



Comparação experimental e numérica por modelos de dano coesivo de diversos tipos de juntas adesivas

NÉLSON GUSTAVO DA COSTA BARBOSA

novembro de 2017

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO DE DIVERSOS TIPOS DE JUNTAS ADESIVAS

Nelson Gustavo da Costa Barbosa

1080858

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO DE DIVERSOS TIPOS DE JUNTA

Nelson Gustavo da Costa Barbosa

1080858

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Mestre Raul Domingues Ferreira Moreira e do Doutor Francisco José Gomes da Silva.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Jorge Dores de Castro

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Mestre Raul Domingues Ferreira Moreira

Investigador, FEUP

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor José Luís Soares Esteves

Professor Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer em primeiro lugar à minha família (mãe, pai, irmã e à minha namorada) por todo o apoio e motivação concedidos ao longo da realização deste trabalho.

Quero também fazer um agradecimento especial ao meu orientador, o Doutor Raul Campilho, pela oportunidade que concedeu para realizar este trabalho, assim como o precioso suporte prestado, sem o qual não teria sido possível a sua conclusão. Agradeço também aos meus coorientadores, o Mestre Raul Moreira e o Doutor Francisco Silva, pelo apoio e suporte concedidos.

PALAVRAS CHAVE

Junta adesiva, Adesivo estrutural, Junta de sobreposição simples, Junta de sobreposição dupla, Junta em degrau, Junta de chanfro interior, Modelo de dano coesivo.

RESUMO

Existem variados factores que condicionam o comportamento de uma junta adesiva, e existe também a necessidade de avaliar alguns desses principais factores, nomeadamente, o tipo de adesivo (frágil, dúctil ou um compromisso entre as duas propriedades) e geometria da junta, em função comprimento de sobreposição (L_0). Os principais objectivos deste trabalho é efectuar um estudo comparativo envolvendo diversas geometrias de junta, usando vários adesivos com diferentes características, e verificar qual o tipo de adesivo que mais se adequa a determinada geometria de junta. Para tal, foram escolhidas as geometrias de junta de sobreposição simples (JSS), junta de sobreposição dupla (JSD), junta em degrau e junta de chanfro interior, a ser testadas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752. Para concretizar estes objectivos, é efectuada uma análise experimental, na qual são testadas as diferentes configurações para os vários adesivos é realizada a respectiva análise dos resultados obtidos. Estes resultados experimentais, são depois comparados com resultados numéricos obtidos utilizando o *software* ABAQUS®, recorrendo a um módulo integrado de MDC (Modelos de dano coesivo). Dos resultados numéricos obtidos é realizado um estudo das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) na camada adesiva. No estudo por MDC, é também avaliada a variável de dano SDEG (*Stiffness degradation*) em função de L_0 , que permite observar a degradação da camada adesiva desde o inicio de aplicação da carga até à rotura completa, apresentando-se depois comentários dos resultados obtidos. Com este trabalho, concluiu-se que a configuração óptima de junta depende de forma significativa do tipo de adesivo que está a ser utilizado, de tal forma que adesivos menos resistentes e dúcteis, são mais adequados para geometrias de junta que apresentem grandes variações de tensão, enquanto adesivos mais resistentes, mas frágeis, são recomendados para geometrias de junta com tensões mais uniformes.

KEYWORDS

Adhesive joint, Structural adhesive, Single-lap joint, Double-lap joint, Stepped joint, Scarf joint, Cohesive zone model.

ABSTRACT

There are several factors that influence the behaviour of an adhesive joint, and there is a need to evaluate some of these main factors, namely the type of adhesive (brittle, ductile or a compromise between the two properties) and joint geometry as a function of the overlap length (L_0). The main objectives of this work are to carry out a comparative study involving several joint geometries using various adhesives with different characteristics and to check which type of adhesive is most suitable for a particular joint geometry. For this purpose, single-lap joints (SLJ), double-lap joints (DLJ), stepped joints and scarf joints were chosen for testing with Araldite® AV138, Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752. In order to achieve these objectives, an experimental analysis is carried out, in which the different configurations for the various adhesives are tested and the respective analysis of the results is carried out. These experimental results are then compared with numerical results obtained using ABAQUS® software with an integrated cohesive zone modelling (CZM) module. From the obtained numerical results, a study of peel (σ_y) and shear (τ_{xy}) stresses in the adhesive layer is carried out. In the CZM study the SDEG (Stiffness degradation) damage variable as a function of L_0 is also analysed, which allows to observe the degradation of the adhesive layer from the beginning of load application until complete failure, with further discussion of the results. With this work, it was concluded that the optimal joint configuration depends significantly on the type of adhesive being used, such that less resistant and ductile adhesives are more suitable for joint geometries that exhibit large stress variations, while stronger but more brittle adhesives are recommended for joint geometries with more uniform stresses.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEFE	Método de Elementos Finitos Extendido
MFLE	Mecânica da Fractura Linear Elástica
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
TFFV	técnica do fecho da fenda virtual

Lista de Símbolos

E	Módulo de Young
G	Módulo de Elasticidade ao Corte, Taxa de libertação de energia de deformação

G_c	Taxa crítica de libertação de energia de deformação
G_n^c	Taxa crítica de libertação de energia de deformação à tracção
L_0	Comprimento de sobreposição
P	Carga/força
$P_{máx}$	Carga/Força máxima
t_n^0	Resistência coesiva à tracção
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
δ	Deslocamento
ε	Deformação
σ	Tensão
σ_y	Tensão de arrancamento
δ_n^0	Deslocamento relativo de carga máxima à tracção
δ_s^0	Deslocamento relativo de carga máxima ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONSTITUINTES DE UMA JUNTA ADESIVA (ADAPTADO DE [2]).....	6
FIGURA 2 – ÁREAS DE LIGAÇÕES ADESIVAS NO AIRBUS A380 [6].....	9
FIGURA 3 - DIFERENTES APLICAÇÕES DE LIGAÇÕES ADESIVAS NUM AUTOMÓVEL [7]	9
FIGURA 4 - TIPOS DE JUNTA E ESFORÇOS ASSOCIADOS, UTILIZADAS NUM BARCO DE RECREIO [7]	10
FIGURA 5 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS VÁRIOS ESFORÇOS DE UMA LIGAÇÃO ADESIVA [9].....	11
FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO NUMA JUNTA TOPO A TOPO SOB CARREGAMENTO AXIAL E NÃO AXIAL [3].....	12
FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO NUMA JUNTA SUJEITA A TENSÃO DE CORTE E ARRANCAMENTO/CLIVAGEM [3].....	13
FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO NUM ADESIVO FRÁGIL E TENAZ [3]	13
FIGURA 9 – TIPOS DE ROTURA NUMA JSS [11].....	14
FIGURA 10 - TIPOS DE CONFIGURAÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS [3].....	15
FIGURA 11 - CURVAS DE TENSÃO-DESLOCAMENTO PARA DIFERENTES ADERENTES EM AÇO [45].....	24
FIGURA 12 - JSS COM ADERENTES DISSIMILARES (ALUMÍNIO E COMPÓSITO DE CARBONO)	25
FIGURA 13 - AVALIAÇÃO DA CARGA MÁXIMA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO: RESULTADOS EXPERIMENTAIS VS. ANALÍTICOS, PARA OS ADESIVOS ARALDITE® AV138 (A), ARALDITE® 2015 (B) E SIKAFORCE® 7888 (C) [47].....	27
FIGURA 14 - VALORES EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS (MEFE) DA FORÇA MÁXIMA (P_M), EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO (L_0) [48]	28
FIGURA 15 - FORÇA MÁXIMA (P_M) EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS TRÊS ADESIVOS: VALORES EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS PARA JSS (A) E JSD (B) [49]	29
FIGURA 16 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS PARA O INÍCIO DE MICROFISSURAS (F_{IW}) E ROTURA TOTAL (F_U), PARA JUNTA DE CHANFRO INTERIOR (A) E CHANFRO INTERIOR DUPLA (B) [50]	30
FIGURA 17 - GEOMETRIA DA JUNTA DE REPARAÇÃO DE CHANFRO INTERIOR [51].....	31
FIGURA 18 - CARGA MÁXIMA (VALORES NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS) EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE CHANFRO INTERIOR [51].....	31
FIGURA 19 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA REPARAÇÃO DA JUNTA DE CHANFRO INTERIOR [52] .	32
FIGURA 20 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES OBTIDAS POR MEF E EXPERIMENTALMENTE [53].....	32
FIGURA 21 - PARÂMETROS DE DESIGN PARA JUNTA DE CHANFRO INTERIOR (A) E JUNTA EM DEGRAUS (B) [54].....	33
FIGURA 22 - PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DOS TRÊS TIPOS DE JUNTA (AL2024-T3 USANDO COMO ADERENTE) : (A) JSS (TIPO-I), (B) JUNTA DE UM DEGRAU (TIPO-II), (C) JUNTA COM TRÊS DEGRAUS (TIPO-III) [55].....	34

FIGURA 23 - CARGA MÁXIMA DE ROTURA OBTIDA EXPERIMENTALMENTE PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES [55].....	35
FIGURA 24- CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO (σ -E) DA LIGA DE ALUMÍNIO AL 6082-T651 [48].	42
FIGURA 25 - CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DE ARALDITE® AV138 [65].....	42
FIGURA 26 - CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DE ARALDITE® 2015 [67].....	44
FIGURA 27 - CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DE SIKAFORCE® 7752.	45
FIGURA 28 - GEOMETRIA DAS CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS UTILIZADAS: A) JSS; B) JSD; C) JUNTA EM DEGRAU; D) JUNTA DE CHANFRO INTERIOR;.....	46
FIGURA 29 – MAQUINAGEM DE JUNTA DE CHANFRO INTERIOR DE 3,43°	48
FIGURA 30 – CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA COLAGEM DAS JUNTAS	48
FIGURA 31 – GRAMPO DE FIXAÇÃO	49
FIGURA 32 – GRAMPOS PARA GARANTIR FIXAÇÃO DA JUNTA DURANTE A CURA	49
FIGURA 33 - MÁQUINA DE ENSAIO DE TRACÇÃO SHIMADZU AG-X.....	50
FIGURA 34 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JSS) ARALDITE® AV138 L ₀ =25 MM	50
FIGURA 35 - CURVA P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JSS) ARALDITE® 2015 L ₀ =50 MM	51
FIGURA 36 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JSS) SIKAFORCE® 7752 L ₀ =37,5 MM	51
FIGURA 37 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JSD) ARALDITE® AV138 L ₀ =12,5 MM.....	52
FIGURA 38 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES. OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JSD) ARALDITE® 2015 L ₀ =37,5 MM	52
FIGURA 39 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JSD) SIKAFORCE® 7752 L ₀ =25 MM	52
FIGURA 40 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JUNTA EM DEGRAUS) ARALDITE® AV138 L ₀ =25 MM	53
FIGURA 41 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JUNTA EM DEGRAUS) ARALDITE® 2015 L ₀ =37,5 MM	53
FIGURA 42 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JUNTA EM DEGRAUS) SIKAFORCE® 7752 L ₀ =50 MM.....	53
FIGURA 43 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JUNTA DE CHANFRO INTERIOR) ARALDITE® AV138 A=45°	54
FIGURA 44 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JUNTA DE CHANFRO INTERIOR) ARALDITE® 2015 A=10°.....	54
FIGURA 45 - CURVAS P- Δ , DOS PROVETES, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE (JUNTA DE CHANFRO INTERIOR) SIKAFORCE® 7752 A=3°	54
FIGURA 46 - MODOS DE ROTURA DOS PROVETES JSS: ARALDITE® AV138, L ₀ =12,5 MM (A), L ₀ =25 MM (B), L ₀ =37,5 MM (C), L ₀ =50 MM (D) [11]	55

FIGURA 47 - MODOS DE ROTURA DOS PROVETES JSS: ARALDITE® 2015, $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D) [11]	55
FIGURA 48 - MODOS DE ROTURA DOS PROVETES JSS: SIKAFORCE® 7752, $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D) [71]	56
FIGURA 49 - MODOS DE ROTURA DOS PROVETES JSD: ARALDITE® AV138, $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D) [70]	56
FIGURA 50 - MODOS DE ROTURA DOS PROVETES JSD: ARALDITE® 2015, $L_0=12,5$ MM (A), $L_0=25$ MM (B), $L_0=37,5$ MM (C), $L_0=50$ MM (D) [70]	57
FIGURA 51 - MODOS DE ROTURA DOS PROVETES JSD: SIKAFORCE® 7752 PARA $L_0=37,5$ MM [71]	57
FIGURA 52 - MODOS DE ROTURA DOS PROVETES DE JUNTA EM DEGRAU: ARALDITE® AV138 [72]	58
FIGURA 53 - MODOS DE ROTURA DOS PROVETES DE JUNTA EM DEGRAU: ARALDITE® 2015 [72]	58
FIGURA 54 - MODOS DE ROTURA DOS PROVETES DE JUNTA EM DEGRAUS: SIKAFORCE® 7752 [72].....	59
FIGURA 55 – MODOS DE ROTURA DOS PROVETES DE JUNTA DE CHANFRO INTERIOR: SIKAFORCE® 7752, $A=3^\circ$	60
FIGURA 56 - VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX MÉD}$ E DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES ADESIVOS NAS JSS.....	61
FIGURA 57 - VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX MÉD}$ E DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES ADESIVOS NAS JSD	62
FIGURA 58 - VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX MÉD}$ E DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE L_0 PARA OS DIFERENTES ADESIVOS NA JUNTA EM DEGRAU.....	63
FIGURA 59 - VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX}$ E DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE A PARA OS DIFERENTES ADESIVOS EM JUNTA DE CHANFRO INTERIOR.....	64
FIGURA 60 – ATRIBUIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS NO ABAQUS®	67
FIGURA 61 - EFEITO BIAS NA REGIÃO DE SOBREPOSIÇÃO DA JSS	68
FIGURA 62 - EFEITO BIAS NA REGIÃO DE SOBREPOSIÇÃO DA JSD	68
FIGURA 63 - EFEITO BIAS NA REGIÃO DE SOBREPOSIÇÃO DA JUNTA DE CHANFRO INTERIOR.....	68
FIGURA 64 - EFEITO BIAS NA REGIÃO DE SOBREPOSIÇÃO DA JUNTA EM DEGRAU	68
FIGURA 65 – EFEITO BIAS DA MALHA NA REGIÃO NÃO LIGADA DOS ADERENTES PARA JSS.....	68
FIGURA 66 - EFEITO BIAS DA MALHA NA REGIÃO NÃO LIGADA DOS ADERENTES, PARA JSD	69
FIGURA 67 - EFEITO BIAS DA MALHA NA REGIÃO NÃO LIGADA DOS ADERENTES, PARA JUNTA DE CHANFRO INTERIOR.....	69
FIGURA 68 - EFEITO BIAS DA MALHA NA REGIÃO NÃO LIGADA DOS ADERENTES PARA JUNTA EM DEGRAU	69
FIGURA 69 - CONDIÇÕES FRONTEIRA E DE CARREGAMENTO IMPOSTAS NOS MODELOS NUMÉRICOS PARA JSS	69
FIGURA 70 - CONDIÇÕES FRONTEIRA E DE CARREGAMENTO IMPOSTAS NOS MODELOS NUMÉRICOS PARA JSD.....	69
FIGURA 71 - CONDIÇÕES FRONTEIRA E DE CARREGAMENTO IMPOSTAS NOS MODELOS NUMÉRICOS PARA JUNTA DE CHANFRO INTERIOR	70

FIGURA 72 - CONDIÇÕES FRONTEIRA E DE CARREGAMENTO IMPOSTAS NOS MODELOS NUMÉRICOS PARA JUNTA EM DEGRAU.....	70
FIGURA 73 - MDC TRIANGULAR IMPLEMENTADO NO SOFTWARE ABAQUS®.....	70
FIGURA 74 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	74
FIGURA 75 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	75
FIGURA 76 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	75
FIGURA 77 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	76
FIGURA 78 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	77
FIGURA 79 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	77
FIGURA 80 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	79
FIGURA 81 - -- DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	79
FIGURA 82 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES Σ_Y EM JSD COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	80
FIGURA 83 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	81
FIGURA 84 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSD COM O ADESIVO ARALDITE® 2015, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	81
FIGURA 85 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES T_{XY} EM JSD COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA OS DIVERSOS VALORES DE L_0	82
FIGURA 86 – COMPARAÇÃO DAS TENSÕES DE ARRANCAMENTO ENTRE OS TRÊS ADESIVOS, PARA $L_0=12,5$ MM	83
FIGURA 87 – COMPARAÇÃO DAS TENSÕES DE CORTE ENTRE OS TRÊS ADESIVOS PARA, $L_0=12,5$ MM	83
FIGURA 88 – COMPARAÇÃO DAS TENSÕES DE ARRANCAMENTO DO ARALDITE® 2015 EM FUNÇÃO DE L_0	84
FIGURA 89 – COMPARAÇÃO DAS TENSÕES DE CORTE DO ARALDITE® 2015 EM FUNÇÃO DO L_0	85
FIGURA 90 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO NORMALIZADA DE ARRANCAMENTO ENTRE ADESIVOS, PARA $3,43^\circ$	86
FIGURA 91 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO NORMALIZADA DE ARRANCAMENTO ENTRE ADESIVOS, PARA 45°	87
FIGURA 92 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE ARRANCAMENTO NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS, PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	87

FIGURA 93 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE ARRANCAMENTO NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS, PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015	88
FIGURA 94 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE ARRANCAMENTO NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS, PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	88
FIGURA 95 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO NORMALIZADA DE CORTE ENTRE ADESIVOS, PARA 3,43°.....	89
FIGURA 96 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO NORMALIZADA DE CORTE ENTRE ADESIVOS, PARA 45°.....	90
FIGURA 97 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE CORTE NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS, PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	90
FIGURA 98 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE CORTE NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS, PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	91
FIGURA 99 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE CORTE NORMALIZADA ENTRE ÂNGULOS, PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	91
FIGURA 100 - VARIÁVEL DE DANO NA CAMADA DE ADESIVO NO INSTANTE EM QUE $P_{MÁX}$ É ATINGIDO, PARA AS JSS [110]	93
FIGURA 101 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA $L_0=12,5$ MM	93
FIGURA 102 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138, PARA $L_0=50$ MM	94
FIGURA 103 -- EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, PARA $L_0=12,5$ MM	94
FIGURA 104 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM Δ PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA $L_0=50$ MM	95
FIGURA 105 - VARIÁVEL DE DANO NA CAMADA DE ADESIVO NO INSTANTE EM QUE SE ATINGE $P_{MÁX}$, PARA AS JSD.....	96
FIGURA 106 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ , PARA AS JSD COM ARALDITE® AV138 E $L_0=12,5$ MM	97
FIGURA 107 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ , PARA AS JSD COM ARALDITE® AV138 E $L_0=50$ MM	97
FIGURA 108 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ , PARA AS JSD COM SIKAFORCE® 7752 E $L_0=12,5$ MM.....	98
FIGURA 109 - EVOLUÇÃO DE SDEG NA ZONA COLADA COM A APLICAÇÃO DE Δ , PARA AS JSD COM SIKAFORCE® 7752 E $L_0=50$ MM.....	98
FIGURA 110 – SDEG NOS ELEMENTOS COESIVOS DA CAMADA ADESIVA QUANDO $P_{MÁX}$ É ATINGIDO EM FUNÇÃO DE L_0 : ARALDITE® AV138.....	99
FIGURA 111 - SDEG NOS ELEMENTOS COESIVOS DA CAMADA ADESIVA QUANDO $P_{MÁX}$ É ATINGIDO EM FUNÇÃO DE L_0 : ARALDITE® 2015	100
FIGURA 112 – SDEG NOS ELEMENTOS COESIVOS DA CAMADA ADESIVA QUANDO $P_{MÁX}$ É ATINGIDO EM FUNÇÃO DE L_0 : SIKAFORCE® 7752	100
FIGURA 113 – EVOLUÇÃO DO SDEG NOS ELEMENTOS COESIVOS DA CAMADA ADESIVA COM A APLICAÇÃO DE Δ , PARA O ARALDITE® AV138 E $L_0=12,5$ MM	101

FIGURA 114 — EVOLUÇÃO DO SDEG NOS ELEMENTOS COESIVOS DA CAMADA ADESIVA COM A APLICAÇÃO DE Δ , PARA O ARALDITE® AV138 E $L_0=50$ MM	102
FIGURA 115 – EVOLUÇÃO DO SDEG NOS ELEMENTOS COESIVOS DA CAMADA ADESIVA COM A APLICAÇÃO DE Δ , PARA O SIKAFORCE® 7752 E $L_0=12,5$ MM	102
FIGURA 116 - EVOLUÇÃO DO SDEG NOS ELEMENTOS COESIVOS DA CAMADA ADESIVA COM A APLICAÇÃO DE Δ PARA O SIKAFORCE® 7752 E $L_0=50$ MM	103
FIGURA 117 - EXTENSÃO DO DANO (SDEG) À CARGA MÁXIMA COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L), PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 EM JUNTAS COM DIFERENTES α	104
FIGURA 118 - EXTENSÃO DO DANO (SDEG) À CARGA MÁXIMA COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L), PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015 EM JUNTAS COM DIFERENTES α	104
FIGURA 119 - EXTENSÃO DO DANO (SDEG) À CARGA MÁXIMA COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L), PARA O ADESIVO SIKAFORCE® EM JUNTAS COM DIFERENTES α	105
FIGURA 120 - EVOLUÇÃO DO DANO (SDEG) COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L), PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 COM α DE $3,43^\circ$	105
FIGURA 121 - EVOLUÇÃO DO DANO (SDEG) PERCENTUAL COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L), PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138 COM α DE 45°	106
FIGURA 122 - EVOLUÇÃO DO DANO (SDEG) PERCENTUAL COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L), PARA O ADESIVO SIKAFORCE® COM α DE $3,43^\circ$	107
FIGURA 123 - EVOLUÇÃO DO DANO (SDEG) PERCENTUAL COM O COMPRIMENTO NORMALIZADO DA CAMADA DE ADESIVO (X/L), PARA O ADESIVO SIKAFORCE® COM α DE 45°	107
FIGURA 124 - COMPARAÇÃO DE VALORES $P_{MÁX}$ NUMÉRICOS COM VALORES EXPERIMENTAIS DA JSS ..	108
FIGURA 125 – COMPARAÇÃO DE VALORES NUMÉRICOS COM VALORES EXPERIMENTAIS DA JSD	109
FIGURA 126 - COMPARAÇÃO DE VALORES NUMÉRICOS COM VALORES EXPERIMENTAIS DA JUNTA EM DEGRAU	110
FIGURA 127 - COMPARAÇÃO DE VALORES NUMÉRICOS COM VALORES EXPERIMENTAIS DA JUNTA DE CHANFRO INTERIOR.....	111
FIGURA 128 – COMPARAÇÃO DE $P_{MÁX}$ (C/ DESVIO PADRÃO) PARA O ARALDITE® AV138, EM FUNÇÃO DO TIPO DE JUNTA.....	112
FIGURA 129 - COMPARAÇÃO DE $P_{MÁX}$ (C/ DESVIO PADRÃO) PARA O ARALDITE® 2015 EM FUNÇÃO DO TIPO DE JUNTA	113
FIGURA 130 - COMPARAÇÃO DE $P_{MÁX}$ (C/ DESVIO PADRÃO) PARA O SIKAFORCE® 7752 EM FUNÇÃO DO TIPO DE JUNTA.....	114

