comparação entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos para as JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015

Como se pode observar na Figura 113, a dispersão para as curvas relativas aos quatro expoentes é bastante reduzida. No entanto, a curva dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtida numericamente com o expoente de 0,5 é a que mais se aproxima da curva relativa aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais. O maior desvio percentual registado para os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos com o expoente de 0,5 foi de -3,55% ($L_0=50$ mm). Considera-se assim validado o envelope de fratura obtido experimentalmente pois, tanto para os valores experimentais como para os numéricos, a curva relativa ao expoente 0,5 é aquela que mais se aproxima, o que representa que o expoente de 0,5 corresponde ao critério que melhor representa o comportamento do adesivo.

Na Figura 114 apresenta-se a comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numéricos para as JSD coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, os quatro valores de L_0 e os expoentes da Tabela 29.

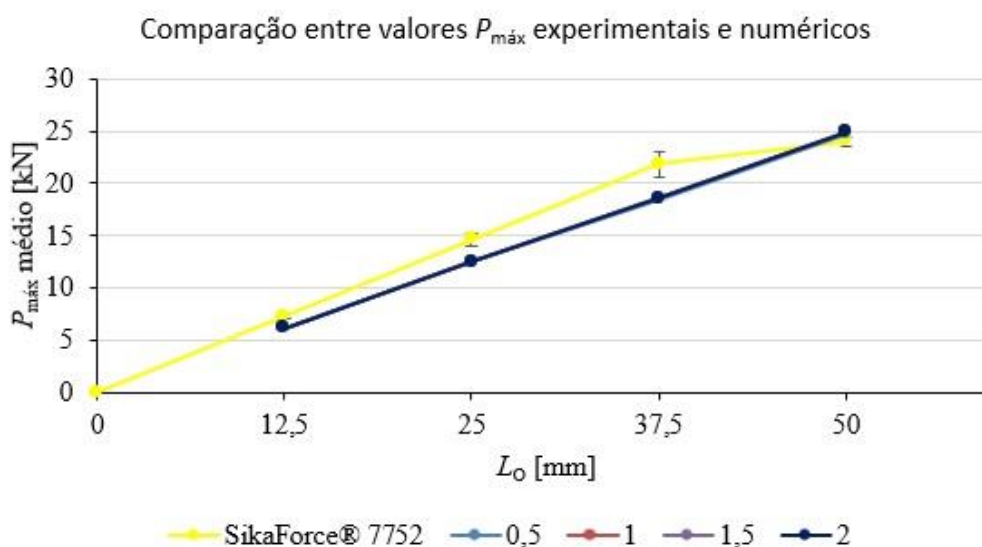


Figura 114- Comparação entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos para as JSD coladas com o adesivo Sikaforce® 7752

Através da análise da Figura 114 verifica-se que a dispersão dos valores obtidos numericamente para as JSD coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 foi ainda menor que a obtida para as JSD coladas com o adesivo Araldite® 2015. No entanto, apesar da dispersão mínima, é possível concluir que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ que mais se aproximam dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente são os obtidos com expoente de 2. O maior desvio percentual dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente comparativamente aos experimentais é de -15,94% ($L_0=12,5$ mm). Constata-se que para o referido adesivo o expoente que melhor se adequa para o critério energético de propagação de dano é o 2. Valida-se assim o envelope de fratura obtido experimentalmente para o Sikaforce® 7752.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi apresentado um trabalho numérico que tinha como objetivo a validação de envelopes de fratura, obtidos experimentalmente através de ensaios SLB, em ensaios de JSS e JSD para três diferentes adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752), com substratos de alumínio e para quatro valores de L_0 . Esta validação tinha como objetivo verificar qual o expoente do critério energético de propagação de dano que melhor se adequava a cada adesivo e se este coincidia com o obtido experimentalmente. Os três adesivos considerados variam desde um comportamento rígido e frágil (Araldite® AV138), passando por um adesivo com menor resistência mas ductilidade moderada (Araldite® 2015) até um adesivo de alta resistência e ductilidade (Sikaforce® 7752)