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DOS DIVERSOS TIPOS DE LIGAÇÕES [1]	6
TABELA 2 - PROPRIEDADES DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [65].....	43
TABELA 3 - PROPRIEDADES DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [67, 68]	44
TABELA 4 - PROPRIEDADES DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [69]	45
TABELA 5 - DIMENSÕES JSS, JSD E JUNTA EM DEGRAU	46
TABELA 6 -DIMENSÕES DE JUNTA DE CHANFRO INTERIOR.....	47
TABELA 7 - VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX}$ [N] PARA AS JSS E PARA OS DIFERENTES ADESIVOS.....	60
TABELA 8 - VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX}$ [N] PARA AS JSD E PARA OS DIFERENTES ADESIVOS	61
TABELA 9 - VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX MÉD}$ [N], PARA AS JUNTAS EM DEGRAU E PARA OS DIFERENTES ADESIVOS	63
TABELA 10 - VALORES MÉDIOS DE $P_{MÁX MÉD}$ [N] PARA AS JUNTAS DE CHANFRO INTERIOR E PARA OS DIFERENTES ADESIVOS.....	64
TABELA 11 - PARÂMETROS COESIVOS EM TRACÇÃO E CORTE PARA UMA CAMADA DE ADESIVO ARALDITE® 2015 COM UMA ESPESSURA DE 0,2 MM.....	72
TABELA 12 – PARÂMETROS COESIVOS EM TRACÇÃO E CORTE PARA UMA CAMADA DE ADESIVO ARALDITE® AV138 COM UMA ESPESSURA DE 0,2 MM	72
TABELA 13 – PARÂMETROS COESIVOS EM TRACÇÃO E CORTE PARA UMA CAMADA DE ADESIVO SIKAFORCE® 7752 COM UMA ESPESSURA DE 0,2 MM	73

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objectivos	1
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Ligações adesivas	5
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	5
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	8
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	11
2.1.4	Configurações possíveis de junta	14
2.1.5	Adesivos estruturais	17
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	19
2.2.1	Modelos analíticos	20
2.2.2	Métodos numéricos	20
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	20
2.2.2.2	Mecânica da fractura	21
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo (MDC)	21
2.2.2.4	Mecânica do dano	22
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido (MEFE)	23
2.3	Juntas adesivas sujeitas a esforços de tracção no plano	23

2.3.1	Juntas de sobreposição simples	23
2.3.2	Juntas de sobreposição dupla	27
2.3.3	Juntas com chanfro interior	29
2.3.4	Juntas em degrau	32
2.3.5	Outros tipos de juntas	35
3	DESENVOLVIMENTO	41
3.1	Trabalho experimental	41
3.1.1	Materiais utilizados	41
3.1.1.1	Substratos	41
3.1.1.2	Adesivos	42
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	42
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	43
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	44
3.1.2	Geometria das juntas	46
3.1.3	Processo de fabrico	47
3.1.4	Ensaio das juntas	49
3.1.5	Resultados obtidos	50
3.1.5.1	Curvas P- δ	50
3.1.5.1.1	Junta de sobreposição simples	50
3.1.5.1.2	Junta de sobreposição dupla.....	51
3.1.5.1.3	Junta em degrau.....	52
3.1.5.1.4	Junta de chanfro interior.....	54
3.1.5.2	Modos de rotura	55

3.1.5.2.1	Junta de sobreposição simples	55
3.1.5.2.2	Junta de sobreposição dupla.....	56
3.1.5.2.3	Junta em degrau.....	58
3.1.5.2.4	Junta de chanfro interior.....	59
3.1.5.3	Resistência das juntas	60
3.1.5.3.1	Junta de sobreposição simples	60
3.1.5.3.2	Junta de sobreposição dupla.....	61
3.1.5.3.3	Junta em degrau.....	62
3.1.5.3.4	Junta de chanfro interior.....	63
3.1.5.4	Análise dos resultados obtidos	64
3.2	Trabalho numérico	67
3.2.1	Condições da análise numérica	67
3.2.2	Modelo de dano coesivo	70
3.2.2.1	Modelo de dano triangular	70
3.2.2.2	Determinação das propriedades coesivas	71
3.2.3	Análise de tensões na junta.....	73
3.2.3.1	Juntas de sobreposição simples.....	73
3.2.3.2	Juntas de sobreposição dupla.....	78
3.2.3.3	Juntas em degrau.....	82
3.2.3.4	Juntas de chanfro interior.....	85
3.2.4	Estudo da variável de dano	92
3.2.4.1	Junta de sobreposição simples	92
3.2.4.2	Junta de sobreposição dupla	95

3.2.4.3	Junta em degrau	98
3.2.4.4	Junta de chanfro interior	103
3.2.5	Previsão da resistência	107
3.2.5.1	Junta de sobreposição Simples	108
3.2.5.2	Junta de sobreposição dupla	109
3.2.5.3	Junta em degraus.....	109
3.2.5.4	Junta com chanfro interior	110
3.3	Análise dos resultados obtidos	111
4	CONCLUSÕES.....	117
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	123

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A realização deste trabalho advém do uso cada vez mais abrangente de ligações adesivas em diversas áreas, principalmente na indústria. Comparativamente, as juntas adesivas apresentam variadas vantagens em relação aos métodos de ligação mecânica tradicionais, nomeadamente o baixo peso, capacidade de reduzir a concentração de tensões, facilidade de fabrico, capacidade de unir materiais dissimilares e maior resistência. No entanto, também apresentam desvantagens, tais como a necessidade de um rigoroso controlo de qualidade, fraca resistência ao arrancamento, pode ser necessária a utilização de ferramentas de fixação e de elevadas temperaturas de cura. Existem variados factores que condicionam o comportamento de uma junta adesiva, e a necessidade de avaliar alguns desses principais factores, nomeadamente, o tipo de adesivo (frágil, dúctil ou um compromisso entre as duas propriedades) e geometria da junta, em função comprimento de sobreposição (L_0). Para este trabalho, são usados os adesivos comerciais Araldite® AV138 (adesivo resistente, mas frágil), Araldite® 2015 (adesivo com moderada resistência e ductilidade) e o Sikaforce® 7752 (adesivo bastante dúctil). Com a realização deste trabalho, é também possível avaliar a adequabilidade da lei triangular dos MDC, quanto à precisão, para a previsão da resistência de juntas adesivas, o que por sua vez pode resultar numa redução de tempo e custos na selecção de um determinado adesivo para determinado tipo de junta, consoante a aplicação necessária.

1.2 Objectivos

Os principais objectivos deste trabalho foram efectuar um estudo comparativo envolvendo diversas geometrias de junta, usando vários adesivos com diferentes características, e verificar qual o tipo de adesivo que mais se adequa a determinada geometria de junta. Para tal, foram escolhidas as geometrias de junta de sobreposição simples (JSS), junta de sobreposição dupla (JSD), junta em degrau e junta de chanfro interior, a ser testadas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752.

Para concretizar estes objectivos é efectuada uma análise experimental, na qual são testadas as diferentes configurações para os vários adesivos, e realizada a respectiva análise dos resultados obtidos. Estes resultados experimentais são depois comparados com resultados numéricos obtidos utilizando o *software* ABAQUS®, recorrendo a um módulo integrado de MDC. Dos resultados numéricos obtidos, é realizado um estudo das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) na camada adesiva. No estudo por MDC, é também avaliada a variável de dano SDEG (*Stiffness degradation*) em função de L_0 , que permite observar a degradação da camada adesiva desde o início de aplicação da carga, até à rotura completa, apresentando-se depois comentários dos resultados obtidos.

1.3 Organização do relatório

Para melhor interpretação e análise desta dissertação, esta foi dividida em quatro capítulos distintos.

No capítulo 1 é feito um enquadramento do trabalho desenvolvido e respectivos objectivos.

No capítulo 2 é efectuada a revisão bibliográfica, focada no trabalho desenvolvido, onde são abordados temas relacionados com a tecnologia dos adesivos, vantagens/desvantagens, aplicações, configurações de juntas adesivas, esforços e modos de rotura, assim como os modelos analíticos e numéricos usados para a previsão de resistência das juntas adesivas.

O capítulo 3 está dividido em 3.1 e 3.2. O subcapítulo 3.1 aborda o trabalho experimental desenvolvido, detalhando as etapas efectuadas até à obtenção dos resultados, nomeadamente, materiais utilizados, geometria das juntas testadas, processo de fabrico das respectivas juntas, os seus ensaios e análise de resultados. O subcapítulo 3.2 faz uma abordagem ao trabalho numérico desenvolvido, no qual se destacam as condições de análise numérica, uma descrição do MDC, análise de tensões e de dano nas juntas adesivas, previsão da resistência das juntas com base nos resultados obtidos do *software* ABAQUS® e respectiva análise de resultados.

O capítulo 4 consiste na apresentação das conclusões obtidas, e são também referenciados possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

A utilização de adesivos já advém de há milhares de anos atrás. Os antigos caçadores, como forma de melhorar a sua mira, colavam penas às setas, usando uma cera produzida por abelhas, que nada mais é do que uma forma primitiva de adesivo. Muito provavelmente, a torre de Babel foi construída usando argamassa como elemento agregador [1]. Até há 100 anos atrás, a grande maioria dos adesivos era feita a partir de produtos naturais, tais como, ossos, peles, peixe, leite e plantas. Só no início do séc. XX é que se começaram a usar adesivos produzidos a partir de polímeros sintéticos. Hoje em dia, é difícil imaginar alguma indústria, meio de transporte ou residência, que não use algum tipo de adesivo [2].

Nos capítulos que se seguem, a tecnologia de adesão será um pouco mais aprofundada, dando a conhecer as principais características destes materiais, assim como as suas possíveis configurações, indústrias e actividades produtivas onde são aplicados.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Os adesivos têm sido utilizados durante muitos séculos. Contudo, este método de ligação só se desenvolveu de forma significativa nos últimos 70 anos, devido ao facto de os adesivos usados em aplicações tecnologicamente avançadas serem baseados em polímeros sintéticos, que só foram desenvolvidos nos anos 40 do séc. XX. Os polímeros sintéticos possuem propriedades que lhes permitem aderir, com facilidade, à maior parte dos materiais, com uma resistência capaz de resistir a cargas consideráveis. Segundo Kinloch (1987), um adesivo pode ser definido como um material que, quando aplicado à superfície de outros materiais, os pode juntar e resistir à separação dos mesmos [2].

Uma junta adesiva contém diferentes componentes, como se pode verificar na Figura 1. O material a ser ligado é designado por substrato, se bem, que após a ligação, também pode ser designado por aderente.

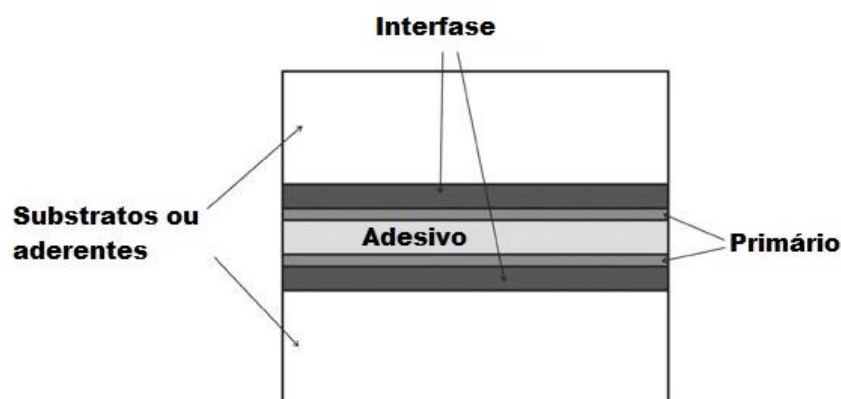


Figura 1 - Constituintes de uma junta adesiva (adaptado de [2])

A interfase é a zona entre o adesivo e o aderente. Esta zona tem características físicas e químicas diferentes das do adesivo e do aderente, sendo estas críticas para a determinação das propriedades de uma ligação adesiva. A interface, que está contida na interfase, é o plano de contacto entre o aderente e o adesivo.

O primário é utilizado, sendo aplicado directamente na superfície dos substratos, para melhorar a adesão e/ou proteger as ditas superfícies, até ser aplicado o adesivo [3].

Tabela 1 - Características dos diversos tipos de ligações [1]

	Juntas Adesivas	Soldadura	Rebitagem	Brasagem
Tipo de ligação	Ligação permanente	Ligação permanente	Podem ser retirados	Permanente
Distribuição de tensões	Distribuição uniforme das tensões ao longo da área ligada (excepto ao arrancamento)	Pontos de tensão localizados na estrutura	Grandes pontos de tensão nos rebites	Boa distribuição de tensão
Materiais ligados	Ideal para a ligação de materiais dissimilares	Limitado a materiais do mesmo tipo	Bastantes formas e combinações de materiais podem ser ligados	Alguma capacidade de ligar materiais dissimilares
Resistência mecânica	Excelentes propriedades para a resistência à fadiga Isolamento eléctrico reduz a corrosão	Necessários cuidados especiais para melhorar a resistência à fadiga	Necessários cuidados especiais para melhorar a resistência à fadiga e prevenir o alargamento da junta	Boa resistência a vibrações

Resistência à temperatura	Fraca resistência a temperaturas elevadas	Resistência a elevadas temperaturas	Resistência a elevadas temperaturas	Depende do material usado na ligação
Preparação de junta	Necessária limpeza cuidada	Praticamente nenhuma para material de baixa espessura. Preparação de junta necessária para maiores espessuras.	Necessária preparação do furo	Necessidade de limpeza superficial
Equipamento	Equipamentos de grandes dimensões têm um custo elevado	Relativamente caro, volumoso e com consumos energéticos elevados	Barato, portátil e pode ser montado no local	Equipamento manual barato. Fornalhas especiais e equipamento automatizado caro
Consumíveis	Os adesivos a usar são, por vezes, caros	Fio, varões, etc., relativamente baratos	Bastante caro	Algum material de adição pode ser caro
Tempo de produção	Minutos a horas dependendo do tipo de junta	Pode ser bastante rápido	Preparação do processo pode ser demorado. O processo em si é rápido.	Processo automatizados são bastante rápidos
Garantia de qualidade	Métodos de avaliação limitados	Métodos de avaliação vastos	Processo bem controlado	Processo de inspeção difícil

Comparativamente a outros processos de ligação, as juntas adesivas possuem características (Tabela 1) que têm contribuído para o aumento do seu uso em diversas áreas, em detrimento destes. As vantagens da utilização de juntas adesivas são as seguintes [1]:

- Distribuição uniforme das tensões;
- Excelente resistência à fadiga;
- Amortecem vibrações e absorvem o impacto;
- Minimizam ou previnem a corrosão galvânica entre materiais diferentes;
- Capacidade para fazer ligações com geometrias e espessuras variadas;
- Permitem contornos suaves e regulares;
- Juntas vedantes;
- Capacidade de ligar qualquer combinação de materiais similares ou não;
- Geralmente, é mais rápido e barato que os outros métodos de fixação/ligação mecânicos;

- Permitem a existência de um bom rácio resistência/peso.

Mas, como não existe nenhum método de ligação perfeito, o uso de ligações adesivas está também associado a diversas desvantagens [1]:

- As superfícies de ligação têm de ser cuidadosamente limpas;
- Podem ser necessários longos tempos de cura, e a temperaturas e pressão elevadas;
- Sensibilidade a forças de arrancamento, clivagem e impacto;
- Pode ser necessário o uso de ferramentas de fixação;
- É necessário um rigoroso controlo de qualidade;
- O tempo de vida útil depende do ambiente no qual vai ser utilizada;
- Não adequadas à utilização a temperaturas elevadas.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As aplicações relacionadas com as ligações adesivas são, hoje em dia, bastante diversas, e podem ser encontradas em todos os tipos de indústria. A indústria aeronáutica foi uma das precursoras desta tecnologia, tendo sido a principal responsável pelo desenvolvimento de juntas adesivas estruturais [2]. O uso de adesivos é vasto na indústria aeronáutica (de pequenas aeronaves a aviões comerciais de grandes dimensões, *drones*, mísseis, etc.) e aeroespacial (foguetões, satélites, naves espaciais, etc.), devido às suas características, que servem particularmente bem as suas necessidades, nomeadamente: baixo peso das estruturas adesivas, resistência à fadiga, absorção das vibrações e a capacidade de produzir superfícies suaves e aerodinâmicas. A construção de veículos aéreos e o uso destes, não é uma prática indulgente. Para uma produção e uso seguros, são necessários materiais e práticas bem definidas e controladas assim como muita perícia na sua produção. As ligações são usadas para fazer a união entre materiais metálicos e compósitos, em estruturas nucleares (Figura 2) que sofrem grande parte dos esforços, que em caso de falha pode resultar na perda do veículo e, no caso de um avião tripulado, a perda de vidas humanas. Por estas razões, o uso bem-sucedido de ligações adesivas estruturais, requer elevado controlo de qualidade [4].

Na indústria automóvel, o uso de adesivos começou sensivelmente há 40 anos atrás, sendo estes utilizados como selantes. Depois disso, os adesivos eram usados para prevenir a corrosão. Os primeiros adesivos estruturais foram usados para melhorar a rigidez da carroçaria do automóvel. Actualmente, os adesivos são usados como parte fundamental na estrutura do automóvel (Figura 3), mesmo para o aumento da segurança deste. Desde há já algum tempo que o paradigma da indústria automóvel tem consistido em projectar veículos leves, de forma a reduzir principalmente o consumo de

combustível. Este modelo de design levou ao uso de diferentes materiais, tais como aços de elevada resistência, ligas de alumínio e de magnésio e materiais compósitos (estruturas *sandwich*, plásticos reforçados com fibra de vidro e fibra de carbono), o que acelerou o uso de ligações adesivas estruturais, uma vez que este método é o mais adequado para a junção destes materiais. No modelo série 7 da BMW, são utilizados mais de 10 kg de adesivo estrutural [5].

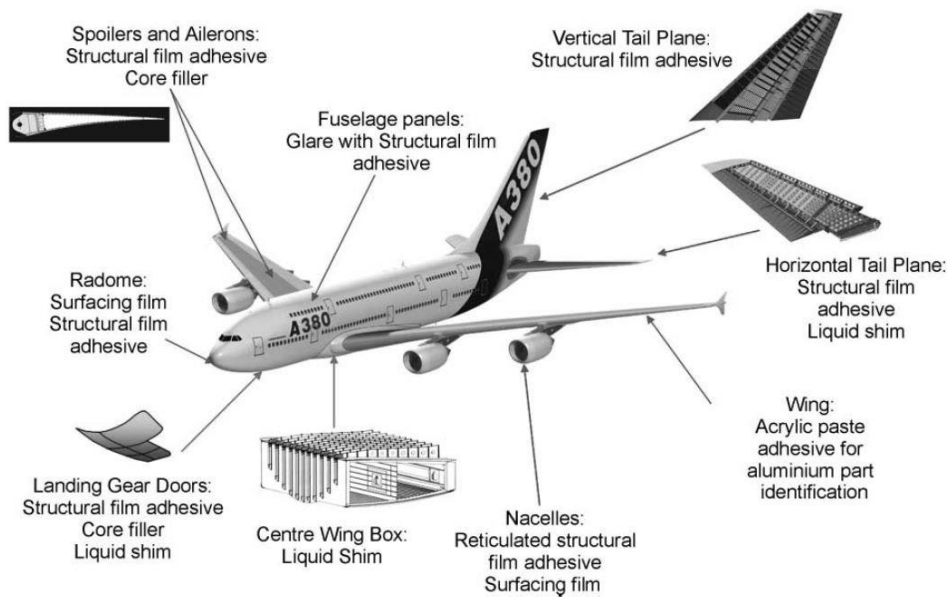


Figura 2 – Áreas de ligações adesivas no Airbus A380 [6]

Também seguindo o mesmo paradigma da indústria automóvel, a indústria dos transportes, nomeadamente comboios, camiões, autocarros, etc., tem vindo a aumentar o uso de ligações adesivas estruturais [3].

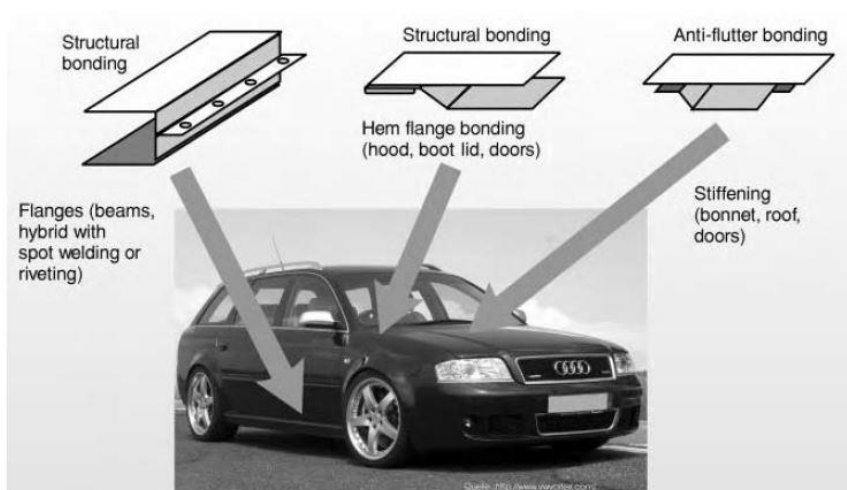


Figura 3 - diferentes aplicações de ligações adesivas num automóvel [7]

Na indústria naval, o uso de ligações adesivas tem vindo a ganhar popularidade. Os materiais utilizados podem variar bastante, mas na maioria dos casos, as ligações adesivas são usadas na junção de plásticos reforçados com fibra de vidro e alumínio.

Existe uma grande variedade de aplicações de ligações adesivas em navios, ou outras aplicações marinhas. As ligações podem ser críticas a nível estrutural (Figura 4), ou então ter como função principal ser vedante, e a componente estrutural ser secundária. De qualquer forma, é sempre necessário que os adesivos utilizados tenham boa resistência à corrosão, humidade e radiação UV, de forma a aumentar a durabilidade das ligações, uma vez que se espera que os barcos de recreio, vela, etc., tenham uma vida útil elevada [8].

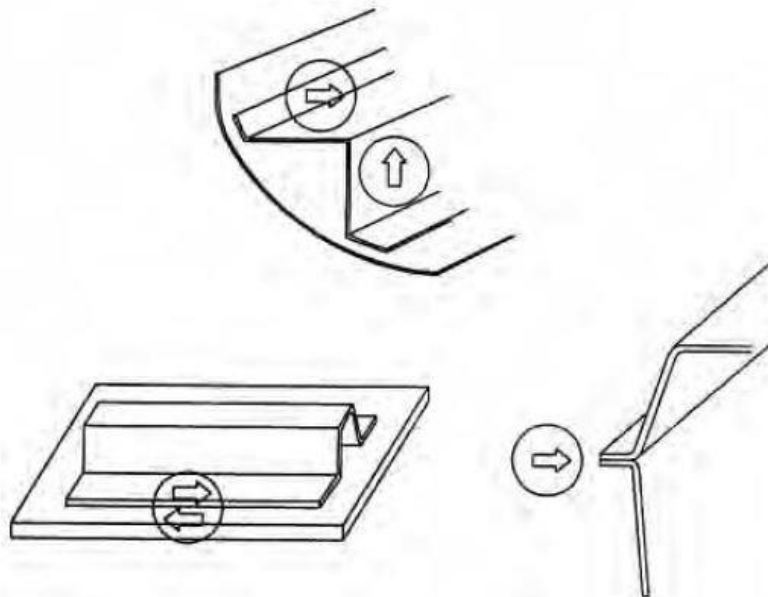


Figura 4 - Tipos de junta e esforços associados, utilizadas num barco de recreio [7]

Existem outras áreas nas quais o uso de adesivos tem vindo a aumentar, como por exemplo [2, 3]:

- Construção civil (pontes, postes, painéis, caixilharia, etc.);
- Desporto (bicicletas, raquetes de ténis, tacos de golfe, esquis, patins, etc.);
- Indústria do calçado (colagem das solas);
- Indústria electrónica (microchips);
- Medicina (Biocompatibilidade de próteses, órgãos artificiais e colas cirúrgicas).

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Quando é feito o projecto de uma junta adesiva, um dos principais factores a ter em consideração é saber os tipos de tensão a que esta poderá estar sujeita, e ter em conta que quando aplicadas cargas, raramente se consegue uma distribuição uniforme das tensões provocadas. Estas forças criam zonas de concentração de tensões, tensões estas que, na maior parte das vezes, determinam a resistência máxima da junta. Desta forma, é importante que no projecto estes efeitos sejam compensados ou minimizados [1].

Existem cinco tipos de tensões que são comuns nas juntas adesivas: tracção/compressão, corte, clivagem e arrancamento. Na Figura 5 estão representados os vários tipos de esforços [1].

Esforços [3]:

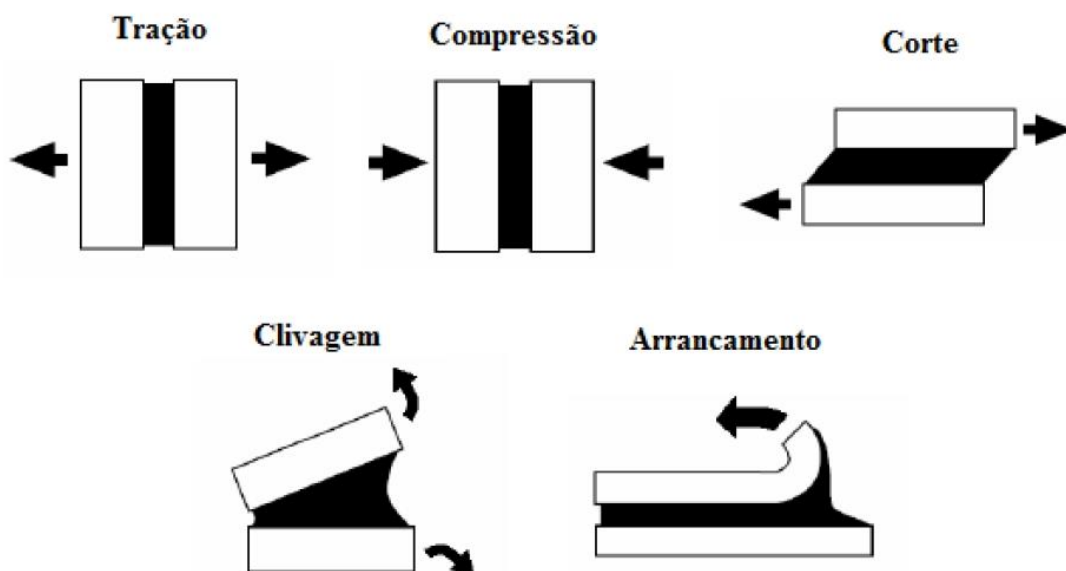


Figura 5 - Esquema representativo dos vários esforços de uma ligação adesiva [9]

Tracção – Tensões de tracção desenvolvem-se quando as forças actuam perpendicularmente ao plano de colagem. De forma a existir uma distribuição uniforme das tensões normais ao longo da área colada, as juntas devem ser manufacturadas de tal modo que as superfícies dos substratos sejam paralelas, e que as forças sejam perfeitamente perpendiculares a estas. Mas, devido ao facto de ser difícil controlar o processo de colagem, de forma a que a espessura de adesivo seja constante ao longo de todo o comprimento da junta, e ao facto de as forças aplicadas raramente serem

exactamente axiais, dão origem a tensões de clivagem e de arrancamento nas extremidades da zona de colagem (Figura 6).

Compressão – Semelhantes às tensões de tracção, as tensões de compressão são originadas por forças que actuam perpendicularmente ao plano de colagem, e comprimem um aderente contra o outro. Estas forças devem manter-se alinhadas, para que o adesivo se mantenha em compressão pura, de forma a não romper.

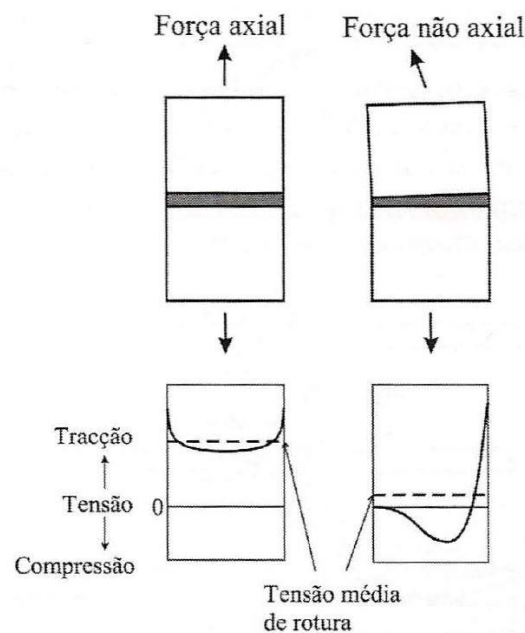


Figura 6 - Distribuição da tensão numa junta topo a topo sob carregamento axial e não axial [3]

Corte – Tensões de corte surgem com a aplicação de forças paralelas ao plano de colagem. A maior parte destas tensões estão localizadas nas extremidades da sobreposição, como se exemplifica na Figura 7, o que deixa a zona central da junta sujeita a tensões desprezáveis. Tendo isto em conta, uma forma de aumentar a resistência das juntas sujeitas a tensões de corte seria aumentar a sua largura, aumentado, conseqüentemente, a área de contacto nas extremidades e melhorando distribuição de tensões.

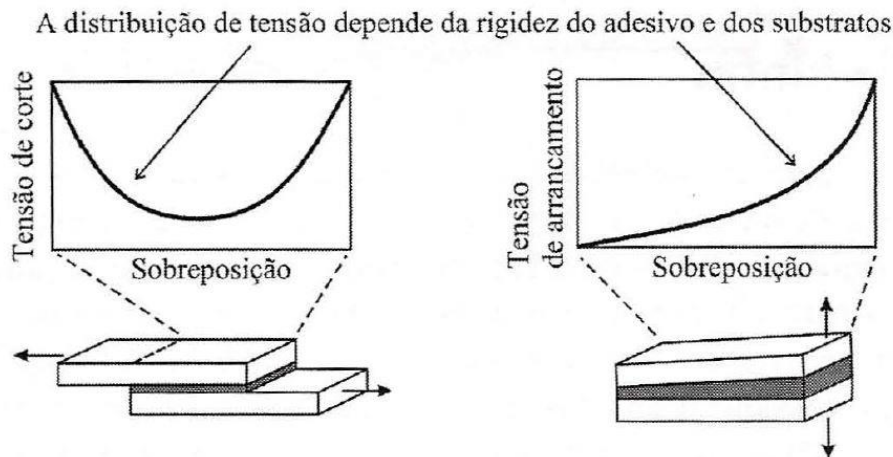


Figura 7 - Distribuição da tensão numa junta sujeita a tensão de corte e arrancamento/clivagem [3]

Clivagem - as tensões de clivagem ocorrem quando são aplicadas forças na extremidade de uma junta rígida, de forma a separar os substratos (Figura 7). Juntas sujeitas a tensões de clivagem ou arrancamento, têm uma resistência menor do que aquelas sujeitas a tensão de corte, pois a tensão está concentrada numa área muito mais reduzida.

Arrancamento – semelhantes às de clivagem, as tensões de arrancamento ocorrem quando um ou ambos os substratos são flexíveis. Consequentemente, o ângulo de separação tem tendência a ser maior para o arrancamento do que para a clivagem. Na Figura 8 pode-se verificar o efeito na distribuição da tensão, num adesivo frágil e num adesivo tenaz.

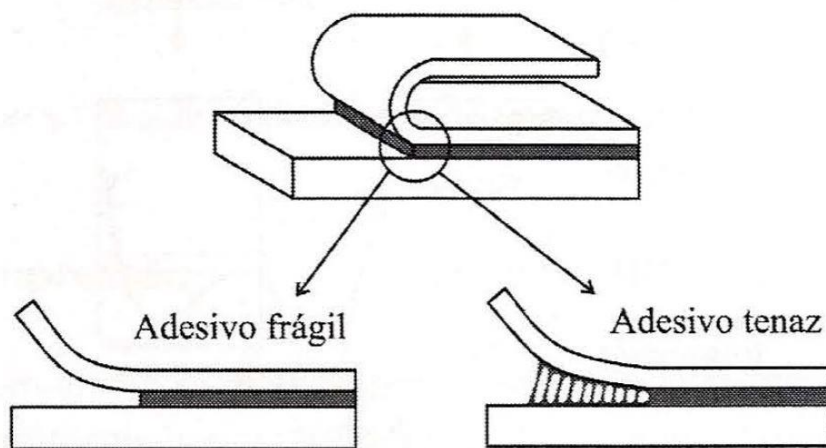


Figura 8 - Distribuição da tensão num adesivo frágil e tenaz [3]

O objectivo de uma ligação adesiva é a transmissão de carga entre os dois componentes ligados, mantendo a integridade estrutural estando sob o efeito de solicitações estáticas e ou dinâmicas, e em condições ambientes adversas. Assim sendo, é crucial proceder a

uma avaliação correcta e cuidada da distribuição do perfil de tensões, e os respectivos modos de rotura provocados por essas tensões. São três os modos de rotura existentes [3, 10] (ver Figura 9):

- **Rotura Coesiva no Adesivo:** rotura interna na região do adesivo, indicando que a resistência do adesivo é menor do que a resistência dos substratos e da ligação entre adesivo e substratos;
- **Rotura Coesiva no Substrato:** rotura ocorre pelo substrato. Este tipo de rotura indica que a resistência do substrato é inferior à da ligação adesiva;
- **Rotura Adesiva:** rotura que ocorre na interface entre o substrato e o adesivo. Esta rotura é conotada geralmente, com a má preparação das superfícies.

Por vezes, pode ocorrer uma **rotura mista** (ver Figura 9), que surge de uma combinação da rotura adesiva e coesiva. Esta rotura ocorre devido à limpeza ineficaz de uma dada região da zona de ligação, ou então à indevida aplicação do adesivo.

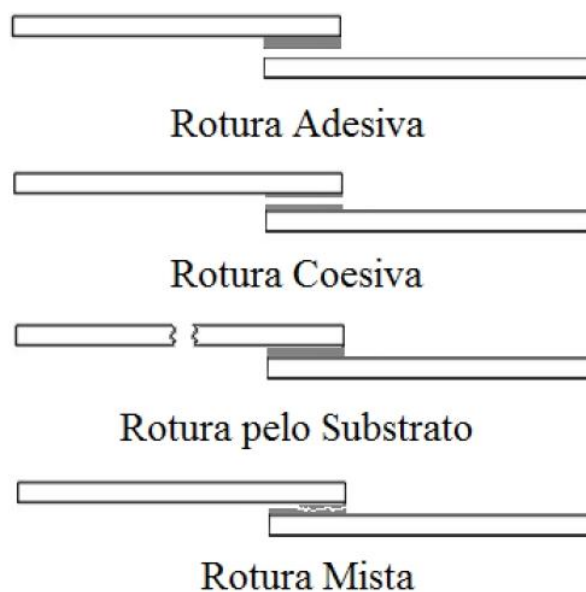


Figura 9 – Tipos de rotura numa JSS [11]

2.1.4 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas podem ter variadas configurações, sendo que as mais comuns e amplamente utilizadas, são as que estão presentes na Figura 10. De seguida, apresenta-se uma descrição mais pormenorizada destas configurações:

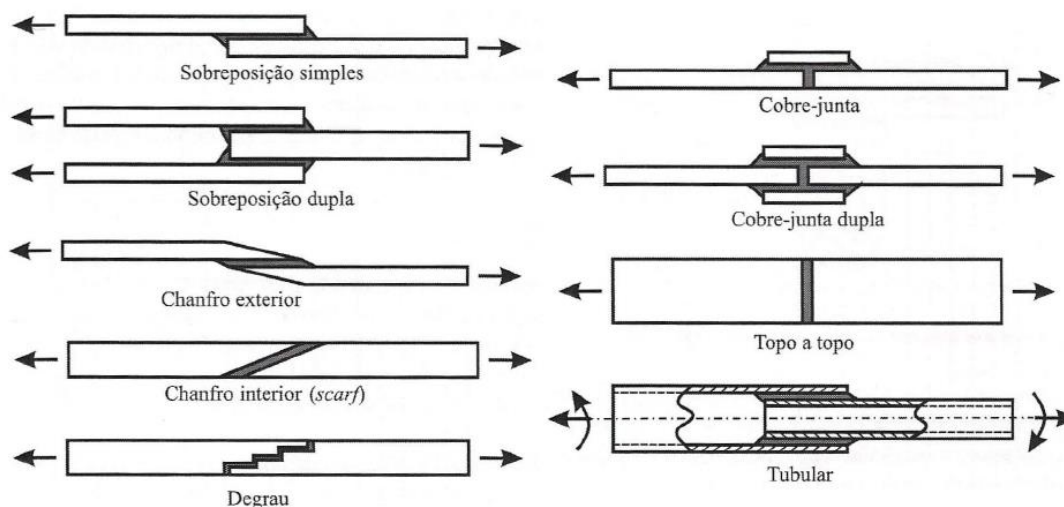


Figura 10 - Tipos de configuração de juntas adesivas [3]

Sobreposição Simples

De todas as configurações de junta, a de **sobreposição simples** é a mais frequentemente utilizada em aplicações industriais, pois é uma das mais fáceis de fabricar [12, 13]. No entanto, devido à aplicação descentrada da carga, provoca esforços de flexão que, por sua vez, originam o aparecimento de tensões de arrancamento, as quais provocam a diminuição da resistência da junta [14, 15]. Uma consequência da deformação gradual dos aderentes ao longo da sobreposição, é a existência de concentrações de tensões de corte nas extremidades [14, 15].

Sobreposição dupla

De forma a eliminar a flexão dos substratos, existe a alternativa de usar **juntas de sobreposição dupla**, pois neste tipo de juntas as tensões de arrancamento são consideravelmente inferiores. Este factor, conjugado com a diminuição dos gradientes de deformação dos aderentes na zona de sobreposição, resulta em que a resistência das juntas de sobreposição dupla, exceda o dobro da resistência das juntas de sobreposição simples. Consequentemente, o tempo de fabricação deste tipo de junta é mais elevado do que o da junta de sobreposição simples [14, 15].

Chanfro exterior

Nas **juntas de chanfro exterior**, a resistência da junta está directamente relacionada com o ângulo do chanfro na zona de sobreposição, pois quanto maior for a extensão do chanfro, maior será a resistência das juntas, que serão apenas limitadas pela resistência dos aderentes que ficam fragilizados devido à existência de chanfros. Tal comportamento, é causado pela diminuição de tensões de arrancamento na zona de

sobreposição, assim como pela diminuição dos gradientes de tensões de corte. A utilização deste tipo de juntas está limitada pelo facto de a sua fabricação ser bastante demorada, devido à dificuldade de maquinar as rampas necessárias para este tipo de juntas, principalmente as que têm um ângulo reduzido [16].

Chanfro interior e Degrau

As **juntas de chanfro interior e de grau** possuem uma elevada resistência, pois permitem a diminuição dos gradientes de tensão ao longo do adesivo [17]. Outro factor que contribui para a elevada resistência destas juntas, é a diminuição da excentricidade dos esforços. No entanto, tal como nas juntas de chanfro exterior, devido à dificuldade de maquinar as rampas (junta de chanfro interior) ou os degraus (juntas em de grau), o custo destas juntas é bastante mais elevado, relativamente às outras configurações [18].

Topo a topo

As **juntas topo a topo** planas, apesar do seu fácil fabrico (tal como as juntas de sobreposição simples) não apresentam uma resistência elevada, devido, em parte, à área de colagem relativamente reduzida, e de serem bastante susceptíveis a tensões de arrancamento. Juntando aos factores mencionados, esta configuração de junta não suporta esforços de flexão, sendo que o adesivo estaria sujeito a tensões de clivagem [19, 20].

Tubular

Esta configuração **de junta tubular**, que permite a união de tubos com extremidades planas ou em chanfro, tem como ponto forte uma boa resistência a esforços de tracção e compressão. Mas, de forma a tirar partido da boa resistência à compressão e tracção, o alinhamento relativamente ao eixo de revolução deve ser perfeito, caso contrário, poderiam gerar-se esforços de arrancamento. Para eliminar tais esforços são utilizados canais, chanfros e ressalto, de forma a facilitar a montagem dos componentes, aumentando a área de contacto e a resistência ao arrancamento por efeito mecânico. Para garantir que o adesivo preenche toda a cavidade, podem ser utilizados orifícios para a injeção do adesivo, e a abertura de canais para a saída do ar [21, 22].

Cobre-Junta e Cobre-junta dupla

As **cobre-junta e cobre-junta dupla**, são tipicamente associadas à ligação de aderentes que devem permanecer colineares, ou à reparação de estruturas danificadas. No caso da reparação, são criados caminhos alternativos para a transferência de esforços, por meio de um ou mais remendos aplicados na zona da descontinuidade. Tal como as juntas de sobreposição simples e dupla, as cobre-junta e cobre-junta dupla, também

estão sujeitas a esforços de arrancamento, sendo que apresentam resistência superior às juntas de sobreposição simples, se bem que no caso da reparação de uma cobre-junta dupla, não seja possível aceder a ambos os lados da estrutura, para aplicação do remendo [16].

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais, são adesivos usados em aplicações permanentes, necessitando de elevada resistência. Um adesivo estrutural é definido como um adesivo que resiste a forças substanciais, e tem uma resistência ao corte de pelo menos 7 MPa. Existem vários tipos de adesivos estruturais, e os principais são [3]:

- Adesivos Epóxicos;
- Adesivos Fenólicos;
- Adesivos Acrílicos;
- Adesivos de Poliuretano;
- Adesivos de Poliaromáticos.

Os **adesivos epóxicos** têm uma vasta aplicação no mercado aeronáutico e automóvel. São adesivos termoendurecíveis bastante versáteis, devido ao facto de terem boa adesão a muitos substratos e poderem ser modificados com facilidade, de forma a atingir um maior leque de propriedades. Têm uma excelente resistência às tensões de tracção, ao corte e à fluência, mas são susceptíveis às tensões de arrancamento. São também bastante resistentes ao óleo, humidade e variados solventes. Os epóxicos com cura a altas temperaturas vêm aumentada a sua resistência ao corte e ao meio ambiente, mas em contrapartida, ficam menos tenazes e acentuam ainda mais a sua já fraca resistência ao arrancamento. Estes adesivos são muitas vezes modificados, quando é preciso enaltecer algumas propriedades necessárias para alguma aplicação específica, como por exemplo, o uso de elastómeros para melhorar a resistência ao impacto e ductilidade [3].