Inicialmente, através do *software* ABAQUS® desenharam-se 16 JSS e 16 JSD, quatro para cada valor de L_0 , cada uma relativa a cada expoente do critério energético de propagação de dano. Após a realização dos ensaios numéricos para cada junta no ABAQUS®, retiraram-se as curvas $P-\delta$, onde foi possível observar o comportamento de cada junta aquando da sollicitação. Através da análise das curvas $P-\delta$ foi possível verificar que, para as juntas coladas com adesivo Araldite® AV138, tanto para as JSS como para as JSD, o incremento do valor do expoente desde 0,5 até 2 faz com que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ também aumente de uma forma progressiva. Quanto às juntas coladas com Araldite® 2015 para as JSS com $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm verifica-se, tal como para o Araldite® AV138, um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ à medida que se incrementa o expoente relativo ao critério energético. Na JSS com $L_0=12,5$ mm e nas JSD coladas com este adesivo, à medida que se incrementa o expoente, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ mantém-se praticamente constante. Relativamente ao adesivo Sikaforce® 7752 verifica-se que, tanto para as JSS como para as JSD, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ permanece praticamente constante apesar do incremento do expoente.

Após obter as curvas $P-\delta$ verificou-se, com os valores obtidos experimentalmente, para que expoente utilizado é que a curva relativa aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais se assemelhava. No adesivo Araldite® AV138 conclui-se que o expoente de 0,5 era o que mais se adequa ao adesivo. Para o adesivo Araldite® 2015 o expoente que mais se adequa é o 0,5. Por outro lado, para o adesivo Sikaforce® 7752 o expoente que mais se adequa é o 2. Foi possível observar que para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 a alteração do expoente relativo ao critério energético não suscita grandes alterações no valor de $P_{m\acute{a}x}$. No entanto, para juntas coladas com os restantes adesivos, a alteração do expoente relativo ao critério energético de propagação de dano tem bastante influência no valor de $P_{m\acute{a}x}$. Como estes expoentes foram os obtidos inicialmente nos ensaios SLB,

considera-se que estes estão validados para a previsão subsequente de juntas adesivas com os adesivos testados.

Através desta dissertação torna-se possível, por intermédio de Modelos de Dano Coesivo, estudar a propagação de dano de uma forma mais precisa pois é utilizado um critério energético adequado para cada adesivo.

Como sugestões para trabalhos futuros, sugere-se utilizar outros ensaios de forma a comparar com os resultados obtidos para o ensaio SLB e realizar os ensaios numéricos para o adesivo Sikaforce® 7752 utilizando uma lei trapezoidal e comparar com os resultados obtidos através da lei triangular.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
2. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015. **57**: p. 125-132.
3. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Tese de Doutoramento*, in *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto*. 2007.
4. Soares, A.P.O.A.L., *Determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais em modo misto pelo ensaio Single-Leg Bending*. 2015, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
5. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, , *Juntas Adesivas Estruturais* ed. P. Publindústria. 2007.
6. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*, ed. ISBN. Vol. 1ª Edição. Estados Unidos da América: McGraw-Hill. 2000.
7. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fractura em tracção de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
8. Landrock, A.H. and S. Ebnesajjad, *Adhesives technology handbook*. 2008: William Andrew.
9. Panigrahi SK, P.B., *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007: p. 26:183-201.
10. Raul D.S.G. Campilho, M.D.B., Arnaldo M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, A.M.P. Jesus, *Strength prediction of single and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2011. **Vol. 31**, , p. **363-372**.
11. da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
12. O., V., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschquerschnitten*, ed. Luftfahrtforschung. Vol. 15:41-47. 1938.
13. Adams RD, P.N., *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *Journal of Strain Analysis*, 1974: p. 9:185-196.
14. Harris JA, A.R., *Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1984: p. 4:65-78.