Os **adesivos fenólicos** são aplicados, principalmente na colagem de madeira, mas devido ao seu preço reduzido, boa resistência ao calor e boa estabilidade dimensional, têm também sido usados em calços de travão, discos abrasivos, lixas e moldes de fundição. São também utilizados para ligar metal a madeira, no entanto, a ligação é frágil e é susceptível de estilhaçar sob impacto ou vibração. Estes adesivos são geralmente aplicados como uma solução em água, álcool ou acetona. Quando aplicados em madeira, dão origem a uma junta geralmente superior a este substrato. Apresentam boa durabilidade, boa resistência a fungos e a água a altas temperaturas. O facto de as baixas temperaturas terem pouco impacto nas suas propriedades, torna este adesivo uma óptima escolha para aplicações exteriores, mesmo em climas frios [3].

Existem ainda os Fenólicos híbridos e, dentro desta categoria, os **vinilo-fenólicos**, são os adesivos estruturais para metal usados com mais sucesso, isto devido à sua excelente resistência ao corte e arrancamento, sendo possível atingir resistências ao corte de 35 MPa à temperatura ambiente. No entanto, têm uma temperatura de serviço baixa, de apenas 95°C [3].

Os **adesivos acrílicos** estão divididos em três grupos [3]: adesivos **anaeróbicos**, **cianoacrilatos** e **acrílicos modificados**.

Os **adesivos anaeróbicos** são essencialmente líquidos, que polimerizam para formar uma ligação tenaz, quando usados para ligar metais. Estes adesivos podem ligar todos os metais, vidro, cerâmicos e plásticos termoendurecíveis. Os anaeróbicos são apropriados para aplicações estruturais (elevada resistência ao corte em juntas planas) e de maquinaria (elevada resistência em conjuntos roscados e outras juntas). A sua temperatura máxima é de 150°C, podendo alguns resistir a temperaturas de 230°C. Têm boa resistência à humidade e solventes [3].

Os **adesivos cianoacrilatos** são líquidos de um só constituinte de cura rápida, excelente resistência ao corte e boa *shelf life*. No que diz respeito à cura, são semelhantes aos anaeróbicos, mas têm rigidez mais elevada, embora sejam menos resistentes à humidade. Os cianoacrilatos aderem bem a variados substratos, têm baixa resistência ao calor, assim como ao arrancamento e impacto. A nível estrutural, só são aplicados em locais onde o meio ambiente não é demasiado severo, e que seja precisa uma ligação de execução rápida. Além disso, também são bastante caros [3].

Os **acrílicos modificados** são geralmente utilizados em operações automatizadas, isto devido à sua rápida cura e alta resistência (20-35 MPa). Têm também boa resistência ao arrancamento e ao impacto entre os -100 e 120°C, e boa resistência à alta humidade.

Os **adesivos de poliuretano** são flexíveis e formam ligações com boa tenacidade. Têm uma elevada resistência ao corte e arrancamento, boa resistência a baixas temperaturas e também boa resistência química. A sua resistência a altas temperaturas, uma vez que a sua temperatura máxima é de 150°C, e quando expostos a altos níveis de humidade alguns destes adesivos, ficam bastante degradados. Os adesivos de poliuretano, devido à sua boa molhabilidade e flexibilidade, aderem bem a muitos substratos (muito bom em substratos de madeira), e são usados para ligar filmes, folhas metálicas e elastómeros, e são também muito utilizados na indústria automóvel, na adesão de painéis moldados por estampagem.

Os **adesivos poliaromáticos** são usados essencialmente na indústria aeroespacial, devido à sua elevadíssima resistência a altas temperaturas. O seu uso está limitado, devido ao elevado custo e dificuldade de processamento. Nestes adesivos, destacam-se

as poliimidas e as bismaleimidas. As poliimidas foram desenvolvidas principalmente pela NASA, e são as que possuem a mais elevada resistência a altas temperaturas, mas também são as que possuem o processamento mais difícil. As bismaleimidas são usadas no fabrico de painéis de circuitos electrónicos, e em aplicações que precisam de uma boa resistência a temperaturas elevadas, mas não tanto como as poliimidas. Devido à sua elevada rigidez, possui fraca resistência ao arrancamento. No entanto, é mais fácil de processar do que as poliimidas [3].

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a inexistência de modelos materiais precisos e critérios de rotura adequados, levou ao sobredimensionamento das juntas adesivas, que, invariavelmente, resultou em estruturas mais pesadas e caras. Com a disponibilização de metodologias de previsão e *design* viáveis, emergiram novas possibilidades para o uso eficaz de juntas adesivas. Podem ser escolhidas duas alternativas, para a análise de juntas adesivas: análises de forma fechada (método analítico), e métodos numéricos (e.g. análise de elementos finitos). O estudo de juntas adesivas remonta a 1930, com o modelo de forma fechada de Volkersen [23], que considera os materiais completamente elásticos e deformação do adesivo apenas em corte. No entanto, a formulação analítica das juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo deforma plasticamente, se forem utilizados aderentes compósitos, ou se forem utilizados diferentes aderentes. A técnica mais popular para juntas adesivas é a dos Elementos Finitos, e Adams e os seus colaboradores foram pioneiros nesta técnica [24]. Harris e Adams [25] foram os primeiros a estudar o efeito da rotação da junta, os aderentes e a plasticidade do adesivo e a influência do *fillet* de adesivo. Inicialmente, foi considerada a abordagem da mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas adesivas, requerendo distribuição da tensão e critérios de rotura adequados. A análise de elementos finitos, também pode ser usada em conjunto com critérios de Mecânica da Fractura para a previsão de resistência, quer pelos factores de intensidade de tensão, ou por uma abordagem energética, como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). No entanto, com estas técnicas, é bastante trabalhoso simular o crescimento de fendas, devido à necessidade de refazer a malha durante a análise, e ao consequente custo computacional associado [26]. Nas últimas décadas, foram feitos grandes desenvolvimentos, sendo que um deles foi a modelação do dano por combinação de Elementos Finitos com elementos coesivos. Esta técnica combina modelação de Elementos Finitos convencional, para as regiões que estão previstas não sofrer dano, e uma abordagem de Mecânica da Fractura através de elementos coesivos, para estimular o crescimento de fendas. Uma alternativa muito recente ao modelo de propagação de fendas no interior dos materiais, é o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFE),

que usa funções de forma enriquecidas, para representar um campo de deslocamentos descontínuo.

2.2.1 Modelos analíticos

Nas primeiras análises de estruturas adesivas, os métodos de previsão consistiam em formulações analíticas, e os trabalhos de Volkersen [23], e Goland e Reissner [27]. foram precursores de vários estudos teóricos. que tinham a vantagem da simplicidade para alcançar os campos de tensão nas estruturas de junta adesiva. devido ao facto de aplicarem pressupostos simplificados em termos de geometria da estrutura, carga, e condições de fronteira, resultando em soluções elásticas de forma fechada eficazes. Assim, cada junta pode ser analisada rapidamente, embora sendo condicionada por bastantes pressupostos [28]. Com estes modelos, as deformações e tensões podem ser facilmente calculadas, juntamente com a distribuição do momento flector na estrutura. A resistência era tipicamente prevista através de critérios baseados na tensão ou deformação. Até aos nossos dias, estes estudos foram progressivamente substituídos por análises numéricas, se bem que os estudos teóricos também foram sendo aprimorados ao longo dos anos, em termos de capacidade de modelação, por exemplo, em termos de contabilização de não linearidade material da camada adesiva [29], ou consideração de uma análise não linear geométrica [30].

2.2.2 Métodos numéricos

2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Na abordagem da mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos pela análise de elementos finitos, são geralmente usados num critério de rotura para estimar a resistência das estruturas. Isto é conseguido quando os valores estimados, obtidos por critérios de tensão ou deformação (i.e., Critério de Tensão Normal Máxima, ou Critério de Deformação Máxima ao Corte), atingem a resistência dos constituintes da estrutura. Esta abordagem, foi prontamente aplicada em juntas estruturais de uso geral, pouco depois de o método de Elementos Finitos (MEF) e programação computacional estarem disponíveis (i.e. [25]). As vantagens desta técnica incluem a análise de juntas com ou sem dano inicial, e sob cargas aleatórias. De qualquer forma, estes critérios possuem uma limitação intrínseca, tendo em conta que as juntas são susceptíveis a singularidades de tensões no fim das zonas de sobreposição, devido a arestas vivas. Como resultado, numa análise de elementos finitos de uma junta, as tensões numa região singular aumentam com o refinamento da malha, e não é atingida convergência, dando origem a previsões dependentes da malha [28]. Ao longo dos anos, foram introduzidas melhorias nesta técnica de modelação, tal como a definição de critérios de rotura mais

complexos, baseados em tensão e deformação para diferentes materiais e mecanismos de rotura, ou combinações com modelos contínuos mais realistas, mas, mesmo assim, não se conseguiu evitar a dependência da malha.

2.2.2.2 Mecânica da fractura

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e o seu material são contínuos. Como tal, defeitos ou dois materiais com cantos reentrantes, não são, obviamente, consistentes com tal suposição. Consequentemente, a mecânica dos meios contínuos não oferece solução nestes pontos singulares, resultando em tensões ou deformações singulares. Por outro lado, as fendas são o defeito mais comum nas estruturas, para as quais foi desenvolvida a mecânica da fractura, onde é bem aceite que as tensões calculadas usando a mecânica dos meios contínuos, são singulares (infinitas) na extremidade da fenda. Nas actuais teorias da mecânica, tal singularidade existe sempre que o ângulo da fenda é inferior a 180° . Este resultado foi descoberto por Williams [31], para singularidades de tensões num entalhe em cunha. Este argumento também é aplicável para a singularidade de tensão em dois materiais unidos, com cantos reentrantes. A mecânica da fractura tem sido aplicada com sucesso em muitos problemas de engenharia, recentemente. Muitos estudos que lidam com juntas adesivas, usam a taxa de libertação da energia de deformação, G , e o respectivo valor crítico, ou a resistência à rotura G_c [32, 33], em vez de factores de intensidade de tensão, pois estes não são tão facilmente determináveis quando a fenda cresce na interface, ou perto desta. Contudo, a rotura de juntas adesivas ocorre inerentemente em modo misto, por causa da variação de propriedades que ocorre entre os diferentes materiais e o complexo estado de tensão. Os critérios de rotura para o modo misto, podem ser desenvolvidos de forma análoga aos critérios de rotura clássicos, embora deva ser introduzido o conceito de superfície de fractura.

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo (MDC)

A implementação computadorizada dos métodos da Mecânica da Fractura Linear Elástica (MFLE), teve grande sucesso há algumas décadas atrás, mas estes métodos estavam limitados a plastificação reduzida na vizinhança da extremidade da fenda. Para além disso, os adesivos dúcteis modernos, desenvolvem zonas plásticas sob tensão que podem ser maiores que a espessura do aderente. Os Modelos de Dano Coesivo (MDC) foram desenvolvidos no final dos anos 50 e inícios de 60 [34], para descrever o dano sob cargas estáticas na zona coesiva próxima da extremidade da fenda, dando uma solução promissora para métodos mais refinados de previsão de dano em estruturas adesivas. A partir daí, os MDC foram amplamente testados para simular o início do aparecimento de fendas, e a sua propagação em situações de rotura coesiva, rotura na interface ou delaminação de compósitos. Os MDC podem ser implementados em elementos de

mola, ou mais convencionalmente em elementos coesivos [35], e podem ser facilmente incorporados numa análise de Elementos Finitos convencional, para modelar o comportamento de rotura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [36]. O conceito principal dos MDC é que uma ou várias interfaces/regiões de rotura podem ser introduzidas artificialmente nas estruturas, nas quais o aumento do dano é permitido pela introdução de uma possível descontinuidade no campo do deslocamento. Isto torna-se possível pela definição das leis de tracção-separação, para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis do MDC são aplicadas entre pares de nós de elementos coesivos, e podem ligar nós sobrepostos de elementos, representando diferentes materiais ou diferentes camadas em materiais compósitos, ou podem ser aplicadas directamente entre dois materiais que não estejam em contacto para simular uma camada fina, i.e., para simular uma ligação adesiva. Os MDC providenciam uma reprodução macroscópica do dano, através da relação tracção/deslocamento entre nós homólogos ao longo do trajecto da fenda, que depende de parâmetros de grande escala que dominam o processo de crescimento da fenda, tal como as energias de fractura. Os MDC permitem modelar a evolução da resistência e o amaciamento até à rotura, para contabilizar a degradação gradual das propriedades dos materiais. As leis de tracção-separação são tipicamente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carga [37], se bem que uma ou mais etapas podem ser definidas de forma diferente, para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais.

2.2.2.4 Mecânica do dano

Nestas metodologias, é estabelecido um parâmetro de dano para modificar a resposta constitutiva dos materiais, pela depreciação da rigidez ou resistência, i.e., para ligações adesivas finas [38], delaminações de compósitos ou rotura da matriz [39], para representar a severidade do dano do material, quando solicitado. Esta variável de dano pode ser usada numa lei de evolução do dano, para modelar tanto o dano na pré-rotura, como o crescimento da fenda. As variáveis de dano podem ser divididas em dois grupos principais: (1) variáveis que prevêm a quantidade de dano pela redefinição das propriedades constitutivas do material, mas que não estão directamente relacionadas com o mecanismo de dano, e (2) variáveis relacionadas com a definição física de um tipo específico de dano, tal como porosidades ou uma área relativa de micro-cavidades [40]. O crescimento do dano é definido como uma função da força aplicada, para análises estáticas, ou do número de ciclos para análises de fadiga. Para juntas adesivas, existem poucos trabalhos que empreguem esta técnica. Comparando com a modelação à fadiga por MDC, as técnicas da Mecânica do dano não providenciam uma distinção clara entre a iniciação da fadiga e as fases de propagação, se bem que estas técnicas possam servir como base para uma análise mais detalhada [38]. No entanto, pode ser simulada a evolução do dano anterior ao crescimento da fenda. Por outro lado, a modelação de fadiga por MDC, encontra-se restrita a caminhos de rotura pré-definidos e, como tal, em

aplicações específicas, pode ser recomendada a mecânica do dano, se o dano for generalizado no componente, ou se não for conhecido o trajecto da fenda [41].

2.2.2.5 Método de Elementos Finitos Extendido (MEFE)

O MEFE é uma melhoria recente do MEF, para prever o crescimento do dano em estruturas. Este método utiliza leis de dano para a previsão da fractura, que se baseiam na resistência em maciço dos materiais para a iniciação do dano, e na deformação para a avaliação da rotura (definida por G_{nc}), em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 usados nos MDC. O MEFE ganha vantagem em relação aos MDC, uma vez que não requer que a fenda siga um caminho previamente definido. Na realidade, é permitido que as fendas cresçam livremente dentro de uma região maciça de um material, sem ser necessário que a malha acompanhe a geometria das descontinuidades, nem refazer a malha na extremidade da fenda [42]. Este método, é uma extensão relativamente ao modelo de Elementos Finitos, cujas principais características foram apresentadas primeiramente no final dos anos 90 por [43]. O MEFE depende do conceito de partição de unidade, e pode ser implementado no método tradicional de Elementos Finitos, através da introdução de funções enriquecidas locais, para os deslocamentos nodais junto à fenda, para permitir o seu crescimento e separação entre as faces da fenda [44]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade da mesma muda continuamente a sua posição e orientação, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, simultaneamente criando funções enriquecidas, necessárias para os nós dos elementos finitos à volta do trajecto da fenda.

2.3 Juntas adesivas sujeitas a esforços de tracção no plano

Nos subcapítulos seguintes, usando vários estudos como referência, será visto em maior detalhe as propriedades de configuração de junta mais relevantes, nomeadamente as juntas de sobreposição simples, juntas de sobreposição dupla, juntas em degrau e juntas de chanfro interior.

2.3.1 Juntas de sobreposição simples

No estudo de Karachalios et al. [45], foram testadas, à tracção, juntas de sobreposição simples, com variadas configurações geométricas e diferentes materiais. No trabalho referido, foram estudados, experimentalmente e numericamente, aderentes de aço de baixa resistência (aço macio DIN St37 e aço carbono DIN C60). Foram testados parâmetros geométricos como o comprimento de sobreposição e a espessura do aderente, juntamente com parâmetros do material, como o comportamento face à tensão-deslocamento do adesivo. Na Figura 11 pode-se verificar o comportamento

tensão/deslocamento dos dois tipos de aço utilizados neste estudo, face a um aço de elevada resistência usado num estudo anterior, que serve como elemento comparativo.

Para os aços de baixa resistência, a cedência do aderente ocorre durante o carregamento da junta, sendo que a interpretação do mecanismo de rotura da junta é radicalmente diferente daquela usada nos aços de alta resistência. A cedência do aderente ocorre geralmente em estruturas nas quais materiais como o alumínio (aeronáutica) e o aço macio (automóvel) são usados, logo, é importante determinar os mecanismos de falha envolvidos.

Após realizado o estudo, chegou-se à conclusão que, no caso das juntas em aço macio e aço carbono, a falha é principalmente causada por tensões locais na extremidade da sobreposição. Quando o aderente entra no estado plástico, são desenvolvidas elevadíssimas tensões localizadas na extremidade da junta, devido a uma grande deformação plástica dos aderentes, e um ligeiro aumento na carga aplicada, resulta em grandes incrementos nas tensões localizadas. É, assim, criada uma condição instável, e existe um limite para a carga acima da qual a rigidez global da junta decresce drasticamente, que é quando a secção transversal se torna plástica. A resistência da junta é, assim, dominada pelas propriedades mecânicas dos aderentes, excepto para comprimentos de sobreposição muito reduzidos.

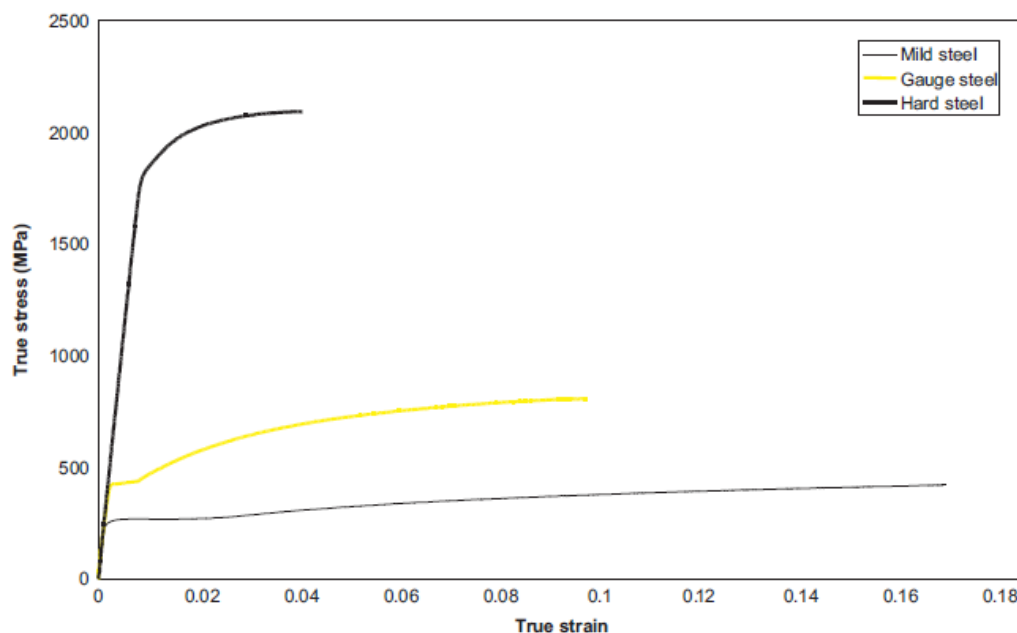


Figura 11 - Curvas de tensão-deslocamento para diferentes aderentes em aço [45]

Neste estudo, de Seong et al. [46], foi elaborado um estudo experimental de juntas adesivas de sobreposição simples, utilizando materiais dissimilares. Neste caso, um dos

aderentes foi um compósito de fibra de carbono, e o outro, alumínio (Figura 12). Para a colagem da junta, foi utilizado um adesivo de elevada resistência, o FM73m, produzido pela Cytec. Este estudo teve como objectivo principal investigar os efeitos de variados parâmetros, tais como a pressão de colagem, comprimento de sobreposição, espessura do aderente e tipo de material, numa situação de carga de rotura e modos de falha em juntas de materiais dissimilares. Em juntas metálicas, a rotura ocorre normalmente no adesivo. Em todas as juntas de material dissimilares testadas, a rotura ocorreu sempre por delaminação do aderente compósito.

Após os testes e posterior análise dos modos de rotura, deparou-se com uma combinação de delaminação e rotura na interface. No entanto, a delaminação do aderente compósito foi a maior causa de rotura. Um aumento da pressão de colagem, melhorou a resistência da junta. Também se concluiu que, quando se usa o adesivo FM37m para a colagem de juntas de compósito com alumínio, deve ser utilizada uma pressão de pelo menos 4 atm para a colagem. A tensão de rotura é também influenciada pelo comprimento de sobreposição. No entanto, esta não é directamente proporcional ao comprimento de sobreposição. Quando o comprimento de sobreposição era superior a 25 mm, ou o rácio do comprimento de sobreposição com a largura era superior a 1, a tensão de rotura não tinha um aumento substancial. Desta forma, pode-se concluir que a máxima eficiência pode não ser obtida quando este rácio é muito superior a 1.

Ao contrário da curva de tensão-deslocamento de uma junta de compósito, foi encontrada deformação plástica na junta compósito alumínio, quando a rigidez do alumínio era inferior. O estudo experimental também revelou que uma maior espessura do aderente, resultaria numa maior resistência da junta, e conseqüente aumento da tensão de rotura. No entanto, quando duplicada a espessura do aderente, só se notou um aumento de entre 12 a 32% na resistência da junta.

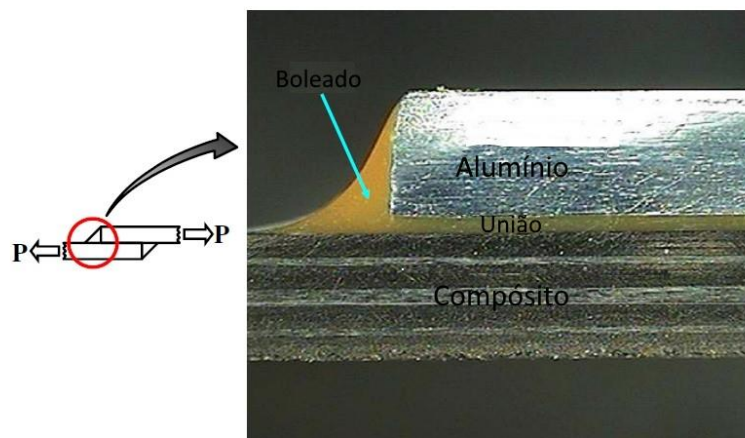


Figura 12 - JSS com aderentes dissimilares (alumínio e compósito de carbono)

O estudo de Sousa et al. [47], tem como alvo comparar diferentes métodos numéricos e analíticos, para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples com variados comprimentos de sobreposição ($L_0=12,5, 25, 37,5$ e 50 mm). O principal objectivo é fazer uma avaliação, de forma a escolher o melhor método de previsão. Na produção das juntas, foi utilizado o alumínio AW6082 T651 como material aderente. Como adesivos, foram utilizados o Araldite® AV138 (adesivo epóxico frágil), o Araldite® 2015 (adesivo epóxico moderadamente dúctil) e o Sikaforce® 7888 (adesivo de poliuretano dúctil). Para a análise analítica, foram utilizados diversos modelos, o de Volkersen, Goland e Reissner, Hart-Smith e por fim, o critério de cedência global de falha (CG). Para a análise numérica, foram utilizados o MDC e o MEFE.

Foi demonstrado, através dos resultados experimentais, que a carga máxima é muito dependente das características dos adesivos. No caso do AV138, que é um adesivo frágil, o aumento do comprimento de sobreposição não surte grande efeito na carga máxima. O 2015, devido à sua ductilidade, após atingidas as tensões limite, permite manter a integridade da junta, pois entra no regime plástico, o que resulta num aumento de desempenho para maiores valores de comprimento de sobreposição. Já o 7888 combina resistência com ductilidade, o que resulta no melhor desempenho para todas as gamas de comprimento de sobreposição testadas. Na Figura 13, é apresentada uma comparação entre valores analíticos e experimentais para os vários adesivos, relativamente à tensão máxima em função do comprimento de sobreposição.

Quanto aos métodos analíticos, estes demonstram que só conseguem dar resultados moderadamente viáveis em condições muito específicas. O modelo de Volkersen é preciso na previsão do comportamento de adesivos frágeis em pequenos comprimentos de sobreposição, mas falha para comprimentos maiores e para adesivos dúcteis, independentemente do comprimento de sobreposição. Os modelos elásticos de Goldand e Reissner e de Hart-Smith, fizeram uma previsão subestimada de todos os adesivos para todas as configurações de junta. O modelo plástico de Hart-Smith foi o melhor para todos os adesivos. O critério CG foi preciso para adesivos de grande ductilidade, média ductilidade para pequenos comprimentos, mas não adequado para adesivos frágeis.

Relativamente aos modelos numéricos, o MDC com lei triangular revelou ser altamente preciso, com excepção de juntas com adesivos bastante dúcteis. A análise com o MEFE não foi adequada, especialmente para o crescimento da fenda em modo misto. Como resultado desta limitação, a previsão da carga máxima foi baseada em associar este valor com o início da fenda no adesivo.

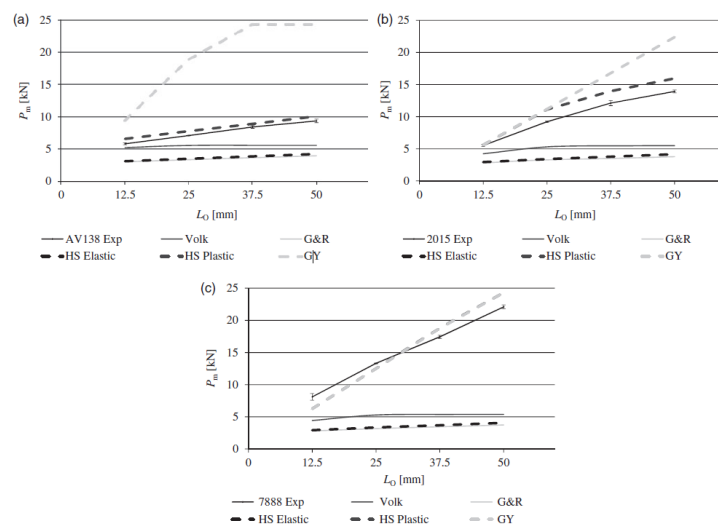


Figura 13 - Avaliação da carga máxima em função do comprimento de sobreposição: Resultados experimentais vs. Analíticos, para os adesivos Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e Sikaforce® 7888 (c) [47]

2.3.2 Juntas de sobreposição dupla

Um estudo de Campilho et al. [48], que teve como objectivo testar duas técnicas utilizadas para a previsão da resistência de juntas adesivas, o MDC e o MEFÉ, refere uma avaliação comparativa das suas capacidades e/ou limitações, sendo esta avaliação específica para juntas adesivas de sobreposição simples e dupla.

Para efectuar esta avaliação, foi utilizado o ABAQUS®, para simular o comportamento da resistência de juntas adesivas. As juntas de sobreposição simples e dupla, usaram alumínio como aderente, e o adesivo frágil Araldite® AV138. Foram testados diversos comprimentos de sobreposição, entre 5 e 20 mm, de forma a se poder testar ambas as configurações, no que diz respeito ao modelo de fractura, sob diferentes gradientes de carga. A comparação directa entre os dados experimentais e os resultados obtidos das simulações (Figura 14), revelaram previsões precisas para a técnica de MDC, algo que era esperado, uma vez que esta técnica foi extensivamente validada para diversos problemas de engenharia, sendo expectáveis resultados positivos se a forma das leis coesivas escolhidas for consistente com o comportamento do material simulado. O MEFÉ, da forma como está actualmente implementado, mostrou não ser adequado para a propagação de dano em juntas adesivas, uma vez que a direcção do crescimento da fenda é regida pelo máximo das principais tensões/deformações na extremidade da fenda, que em juntas adesivas leva, invariavelmente, à propagação do dano em direcção aos aderentes, e dentro deles. Isto não reflecte o comportamento das juntas adesivas, e pode ser atribuído a um algoritmo de propagação não adequado a estruturas de diversos materiais, uma vez que este não procura pontos de falha fora da extremidade da fenda, nem segue as interfaces entre os diferentes materiais. Devido à

fragilidade do AV138, o MEFE foi usado, com resultados satisfatórios em termos de dependência do comprimento de sobreposição, na previsão da rotura pelo início do dano nas extremidades da sobreposição. No entanto, é extremamente dependente da malha.

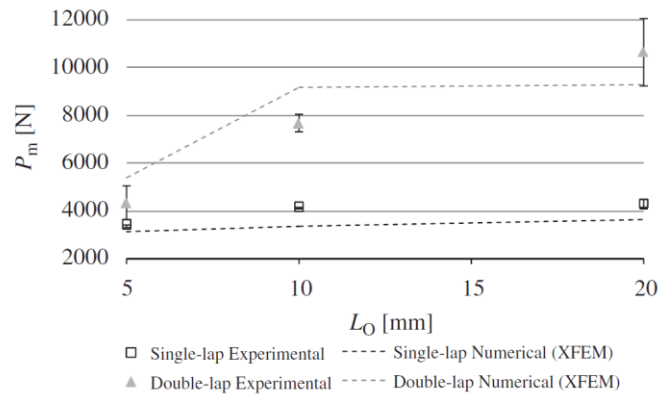


Figura 14 - Valores experimentais e numéricos (MEFE) da força máxima (P_m), em função do comprimento de sobreposição (L_O) [48]

Num estudo de Nunes et al. [49], é comparado o desempenho à tracção de três adesivos, Araldite® AV138 (resistente e frágil), Araldite® 2015 (menor resistência, mas dúctil) e Sikaforce® 7888 (elevada resistência e ductilidade), em juntas de sobreposição simples e dupla em alumínio, com diversos comprimentos de sobreposição. Foi feita uma análise numérica, usando o MDC, de forma a analisar a tensão normal e de corte na camada adesiva, através da espessura da mesma, para estudar a variável de dano do MDC e para prever a resistência da junta. Também foi feita uma comparação usando métodos analíticos. A análise das tensões e das variáveis de dano, ajudam a perceber as diferenças entre adesivos.

Os resultados obtidos (Figura 15), demonstram que o comportamento da junta é bastante dependente do tipo de adesivo utilizado. O Araldite® AV138, devido ao seu valor elevado de módulo de elasticidade, apresenta um maior pico de tensões. Devido à sua elevada fragilidade, o aumento do comprimento de sobreposição tem um efeito limitado no aumento da tensão máxima tanto para as juntas de sobreposição simples como para as juntas de sobreposição dupla. Por outro lado, o Araldite® 2015 permite que a junta adesiva entre no domínio plástico quando as tensões limite são atingidas, o que resulta num aumento do desempenho. O Sikaforce® 7888 combina elevada resistência com ductilidade, sendo que resulta num melhor desempenho para quaisquer valores do comprimento de sobreposição. Para valores do comprimento de sobreposição maiores, algumas das configurações de juntas testadas (com o Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888) experienciaram a plasticização do aderente, provocando plasticização do adesivo, que deu origem a rotura prematura, ou mesmo rotura do aderente, em vez de rotura na junta adesiva.

Em termos globais, pode ser concluído que o Sikaforce® 7888 é recomendado para todas as configurações e respectivos comprimentos de sobreposição testados. Para comprimentos menores, o AV138 consegue obter valores comparáveis aos dos outros adesivos, mas perde quando se aumenta o comprimento de sobreposição.

O modelo numérico usado (MDC), mostrou ser bastante preciso na previsão da resistência das juntas, com excepção das configurações de junta que sofreram rotura na junta adesiva com o Sikaforce® 7888, devido à grande ductilidade do adesivo.

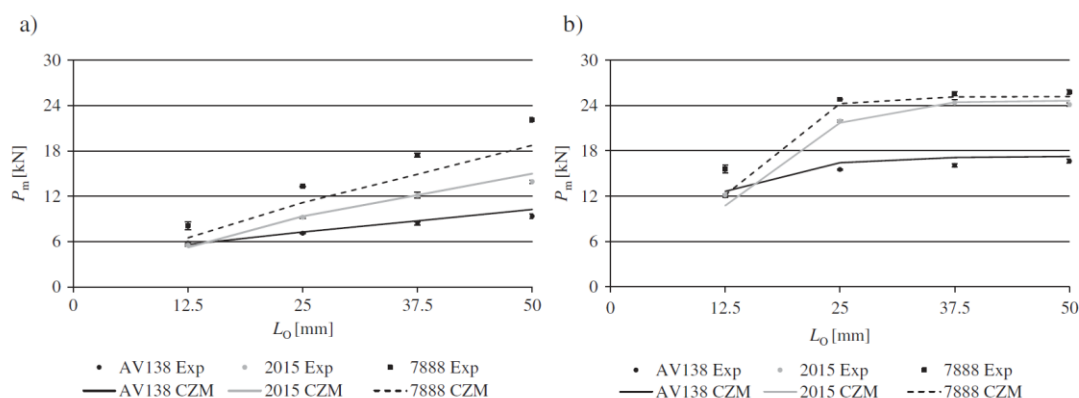


Figura 15 - Força máxima (P_m) em função de L_0 para os três adesivos: valores experimentais e numéricos para JSS (a) e JSD (b) [49]

2.3.3 Juntas com chanfro interior

Um estudo de Gacoin et al. [50], teve como objectivo investigar a influência da geometria interna de uma junta de chanfro interior dupla, no que diz respeito à evolução do dano na junta adesiva. Para tal, foram executados minuciosos testes instrumentais para caracterizar o processo do dano. A abordagem passou por comparar o comportamento micromecânico de juntas adesivas de chanfro interior simples e duplas com o mesmo ângulo.

A análise experimental revela que para a junta de chanfro interior dupla, a resistência é melhor quando o ângulo de chanfro interior é maior que $\alpha=18^\circ$. Quando $\alpha < 18^\circ$, esta tendência é revertida por causa de sobretensões no topo da junta de chanfro interior dupla, que provocam o aparecimento das primeiras microfissuras. Para $\alpha=6^\circ$, o início do dano aparece na singularidade criada pela geometria da junta de chanfro interior dupla. Esta configuração torna-se menos resistente, quando comparada com a junta de chanfro interior simples com um ângulo $\alpha=6^\circ$.

A comparação dos dados teóricos (obtidos por elementos finitos) com os dados experimentais (Figura 16), revela a viabilidade do modelo numérico de ter em conta os efeitos das tensões singulares, criadas pela geometria da junta de chanfro interior dupla.

Os resultados numéricos também prevêem, com precisão, a evolução real do dano das juntas de chanfro interior. Os resultados obtidos mostram que o melhor comportamento da junta de chanfro interior, é quando o ângulo é mais baixo que $\alpha=18^\circ$.

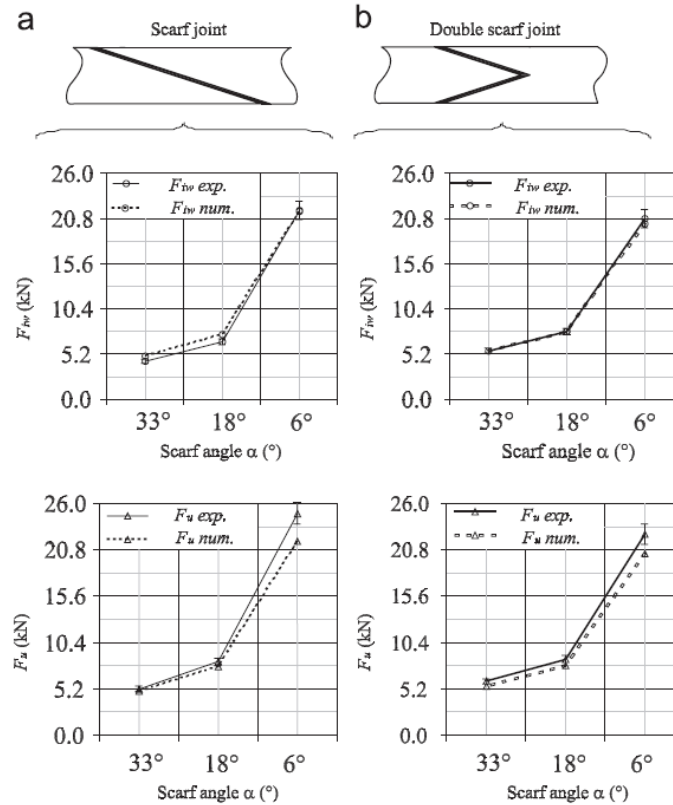


Figura 16 – Resultados experimentais e numéricos para o início de microfissuras (F_{iv}) e rotura total (F_u), para junta de chanfro interior (a) e chanfro interior dupla (b) [50]

Um trabalho de Campilho et al. [51], apresenta um estudo experimental e numérico do comportamento à tracção de juntas adesivas de reparação de chanfro interior, de compósito de fibra de carbono epóxico, usando ângulos que variam entre os 2° e os 5° (Figura 17). Foi utilizado um MDC misto adequado a adesivos dúcteis, para simular a camada adesiva. Diferentes leis coesivas foram utilizadas para simular a rotura interlaminar, intralaminar transversa e da fibra, uma vez que foi observada experimentalmente uma rotura coesiva mista interlaminar-intralaminar para as amostras com ângulo mais reduzido. Estas leis foram previamente determinadas através de um método inverso. O modelo de performance foi avaliado, comparando resultados numéricos com resultados obtidos experimentalmente (Figura 18), em termos de rigidez inicial da reparação, tensão máxima e respectivo deslocamento, assim como o trajecto de falha até completa separação, considerando diferentes ângulos de chanfro interior. Foi encontrada uma boa correlação nestes aspectos, e foi concluído que a metodologia apresentada pode ser aplicada com sucesso para prever o comportamento mecânico destas estruturas.

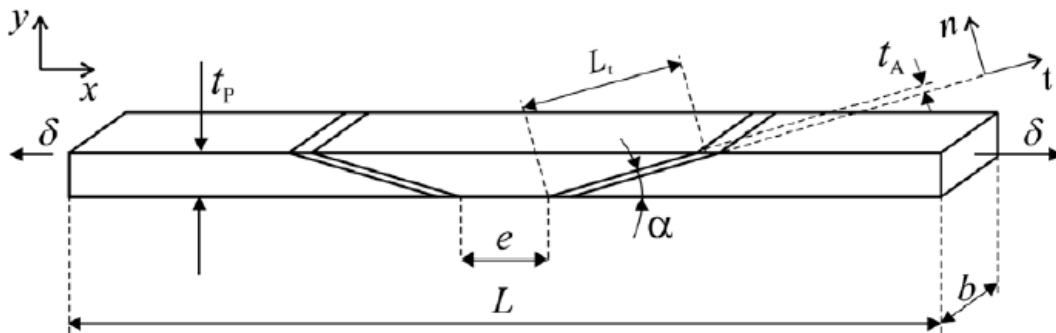


Figura 17 - Geometria da junta de reparação de chanfro interior [51]

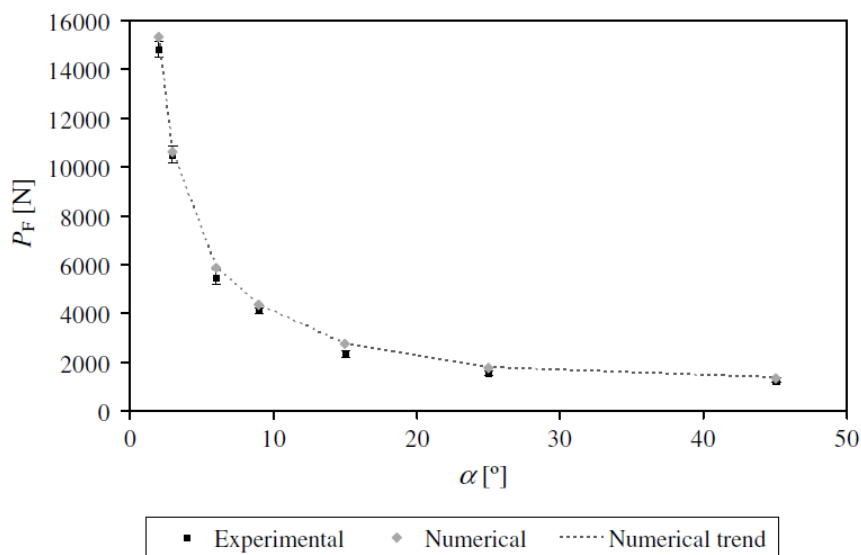


Figura 18 - Carga máxima (valores numéricos e experimentais) em função do ângulo de chanfro interior [51]

Num trabalho de Ridha et al. [52], foi realizado um estudo paramétrico no que diz respeito à análise da falha progressiva da reparação, com uma junta de chanfro interior num painel composto (Figura 19). Este estudo revela que o MEF, juntamente com o método de degradação das propriedades do material e critérios de micromecânica da rotura, permite previsões precisas da tensão de rotura em amostras danificadas e não-danificadas. Estudos paramétricos referentes às leis de tracção-separação do adesivo, resistência e dureza, relativamente à tensão global de rotura de um painel reparado, mostram que o modelo que usa a lei exponencial da tracção-separação é insensível à resistência do adesivo, enquanto que modelos que usam leis lineares ou trapezoidais, são sensíveis, tanto à resistência como à rigidez do adesivo. Sendo assim, é mais simples calibrar para a lei exponencial, uma vez que no terreno a resistência do adesivo é mais difícil de obter do que a sua rigidez.

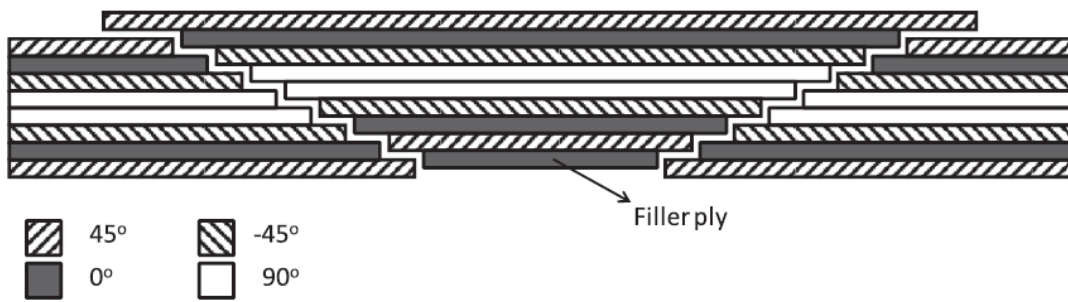


Figura 19 - Representação esquemática da reparação da junta de chanfro interior [52]

2.3.4 Juntas em degrau

No estudo de Ichikawa et al. [53], usando cálculos de elementos finitos a três dimensões, foram analisadas as distribuições de tensões em juntas adesivas em degrau, submetidas a cargas de tração estática. Os efeitos do módulo de Young do adesivo, sua espessura e número de degraus na interface da junta submetida a carregamento estático, foram examinados quanto ao alcance da deformação plástica. Um *design* otimizado de uma junta em degrau foi proposto, a partir de comparações dos efeitos acima referidos. Para além disso, a distribuição de tensão nas juntas submetidas a cargas estáticas foram examinadas quanto à deformação elasto-plástica, através do MEF e usando os resultados obtidos dessa distribuição de tensões na interface, foi estimada a resistência da junta, quando submetida a cargas estáticas. De forma a verificar os cálculos do MEF, foram medidas as deformações e a resistência das juntas submetidas a carga estática.