15. Sosa JLC, K.N., *Delamination modeling of GLARE using the extended finite element method*, ed. C.S.a. Technology. 2012. 72:788-791.
16. Goland M, R.E., *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944: p. 66:17-27.
17. Kinloch, A.J., *Adhesion and adhesives: science and technology - 1ª edição*. London: Chapman & Hall, ed. ISBN. Vol. 978-90-481-4003-9. 1987.
18. FE., P., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials 1998: p. 11:272-287.
19. ML., W., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America. 1959.
20. Gl., B., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23:622-636**.
21. Feraren, P.A.H.M.J., *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*, ed. E.F. Mechanics. Vol. 71. 2004.
22. Ji G, O.Z., Li G, Ibekwe S, Pang SS., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47:2445-2458**.
23. Duan K, H.X., Mai YW., *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology 2004. **18:39-53**.
24. Liljedahl CDM, C.A., Wahab MA, Ashcroft IA., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141:147-161**.
25. S., M., *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*. 2008, New Jersey: Blackwell Publishing.
26. Belytschko T, B.T., *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal of Fracture Mechanics, 1999. **45:601-620**.
27. Moës N, D.J., Belytschko T., *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46:131-150**.
28. Lai, Y., Dwayne Rakestraw, and D.A. Dillard, *The cracked lap shear specimen revisited - a closed solution*. International Journal of Solids and Structures, 1996. **33(12): p. 817-820**.
29. Tsai, M.Y.a.J.M., *An evaluation of analytical and numerical solutions to the single-lap joint*. International Journal of Solids and Structures, 1994. **31(18): p. 2537-2563**.
30. Feraren, P.J.H., *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Vol. 71:2125-2142. 2004: Engineering Fracture Mechanics.
31. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1960. **Vol. 8(100-104)**.
32. B. Zhao, Z.-H.L., Y.-N. Lu., *Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints – Variational method*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014. **49: p. 115-126**.

33. Kafkalidis, M.S.e.T., M. D., *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures 2002. **39(17): 4367-4383**.
34. R.D.S.G. Campilho, L.F.M.d.S., *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*, ed. ISBN. Vol. 1ª edição. 2012.
35. T. Pardoen, T.F., C.M. Landis, F. Delannay, *Constraint effects in adhesive joint fracture*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005. **Vol. 53**: p. p. 1951-1983.
36. R.D.S.G. Campilho, A.M.G.P., M.D. Banea, R.F. Silva, L.F.M. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**.
37. D. Xie, A.M.W., *Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis*, ed. E.F. Mechanics. Vol. Vol. 73. 2006.
38. Campilho, R.D.S.G., de Moura, M. F. S. F., Pinto, A. M. G., Morais, J. J. L. e Domingues, J. J. M. S., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*, ed. C.P.B. Engineering. 2009.
39. Alfano, G.a.M.A.C., *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**.
40. Allix, O.e.C., A. , *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture 1996. **77(2)(111-140)**.
41. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15(5)**.
42. Chandra, N., H. Li, C. Shet, and H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39(10)**.
43. Fernández, M.V., M.F.S.F. de Moura, L.F.M. da Silva, and A.T. Marques, *Mixed-mode I + II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-Leg Bending test*, ed. C.P.A.A.S.a. Manufacturing. Vol. 44: p. 63-69. 2013.
44. Pandya, K.C.a.J.G.W., *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*, ed. P.E. Science. Vol. 40(8). 2000.
45. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*, ed. E. Mechanics. Vol. 32(4): 296-303. 1992.
46. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45(5)**: p. 1497-1512.
47. Andersson, T.a.U.S., *The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41(2)**: p. p. 413-434.
48. R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F.d.M., J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007.

49. Flinn, B.D., Lo, C. S., Zok, F. W. e Evans, A. G., *Fracture Resistance Characteristics of a Metal-Toughened Ceramic*. Journal of the American Ceramic Society 1993. **76(2): 369-375**.
50. Mello, A.W.e.L., K. M., *The Effect of Self-Assembled Monolayers on Interfacial Fracture*. Journal of Applied Mechanics 2004. **73(5): 860-870**.
51. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, ed. P.a.E.S. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical. Vol. 221(582-593). 1921. 163-198.
52. Branco, C.A.G.d.M., A.A. Fernandes, and P.M.S.T. de Castro, *Fadiga de estruturas soldadas*, ed. F.C. Gulbenkian. 1999, Lisboa.
53. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46(6)**: p. 1589-1595.
54. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007, Porto: Publindustria.
55. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*, ed. C.S.a. Technology. Vol. 68(10–11): p. 2224-2230. 2008.
56. Chaves, F.J.P., *Fracture mechanics applied to the design of adhesively bonded joints*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2013, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto: Porto.
57. D3433-99, A., *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives A.D.-i.B.M. Joints*, Editor. 2012.
58. Carlsson, L.A., J.W. Gillespie, and R.B. Pipes, *On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing*. Journal of Composite Materials, 1986. **20(6): p. 594-604**.
59. Raul D.S.G. Campilho, M.D.B., J.A.B.P. Neto, L.F.M. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **88**: p. 513-533.
60. J.A.B.P. Neto, R.D.S.G.C., L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2012. **37**.
61. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico*, in *Instituto Superior de Engenharia do Porto*. 2014: Porto.
62. T.A.B. Fernandes, R.D.S.G.C., M.D. Banea, L.F.M. Silva, *Adhesive selection for single lap bonded joints: experimentation and advanced techniques for strength prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**.
63. Santos, M.A.S., *Estudo numérico da fratura em modo misto de juntas adesivas pelo ensaio single-leg bending*, in *Instituto Superior de Engenharia do Porto*. 2016: Porto.
64. Troughton, M.J., *Handbook of plastics joining: practical guide*. 2008: United States of America: William Andrew Inc.
65. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*, in *Instituto Superior de Engenharia do Porto*. 2015.

66. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*, in Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2016: Porto.
67. Raul D.S.G. Campilho, M.F.S.F.d.M., J. J. M. S. Domingues, *Modelling single and double lap repairs on composite materials*, ed. C.S.a. Technology. Vol. Vol. 65. 2005. p. 1948-1958.
68. J. Radice, J.V., *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structure: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*, ed. C.S.a. Technology. Vol. 66. 2006. 2528-2547.
69. A.A. Taib, R.B., S. Achiou, H. Boukehili, *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2006. **26**: p. 237-248.
70. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29:195–205**.
71. P. Reis, F.A., J.A.M. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single lap adhesive joints*, ed. C. Structures. Vol. 67. 2005. 125-133.
72. W. Jiang, P.Q., *An improved four-parameter model with consideration of Poisson's effect on stress analysis of adhesive joints*, ed. E. Structures. Vol. 88. 2015. 203-215.
73. R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F.d.M., J.J.M.S. Domingues, J.J.L. Morais *Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008. **22**: p. 1565-1591.
74. J. de Castro, H.K., *Ductile double-lap joints from brittle GFRP laminates and ductile adhesives, Part I: Experimental investigation. Composites Part B: Engineering*. Vol. 39. 2008. 271-281.
75. M. Shishesaz, N.B., *Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013. **27**: p. 1197-1225.
76. Adams, R.D., *Adhesive bonding - Science, technology and applications*, ed. W.P.L. 559. 2005.
77. L.D.R. Grant, R.D.A., L.F.M. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**: p. 405-413.
78. L.F.M. Silva, R.J.C.C., G.W. Critchlow, M.A.V. Figueiredo, K. Brown, *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. Internacional Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**: p. 621-632.
79. R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F.d.M., J.J.M.S. Domingues, J.J.L. Morais, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*, ed. C.S.a. Technology. Vol. 65. 2005. 1948-1958.
80. M. Davis, D.B., *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1999. **19**: p. 91-105.

81. T. Vallée, J.R.C., T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations*, ed. C.S.a. Technology. Vol. 66. 2006. 1903-1914.
82. TAB., F., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica*, in Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2014.