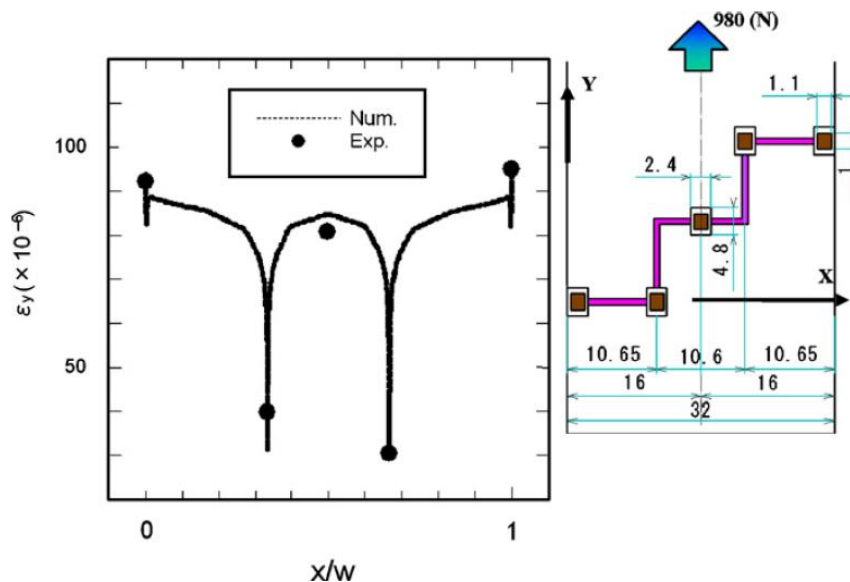


Figura 20 - Comparação entre as tensões obtidas por MEF e experimentalmente [53]

Após comparação dos valores numéricos e experimentais (Figura 20), chegaram-se a algumas conclusões. O valor principal máximo normalizado para a tensão, foi atingido no limiar da interface. Também se verificou que este valor diminuiu, à medida que o módulo de elasticidade do adesivo aumentava, a espessura do adesivo diminuía e o número de degraus aumentava. Foram obtidos resultados razoáveis entre os valores numéricos e experimentais para a medição da deformação das juntas em degrau, submetidas a carga de tracção estática, e também para a sua resistência.

No trabalho de Bendemra et al. [54], é estudada a influência dos parâmetros de junta nos pontos de tensão máxima, na linha de junção adesiva em juntas de chanfro interior e juntas em degrau (Figura 21). Uma análise de elementos finitos linear foi executada, para realizar um estudo paramétrico focado em seis parâmetros de *design* de junta: espessura de camada, espessura do adesivo, ângulo do chanfro, sequência de empilhamento, sequência de empilhamento da camada do reforço exterior e o seu respectivo comprimento.

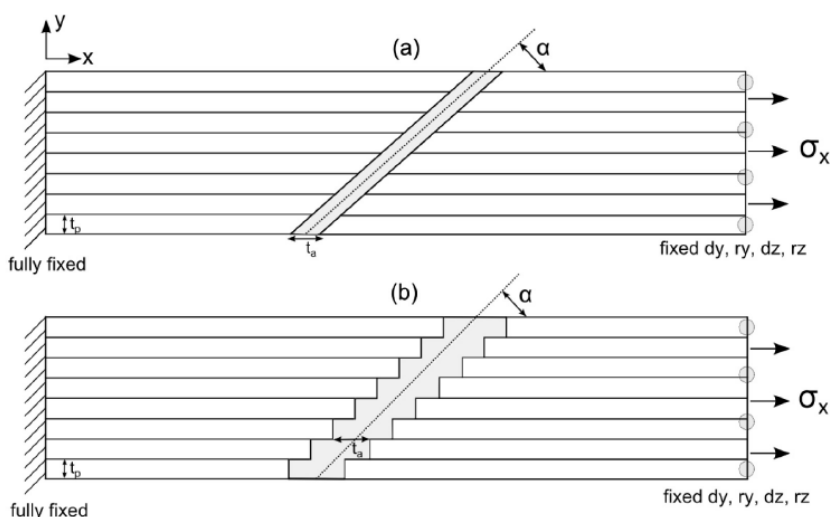


Figura 21 - Parâmetros de design para junta de chanfro interior (a) e junta em degraus (b) [54]

Os resultados deste estudo mostraram que, nas juntas de chanfro interior e em degrau, o pico das tensões de arrancamento e de corte é bastante sensível, no que diz respeito à espessura da camada, ângulo do chanfro e à sequência de empilhamento. A introdução de camadas extra, providencia protecção e rigidez na extremidade das juntas. O comprimento da camada de reforço exterior, foi usado para prevenir a continuação do surgimento de picos de tensão. A localização de camadas a 0° foi um factor destacado como sendo importante, pois as regiões adesivas adjacentes a camadas de 0° , desenvolviam altas concentrações de tensões. A análise foi posteriormente alargada a modelos tridimensionais de elementos finitos, para verificação. Concluindo, as juntas em degrau exibem maiores concentrações de tensões

do que as juntas de chanfro interior equivalentes. Contudo, os resultados deste estudo demonstraram que este efeito pode ser mitigado, introduzindo camadas extra e mudanças de *design* apropriadas, de forma a reduzir os picos de tensão nas extremidades das juntas, e nos cantos dos degraus.

Num trabalho de Akpınar [55], as propriedades mecânicas de juntas de sobreposição simples, juntas de um degrau e juntas de três degraus (Figura 22), sujeitas à tracção, foram examinadas experimentalmente e numericamente, mantendo a zona de junção igual para todas as amostras utilizadas. As amostras foram produzidas usando o Al 2024-T3 como aderente, o adesivo flexível SBT9244 e o adesivo rígido DP460. Depois de terem sido efectuados os estudo experimentais nos três tipos de junta (Figura 23), foram realizadas análises de tensões, utilizando um MEF tridimensional, tendo em consideração a não linearidade geométrica da junta e dos materiais utilizados, tanto adesivo como aderente.

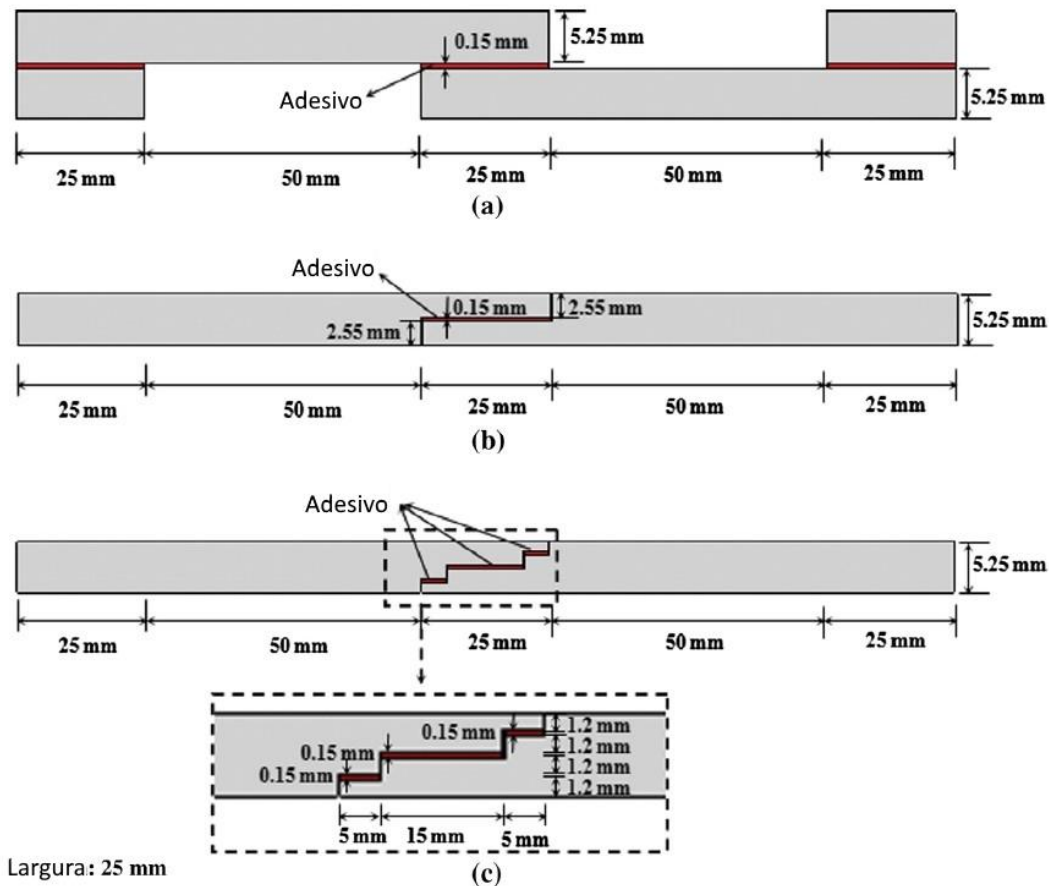


Figura 22 - Parâmetros geométricos dos três tipos de junta (Al2024-T3 usando como aderente) : (a) JSS (Tipo-I), (b) junta de um degrau (Tipo-II), (c) junta com três degraus (Tipo-III) [55]

Feita a análise, podem ser retiradas algumas conclusões. Mudar a geometria da área de adesão, como por exemplo, dois ou três degraus, tem um profundo impacto na

concentração de tensões da junta, e na sua resistência. Para as juntas que usaram o adesivo flexível SBT9244 (igual área de adesão), um degrau e três degraus conseguem suportar 11% a 60% mais carga que uma junta de sobreposição simples, respectivamente. Para as juntas que usaram o adesivo rígido DP490 (igual área de adesão), um degrau e três degraus conseguem suportar 8.8% a 68% mais carga que uma junta de sobreposição simples, respectivamente. Os degraus maquinados nas extremidades perto da zona de sobreposição, diminuem a tensão de arrancamento, tensões estas que são eficazes para o início do dano na junta. Para juntas de um e três degraus, tanto a concentração da tensão de corte e da tensão de arrancamento, são homogêneas ao longo da largura da junta. No entanto, na junta de sobreposição simples a concentração de tensões tomou valores máximos no centro ao longo da largura e valores mínimos nas extremidades.

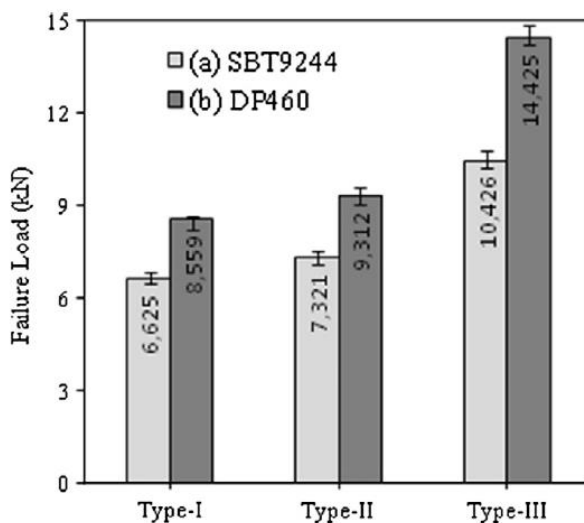


Figura 23 - Carga máxima de ruptura obtida experimentalmente para as três configurações [55]

2.3.5 Outros tipos de juntas

Neste capítulo, serão referidos alguns estudos, de forma muito breve, no que diz respeito a juntas com configurações menos usuais.

No estudo de Duong [56], é apresentada uma abordagem generalizada para calcular as taxas de libertação da energia do deslocamento no limiar da separação, numa junta de chanfro exterior, ou junta de reforço em chanfro. Foi utilizado um método de forma fechada para o cálculo da distribuição de tensões no adesivo, e também para prever as taxas de libertação de energia do deslocamento. O resultado obtido para a distribuição de tensões, está dentro dos resultados previstos através do MEF. Quanto aos resultados da taxa de libertação de energia do deslocamento, só existe uma compatibilidade de 10 a 20%, quando comparado com o método de elementos finitos.

No estudo de You et al. [57], foi investigado o efeito de um ângulo adesivo na extremidade da zona de sobreposição, na distribuição de tensões em juntas adesivas de sobreposição simples, usando aderentes em aço, através de uma análise elasto-plástica de elementos finitos. Os resultados numéricos demonstraram que as tensões de pico na zona central da ligação adesiva foram reduzidas, à medida que o ângulo foi aumentado de 0 para 15°.

No estudo de Yan et al. [58], o efeito da profundidade e comprimento de uma ranhura paralela à zona de sobreposição, assim como o módulo de elasticidade do adesivo, foram investigados quanto à sua influência na distribuição de tensão no centro da linha de ligação, e também no aderente, usando um método de elementos finitos elásticos. Os resultados demonstraram que o pico de tensões diminuiu quando existiam duas ranhuras nos aderentes, na zona correspondente ao centro da zona de ligação. No entanto, ocorreu um aumento das tensões previamente existentes.

No estudo de Haghpanah et al. [59], foi investigado o efeito de colocar dois dentes, um “positivo” e outro “negativo”, numa junta de sobreposição simples. O seu comportamento à tracção foi medido e comparado com uma junta simples normal. Também foram usadas simulações numéricas para explorar os efeitos de várias dimensões dos dentes, na distribuição de tensões. Os dados sugerem que a distribuição de tensões na junta é alterada significativamente de forma positiva.

No estudo de Ascione e Mancusi [60], é investigado o comportamento de juntas adesivas curvas, tendo sido desenvolvido um modelo numérico que toma em consideração o raio de curvatura, a deformabilidade ao corte, bem como os efeitos entre o comportamento axial e corte/flexão. Concluiu-se que um raio de curvatura finito é geralmente benéfico, no sentido em que a absorção de energia é atrasada à medida que o ângulo de curvatura diminui.

Neste estudo de Fessel et al. [61], é comparada a distribuição entre uma junta de “dobra invertida” e uma junta “ondulada”, usando uma análise de elementos finitos, tendo sido também levado a cabo ensaios experimentais para servir de comparação com os resultados obtidos por elementos finitos. Os resultados determinaram que a junta com “dobra-invertida” tem uma resistência 40% superior, quando comparada com as juntas de sobreposição simples usando várias matérias aderentes, adesivos e comprimentos de sobreposição.

No estudo de Sancaktar e Simmons [62], foram investigados os efeitos do uso de entalhes no aderente quanto à resistência e comportamento de deformação da junta de sobreposição simples. Foi usado o MEF para fazer a análise. Os resultados obtidos foram depois comparados com resultados experimentais, nos quais foram usados três adesivos diferentes. Os resultados experimentais demonstraram um aumento de 29%

na resistência da junta usado os entalhes. Este resultado está de acordo com a redução de 27% na tensão máxima de arrancamento obtida pela análise de elementos finitos.

O artigo de da Silva e Adams [63] apresenta técnicas que foram investigadas com o objectivo de diminuir as tensões transversais no aderente compósito de uma junta, de forma a aumentar a resistência da mesma, particularmente a baixas temperaturas. Testes experimentais e análises de elementos finitos de juntas de sobreposição dupla, revelam que é mais vantajoso usar o aderente em compósito no exterior da junta, em conjugação com um chanfro interior no aderente metálico exterior, e um boleado no adesivo.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Nos capítulos que se seguem, será descrito todo o processo experimental para a obtenção de resultados e a respectiva análise dos mesmos, nomeadamente os materiais utilizados, processo de fabrico das juntas, método de ensaios e análise comparativa de resultados entre as diversas configurações de junta, para os diferentes adesivos.

3.1.1 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.

3.1.1.1 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 selecção 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 [48], onde foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tracção de 324,00±0,16 MPa, módulo de Young (E) de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência à tracção de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura à tracção de 21,70%±4,24%.

As curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio foram obtidas experimentalmente, de acordo com a norma *ASTM E8 / E8M* [64], e encontram-se representadas na Figura 24. Também está representada a aproximação numérica usada no *software* ABAQUS®.

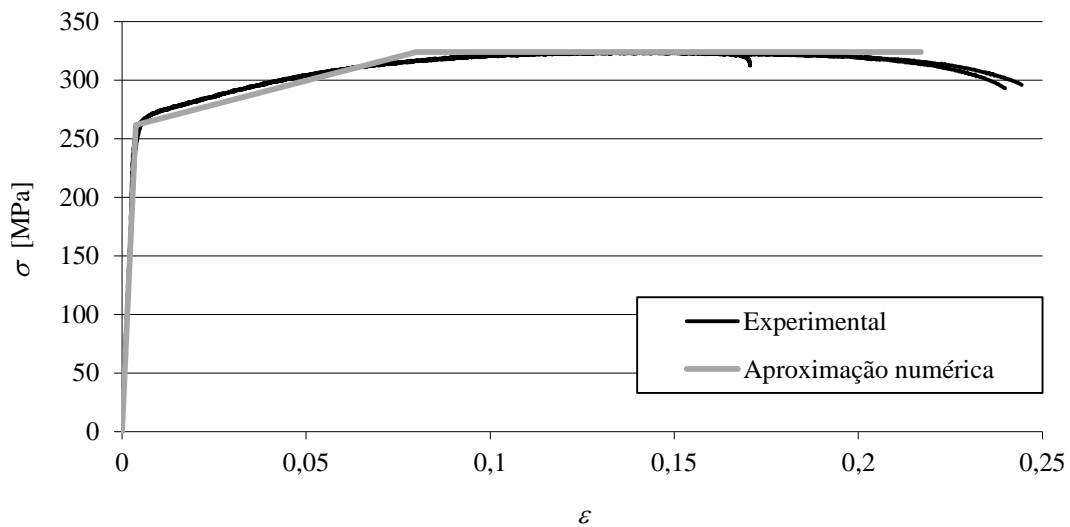


Figura 24– Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio Al 6082-T651 [48].

3.1.1.2 Adesivos

As propriedades dos adesivos usados neste trabalho foram determinadas em trabalhos anteriormente realizados. Os adesivos seleccionados para este trabalho, de forma a cobrir uma gama alargada de ductilidades, foram o adesivo epóxico frágil Araldite® AV138, o adesivo epóxico moderadamente dúctil Araldite® 2015 e o adesivo poliuretano dúctil Sikaforce® 7752.

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138/HV988 é um adesivo frágil, conforme se pode observar nas curvas σ - ϵ da Figura 25. Trata-se de um adesivo epóxico, que se apresenta sob a forma de líquido de dois componentes, a resina Araldite® AV138M-1 e o endurecedor HV988. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100g/40 g, respectivamente. Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 2, apresentam-se as propriedades relevantes do adesivo.

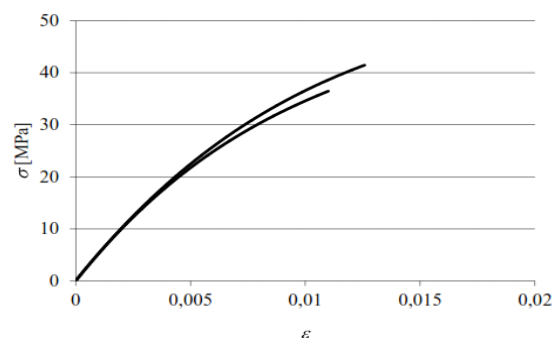


Figura 25 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® AV138 [65]

Tabela 2 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [65]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,35 ^a
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 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]	0,2 ^b
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	0,38 ^b

^a valor do fabricante

^b valores estimados na referência [66]

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

Este adesivo, é caracterizado como um adesivo epóxico estrutural de dois componentes, com ductilidade moderada, e com bom comportamento quando sujeito à tracção ou ao corte. Como se trata de um adesivo dúctil, em junta adesiva permite alguma redistribuição das concentrações de tensões nas extremidades da camada de adesivo, o que se traduz numa resistência da junta muito aceitável. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 1:1 em peso.

A Figura 26 mostra um exemplo das curvas σ - ϵ de provetes maciços (*bulk*) para este adesivo, que foram obtidas na referência [67]. Na Tabela 3, estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

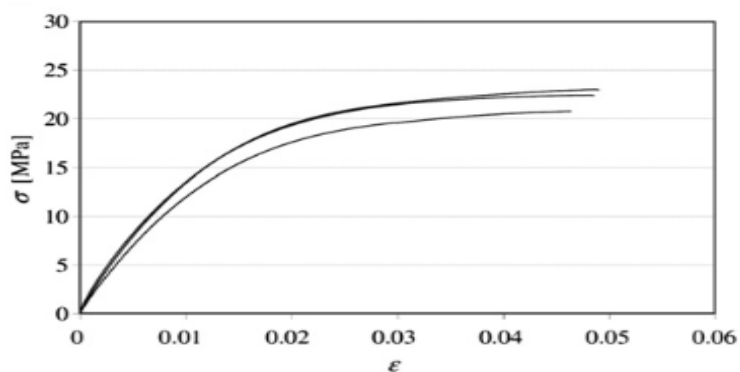
Figura 26 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® 2015 [67]

Tabela 3 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [67, 68]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	1,85±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de cedência à tracção, σ_y [MPa]	12,3±0,61
Tensão de rotura à tracção, σ_f [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura à tracção, ϵ_f [%]	4,77±0,15
Módulo de corte, G_{13} [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	43,9±3,4
Tenacidade à tracção, G_{Ic} [N/mm]	0,43±0,02
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	4,7±0,34

^a valor do fabricante

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 tracção do Araldite® AV138, é quase o dobro do Araldite® 2015.

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo dúctil, conforme se pode observar na curva σ - ϵ da Figura 27. 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, respectivamente. Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 4, apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo [69].

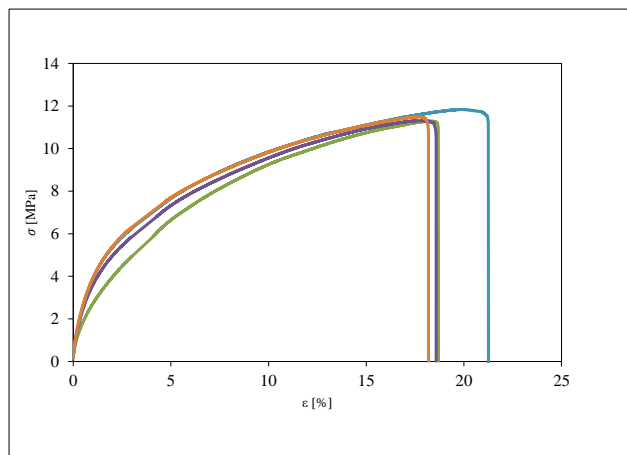


Figura 27 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Sikaforce® 7752.

Tabela 4 - Propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 [69]

Propriedades	Sikaforce® 7752 L60
Módulo de Young, E [GPa]	0,493±0,0896
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de cedência à tracção, σ_y [MPa]	3,24±0,5
Tensão de rotura à tracção, σ_f [MPa]	11,49±0,3
Deformação de rotura à tracção, ϵ_f [%]	19,18±1,4
Módulo de corte, G_{13} [GPa]	0,187±0,0164
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 [%]	58,42±6,4
Tenacidade à tracção, G_{Ic} [N/mm]	2,36±0,2
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	5,41±0,5

^a valor do fabricante

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

3.1.2 Geometria das juntas

Neste subcapítulo, é demonstrada a geometria das configurações de juntas tratadas neste trabalho, como se pode verificar na Figura 28, e as respectivas dimensões (ver Tabela 5 e Tabela 6). Também está exemplificado na Figura 28 o tipo de esforços aos quais estarão submetidas (ensaio de tracção).

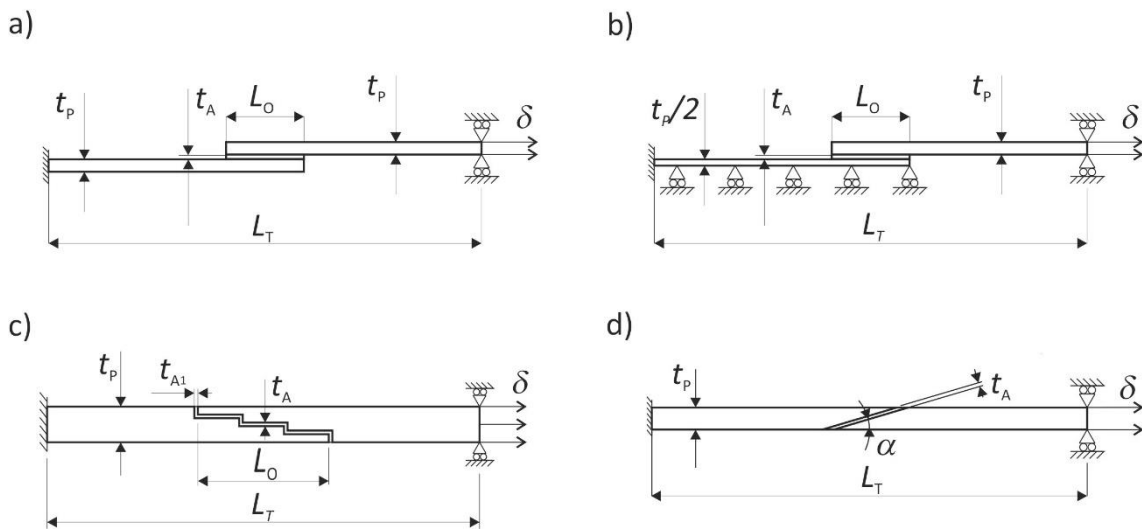


Figura 28 - Geometria das configurações de juntas utilizadas: a) JSS; b) JSD; c) junta em degrau; d) junta de chanfro interior;

Tabela 5 - Dimensões JSS, JSD e junta em degrau

Designação	Dimensão
Comprimento do provete L_t [mm]	170
Comprimento de sobreposição L_0 [mm]	12,5/ 25/ 37,5/ 50
Espessura do substrato T_p [mm]	3
Espessura da camada adesiva T_a [mm]	0,2

Tabela 6 -Dimensões de junta de chanfro interior

Designação	Dimensão
Comprimento do provete L_t [mm]	170
Ângulo de sobreposição α [°]	3,43/ 10/ 15/ 20/ 30/ 50
Espessura do substrato T_p [mm]	3
Espessura da camada adesiva T_a [mm]	0,2

3.1.3 Processo de fabrico

De seguida, será descrito o processo de fabrico para a execução das juntas adesivas ensaiadas à tracção. Este processo é semelhante para todas as juntas ensaiadas, sendo que a diferença mais notória se verificou no fabrico das juntas de chanfro interior, que foram obtidas por maquinagem, usando fresadora convencional.

Conforme foi referido anteriormente, a obtenção dos substratos para as juntas de chanfro interior ocorreu de maneira diferente. O material foi fornecido em forma de barras, com aproximadamente 1 m de comprimento cada. As barras foram depois cortadas, usando um serrote mecânico, conforme as dimensões necessárias (Tabela 6). Após corte, os substratos foram preparados para serem maquinados. Esta preparação consistiu na limpeza com acetona das secções cortadas, para remover o óleo de corte proveniente do serrote, tendo sido depois levadas ao esmeril para remover a rebarba resultante do corte. Os substratos foram depois levados para a fresadora convencional (Figura 29), e foi maquinada a zona de adesão, conforme o ângulo pretendido para cada uma das configurações. Depois de maquinados, foram mais uma vez levados ao esmeril para se proceder à remoção de rebarba resultante do processo de maquinagem. O processo de preparação de superfície, limpeza e colagem é o mesmo utilizado para os outros tipos de junta.

Após obtenção dos substratos, estes têm de ser submetidos a um tratamento de preparação da superfície e limpeza. A preparação da superfície consiste em usar o método de lixagem dos substratos na região a ser colada, de forma a remover eventual acumulação de camada de óxidos e também criar uma superfície mais rugosa, melhorando assim a adesão deste ao substrato. Após esta preparação é efectuada a limpeza da região de colagem dos substratos com acetona, para remover toda a sujidade.



Figura 29 – Maquinagem de junta de chanfro interior de 3,43°

Após o processo de obtenção dos substratos, tratamento superficial e limpeza, segue-se a preparação para a aplicação do adesivo. Para tal, foram utilizadas barras e grampos para facilitar o alinhamento e fixação dos substratos (Figura 30), e usando fita adesiva foi colocado na zona de colagem dos substratos fio de pesca calibrado com 0,2 mm de diâmetro com o objectivo de garantir uma espessura constante da camada de adesivo em toda a zona de sobreposição (Figura 31).

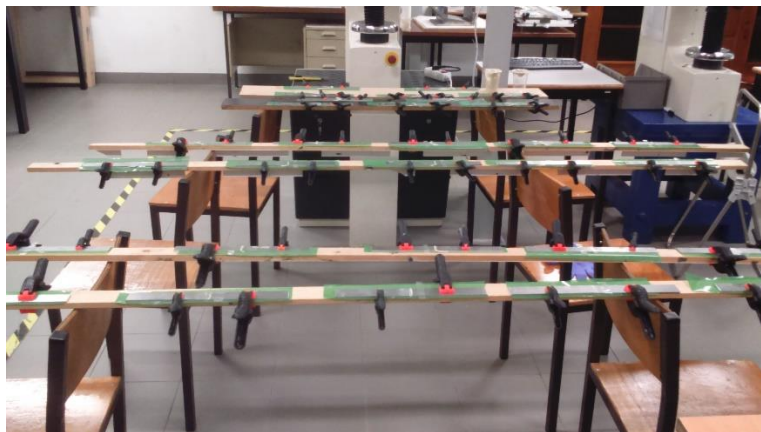


Figura 30 – Configuração utilizada para colagem das juntas

Depois de concluído todo o processo preparatório, é efectuada a colagem dos substratos. O adesivo é aplicado no substrato previamente fixado utilizando um grampo, e de seguida é colocada cuidadosamente a outra metade, para garantir um alinhamento correcto, assim como uma distribuição uniforme do adesivo. Logo de seguida, é colocado um outro grampo para finalizar a fixação e, através da pressão exercida por este, expulsar o adesivo em excesso e garantir a espessura de 0,2 mm de camada adesiva pretendida (Figura 32). Após todo este processo procedeu-se à cura dos provetes à

temperatura ambiente, tendo esta demorado aproximadamente sete dias. Curados os provetes, estes foram levados ao esmeril, para remover o adesivo em excesso nos topos e nas laterais das juntas.



Figura 31 – Grampo de fixação



Figura 32 – Grampos para garantir fixação da junta durante a cura

3.1.4 Ensaio das juntas

Para a realização dos ensaios de tracção, foi usada uma máquina de ensaios Shimadzu®, modelo AG-X 100 (Figura 33), equipada com uma célula de carga de 100 kN. A distância entre maxilas foi de 170 mm, os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e a uma velocidade de 1 mm/min. Todos os provetes foram traccionados até à rotura, foram obtidas as curvas ($P-\delta$) e observados os respectivos modos de rotura.



Figura 33 - Máquina de ensaio de tracção Shimadzu AG-X

3.1.5 Resultados obtidos

3.1.5.1 Curvas $P-\delta$

Nos subcapítulos seguintes, serão apresentados exemplos e breves comentários quanto ao comportamento de curvas $P-\delta$, para os vários adesivos e comprimentos de sobreposição utilizados.

3.1.5.1.1 Junta de sobreposição simples

Nas Figura 34, Figura 35 e Figura 36, estão representadas as curvas $P-\delta$ para os diversos comprimentos de sobreposição de JSS e para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respectivamente.

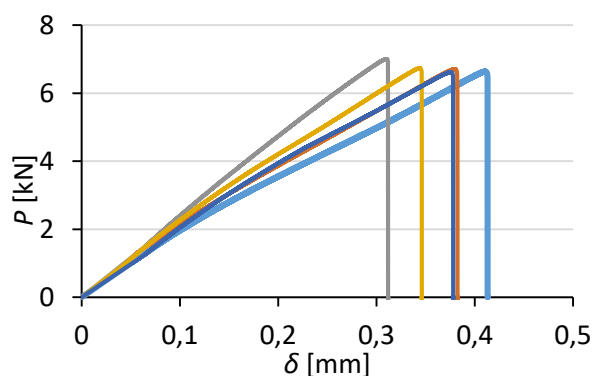


Figura 34 - Curvas $P-\delta$, dos provetes, obtidas experimentalmente (JSS) Araldite® AV138 $L_0=25$ mm

Nestes gráficos, é possível verificar o comportamento linear da junta até à rotura para os três adesivos seleccionados, sendo que o deslocamento para a junta do Araldite® AV138 é menor, pelo facto de este adesivo ser um adesivo frágil. No caso do Araldite® 2015, dada a sua maior ductilidade permite plastificação, sendo assim possível atingir valores de P e de δ mais elevados.

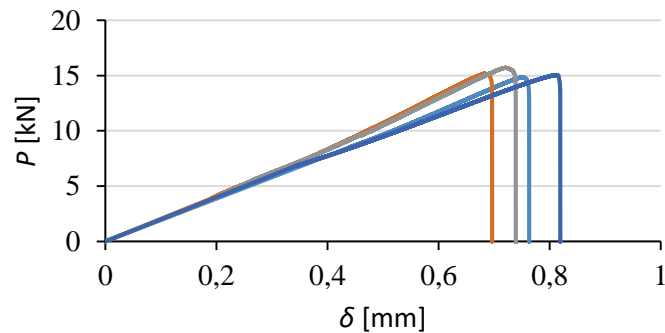


Figura 35 - Curva P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (JSS) Araldite® 2015 $L_0=50$ mm

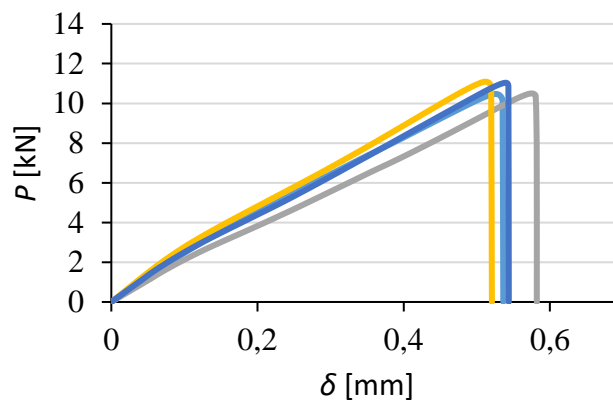


Figura 36 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (JSS) Sikaforce® 7752 $L_0=37,5$ mm

3.1.5.1.2 Junta de sobreposição dupla

Nas Figura 37, Figura 38 e Figura 39, estão representados exemplos de curvas P - δ para diversos comprimentos de sobreposição de JSD, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respectivamente.

Pode-se verificar que, para as juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, estas mantêm um comportamento linear até à rotura. Já para a junta com o Araldite® 2015 ($L_0=37,5$ mm), esta apresenta um comportamento não linear, devido à tenacidade do adesivo, fazendo com que este suporte cargas mais elevadas, e conseqüentemente, provocando a plastificação dos substratos.

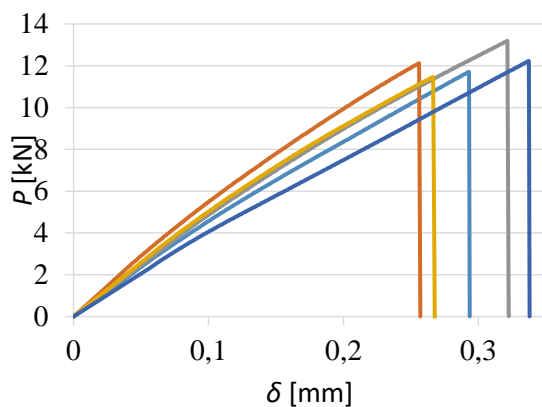


Figura 37 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (JSD) Araldite® AV138 $L_0=12,5$ mm

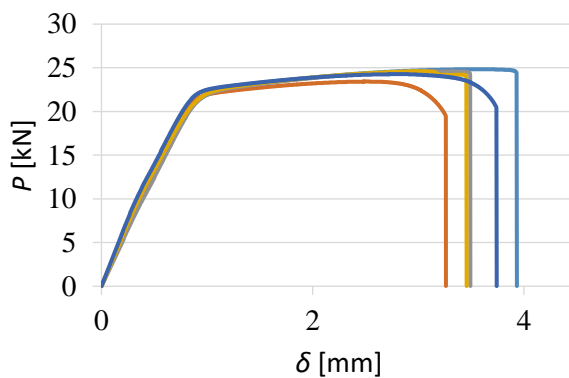


Figura 38 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (JSD) Araldite® 2015 $L_0=37,5$ mm

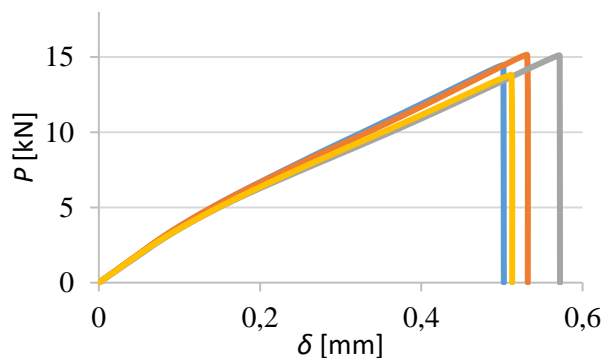


Figura 39 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (JSD) Sikaforce® 7752 $L_0=25$ mm

3.1.5.1.3 Junta em degrau

Nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42, estão representados exemplos de curvas P - δ para diversos comprimentos de sobreposição de juntas STEP, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respectivamente.

Através dos gráficos apresentados, é possível verificar o comportamento linear até à rotura das juntas, para os vários adesivos e comprimentos de sobreposição.

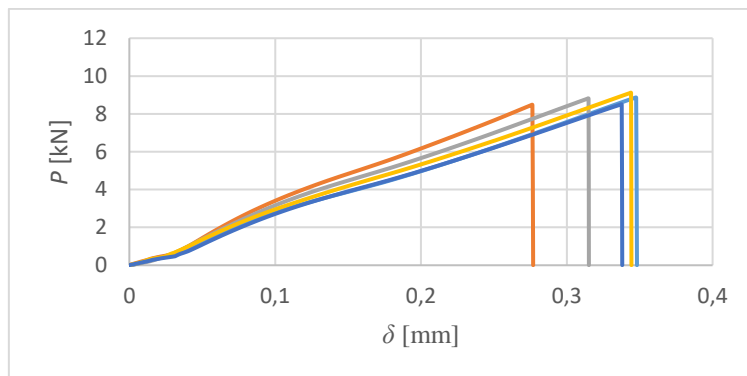


Figura 40 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (junta em degraus) Araldite® AV138 $L_0=25$ mm

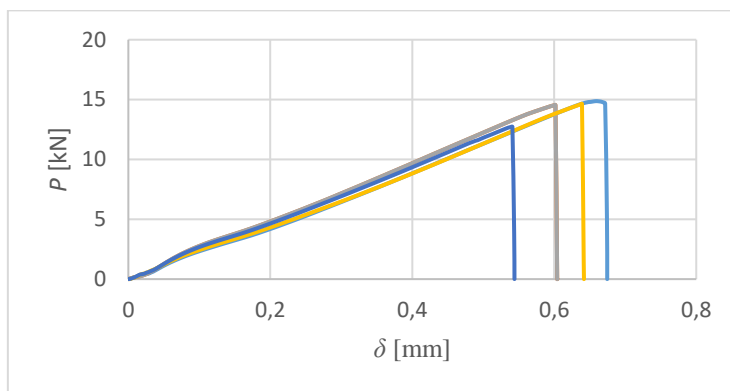


Figura 41 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (junta em degraus) Araldite® 2015 $L_0=37,5$ mm

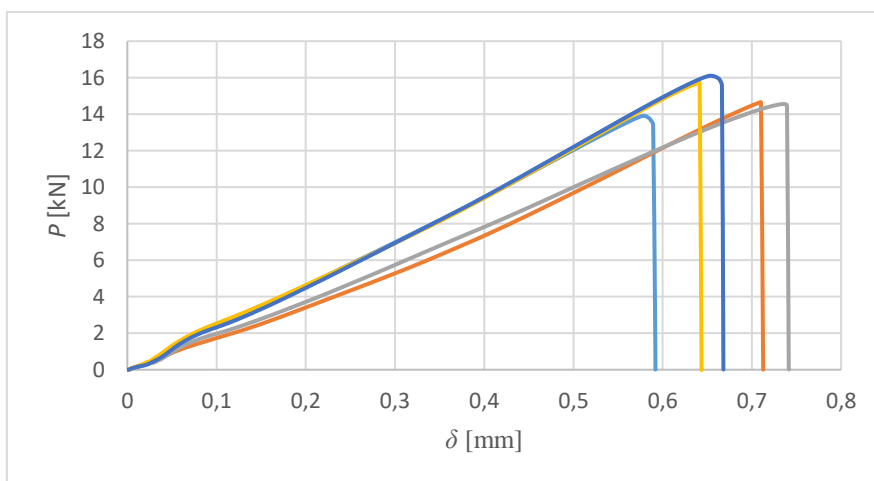


Figura 42 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (junta em degraus) Sikaforce® 7752 $L_0=50$ mm

3.1.5.1.4 Junta de chanfro interior

Nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42, estão representados exemplos de curvas P - δ para diversos comprimentos de sobreposição de juntas de chanfro interior, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respectivamente. No caso das juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, é possível verificar o comportamento linear da junta até à rotura. Para a junta com o adesivo Araldite® 2015, o comportamento não é completamente linear, pois ocorre uma ligeira plastificação dos substratos na aproximação do $P_{\text{máx}}$.

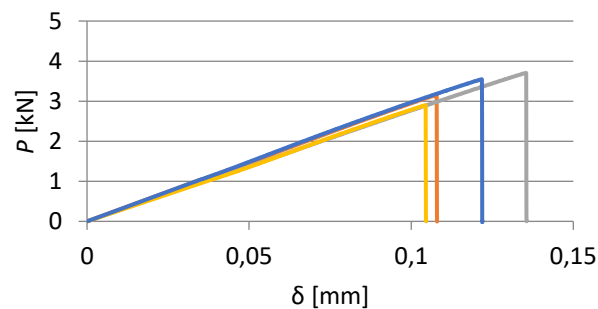


Figura 43 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (junta de chanfro interior) Araldite® AV138 $\alpha=45^\circ$

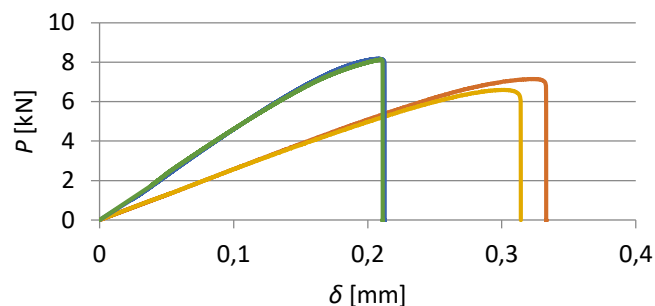


Figura 44 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (junta de chanfro interior) Araldite® 2015 $\alpha=10^\circ$

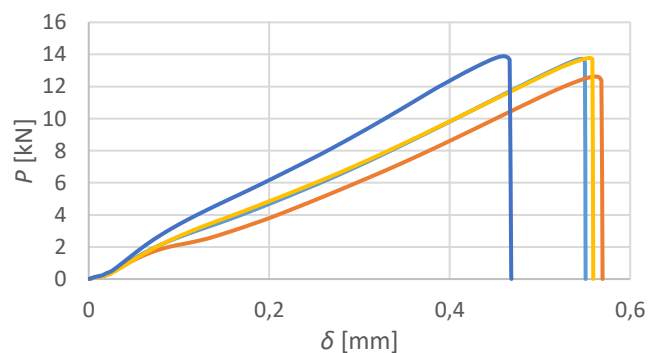


Figura 45 - Curvas P - δ , dos provetes, obtidas experimentalmente (junta de chanfro interior) Sikaforce® 7752 $\alpha=3^\circ$

3.1.5.2 Modos de rotura

Neste subcapítulo, são apresentados os modos de rotura para as quatro configurações de junta e os três adesivos utilizados. Os modos de rotura apresentados foram obtidos em trabalhos experimentais anteriores [70, 71], excepto para as juntas de chanfro interior com o adesivo Sikaforce® 7752.

3.1.5.2.1 Junta de sobreposição simples

Araldite® AV138

Para as JSS que utilizaram este adesivo, é possível verificar, através do exemplo da Figura 46, que foram obtidas roturas coesivas, se bem que estas ocorreram na proximidade da interface entre o adesivo e o substrato.

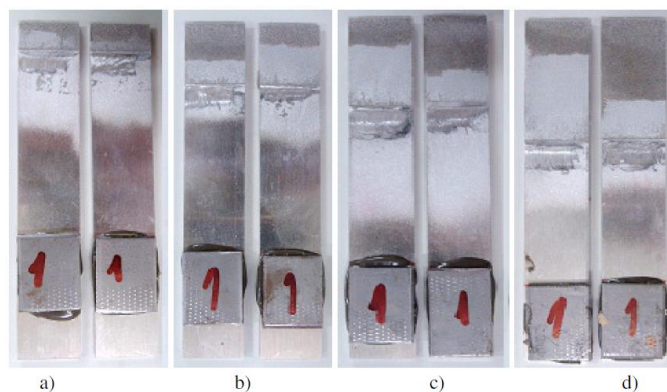


Figura 46 - Modos de rotura dos provetes JSS: Araldite® AV138, $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [11]

Araldite® 2015

Conforme se pode verificar na Figura 47, para o adesivo Araldite® 2015 também se obtiveram roturas coesivas.

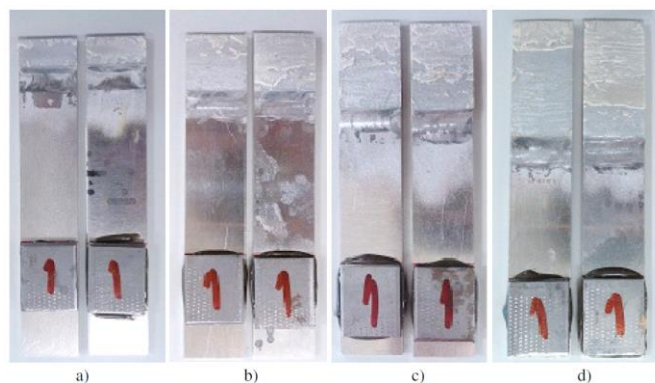


Figura 47 - Modos de rotura dos provetes JSS: Araldite® 2015, $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [11]

Sikaforce® 7752

Efectuando uma análise da Figura 48, é possível verificar que o modo de rotura obtido para os provetes ensaiados é coesivo.

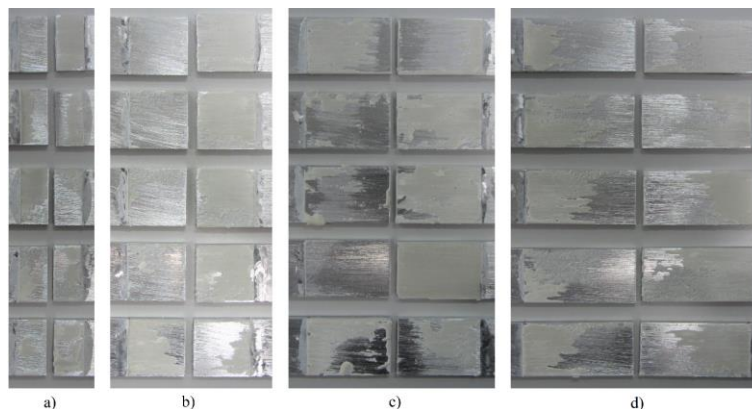


Figura 48 - Modos de rotura dos provetes JSS: Sikaforce® 7752, $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [71]

3.1.5.2.2 Junta de sobreposição dupla

Araldite® AV138

Fazendo uma análise da Figura 49, é possível verificar que o modo de rotura obtido é coesivo, sendo essa rotura, em alguns casos, muito próxima da interface.

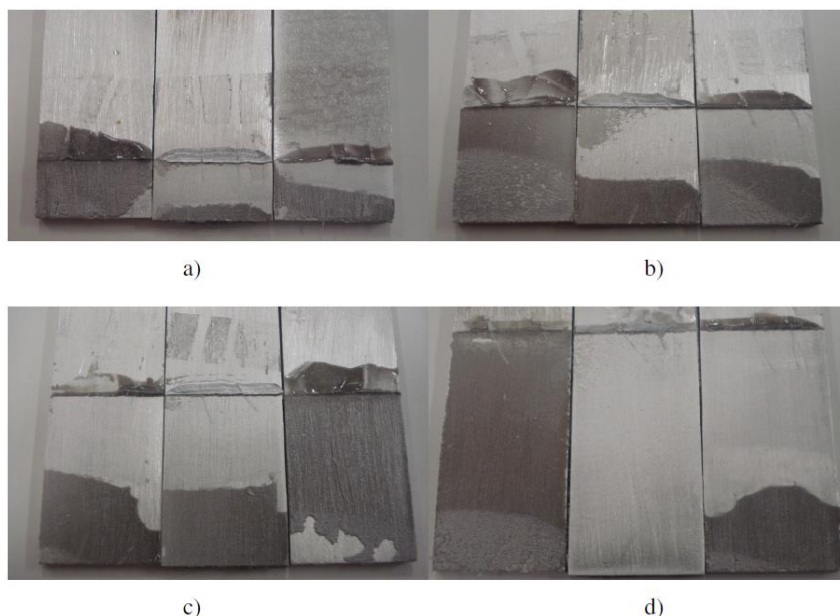


Figura 49 - Modos de rotura dos provetes JSD: Araldite® AV138, $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [70]

Araldite® 2015

Na análise da Figura 50, é possível verificar que a rotura é coesiva para todos os comprimentos de sobreposição, excepto para $L_0=50$ mm. Neste caso a rotura ocorreu pelo substrato.

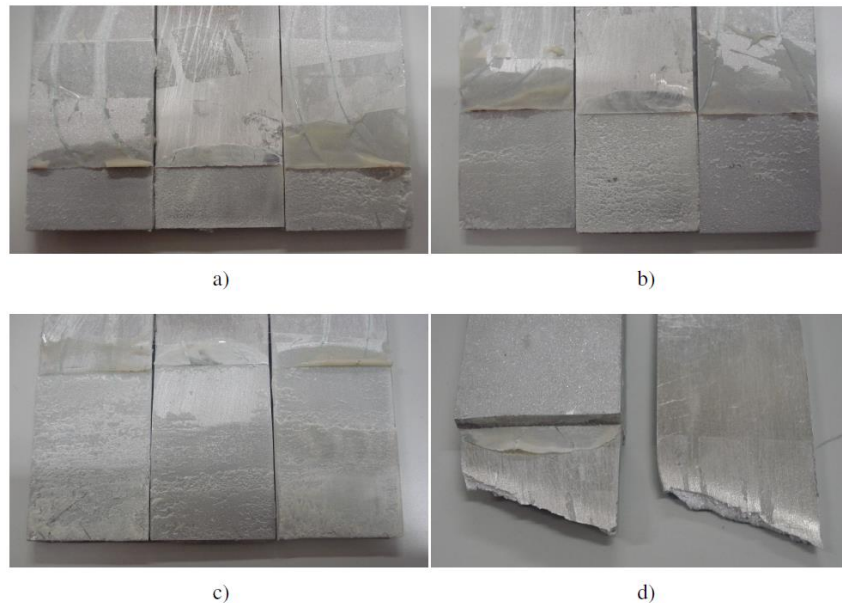


Figura 50 - Modos de rotura dos provetes JSD: Araldite® 2015, $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [70]

Sikaforce® 7752

Analisando a Figura 51, é possível verificar a ocorrência de rotura coesiva para todos os provetes ensaiados com $L_0=37,5$ mm. Foi escolhido apresentar este comprimento de sobreposição, pois é o que melhor representa o modo de rotura coesiva, se bem que todos os outros provetes para os vários L_0 apresentam uma rotura coesiva.

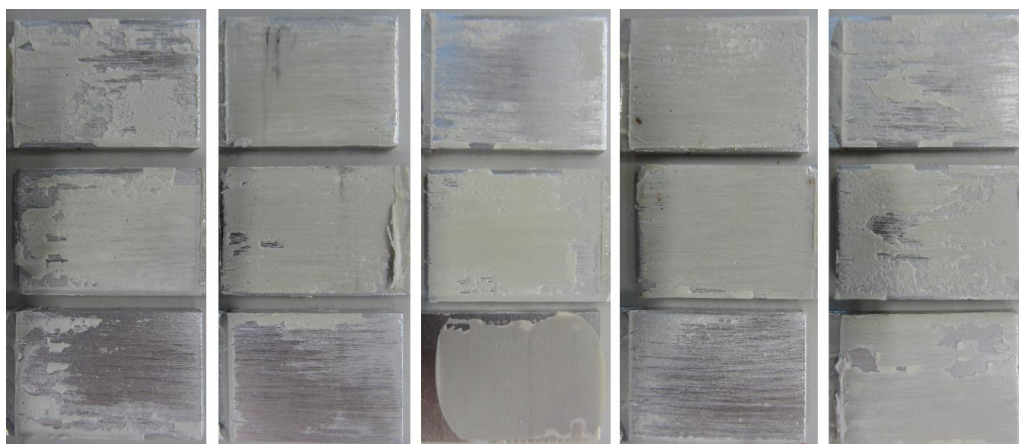


Figura 51 - Modos de rotura dos provetes JSD: Sikaforce® 7752 para $L_0=37,5$ mm [71]

3.1.5.2.3 Junta em degrau

Araldite® AV138

A partir da análise feita através da Figura 52, é possível observar que em todos os comprimentos de sobreposição se obtiveram roturas coesivas.

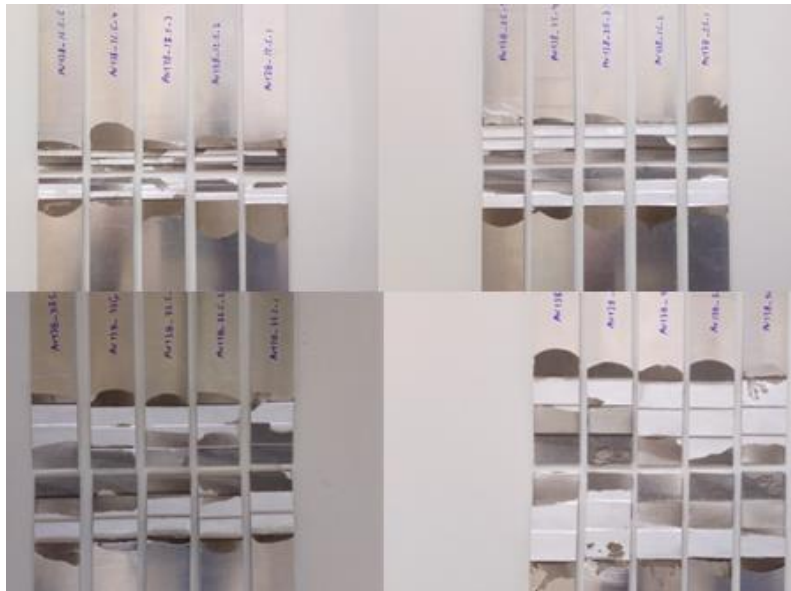


Figura 52 - Modos de rotura dos provetes de junta em degrau: Araldite® AV138 [72]

Araldite® 2015

Através da análise da Figura 53, é possível constatar a ocorrência de roturas coesivas e, no caso de alguns provetes para $L_0=50$ mm, rotura pelo substrato.



Figura 53 - Modos de rotura dos provetes de Junta em degrau: Araldite® 2015 [72]

Sikaforce® 7752

No caso dos provetes colados com o Sikaforce® 7752, pode-se constatar, através da Figura 54, que o modo de rotura destes foi coesivo, excepto para dois dos provetes com $L_0=50$ mm, nos quais se obteve rotura pelo substrato.



Figura 54 - Modos de rotura dos provetes de Junta em degraus: Sikaforce® 7752 [72]

3.1.5.2.4 Junta de chanfro interior

Araldite® AV138

Para as juntas de chanfro interior coladas com o Araldite® AV138, verificou-se que a rotura nos ensaios ocorreu por falha coesiva do adesivo.

Araldite® 2015

No caso das juntas de chanfro interior com o adesivo Araldite® 2015, através de inspecção visual, conclui-se que a rotura ocorreu por falha coesiva do adesivo.

Sikaforce® 7752

Para as juntas de chanfro interior ensaiadas com o Sikaforce® 7752, através da análise da Figura 55, é possível verificar que a totalidade dos provetes sofreu rotura coesiva no adesivo.

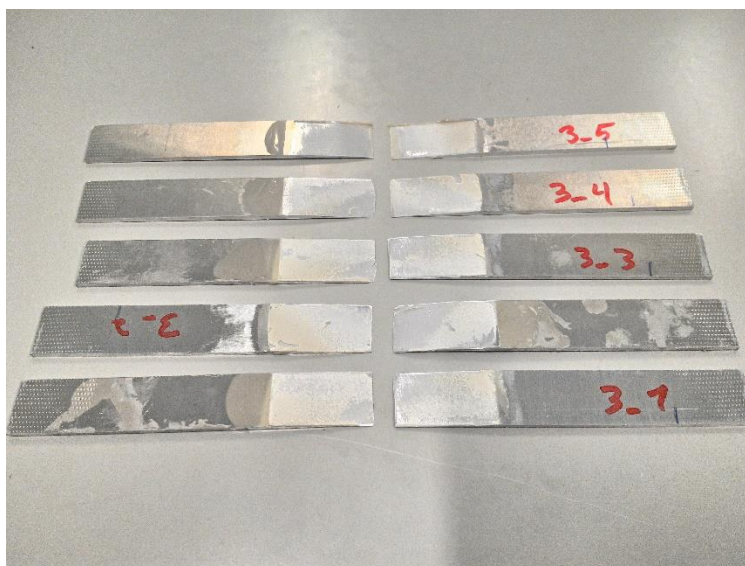


Figura 55 – Modos de rotura dos provetes de junta de chanfro interior: Sikaforce® 7752, $\alpha=30^\circ$

3.1.5.3 Resistência das juntas

Neste subcapítulo, são apresentados gráficos e tabelas comparativas para cada configuração de junta e cada adesivo, com valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ em função do L_0 , e no caso das juntas de chanfro interior, em função do ângulo do chanfro interior.

3.1.5.3.1 Junta de sobreposição simples

Na Tabela 7, apresentam-se os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$, juntamente com os respectivos desvios padrão, referentes às JSS para os três adesivos testados.

Tabela 7 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [N] para as JSS e para os diferentes adesivos

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	5421,66	6738,18	8016,33	9342,21
Desvio Padrão	439,37	155,43	206,34	278,45
Araldite® 2015	5287,83	9480,68	12235,22	15182,21
Desvio Padrão	237,21	386,59	343,87	370,38
Sikaforce® 7752	3625,55	7175,51	10774,10	14383,65
Desvio Padrão	206,80	445,45	334,10	553,55

Na Figura 56 é apresentada uma representação gráfica dos valores da tabela anterior. Através da análise da Tabela 7 e da Figura 56, é possível verificar que em todos os adesivos existe um aumento da resistência com o aumento do L_0 , embora, que para o

Araldite® AV138, esse aumento seja o menos acentuado, devido à fragilidade deste adesivo. Para o Araldite® 2015 e para o Sikaforce® 7752, o aumento é praticamente linear.

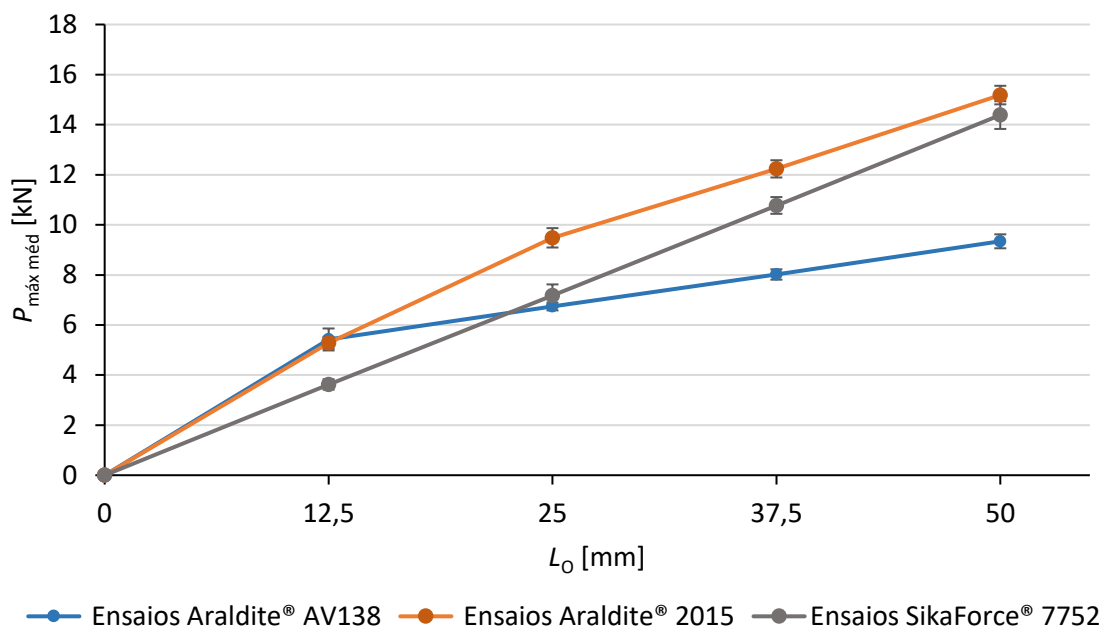


Figura 56 - Valores médios de $P_{\text{máx méd}}$ e desvio padrão em função de L_0 para os diferentes adesivos nas JSS

3.1.5.3.2 Junta de sobreposição dupla

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios de $P_{\text{máx}}$, juntamente com os respectivos desvios padrão, referentes às JSD para os três adesivos testados.

Tabela 8 - Valores médios de $P_{\text{máx}}$ [N] para as JSD e para os diferentes adesivos

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	12141,43	16116,50	16671,23	16980,78
Desvio Padrão	664,08	984,92	23,14	724,82
Araldite® 2015	11405,35	22732,60	24052,43	24104,42
Desvio Padrão	234,49	836,52	438,38	188,60
Sikaforce® 7752	7276,37	14622,80	21872,63	23973,377
Desvio Padrão	230,19	635,50	1210,06	387,80

Na Figura 57 é apresentada uma representação gráfica dos valores da tabela anterior.

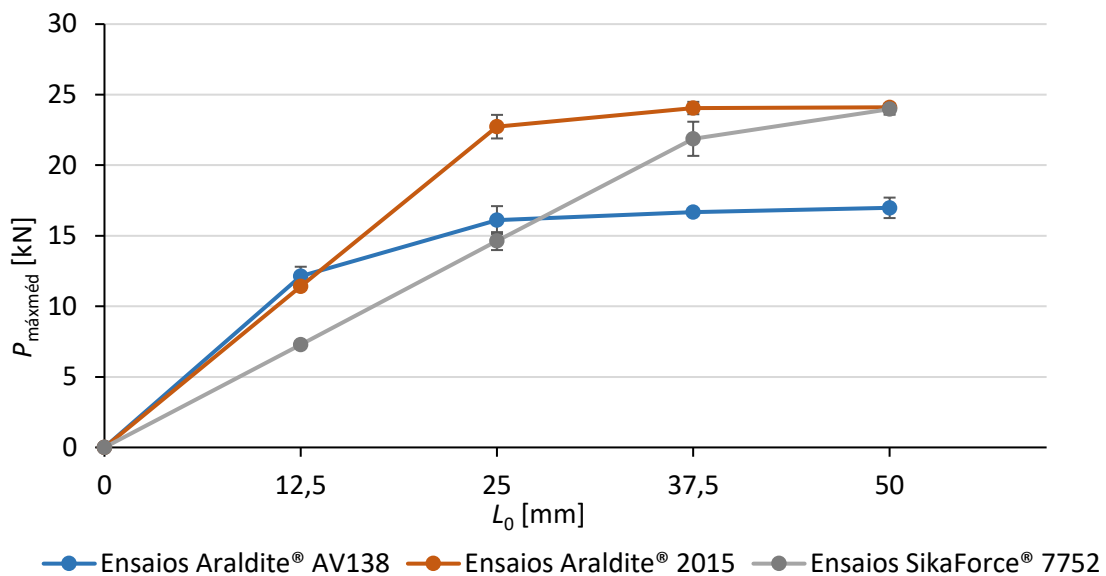


Figura 57 - Valores médios de $P_{\text{máx méd}}$ e desvio padrão em função de L_0 para os diferentes adesivos nas JSD

Através da análise da Figura 57, é possível constatar que para o Araldite® Av138, o aumento de L_0 não possui uma influência acentuada no aumento de $P_{\text{máx}}$, sendo que o único aumento de $P_{\text{máx}}$ notório é de $L_0=12,5$ mm para $L_0=25$ mm e, a partir daí, o valor mantém-se nos 16 kN. Para o Araldite® 2015, existe um aumento linear de $P_{\text{máx}}$ até $L_0=25$ mm, mas para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, o valor permanece nos 24 kN. Já o Sikaforce 7752, é o que tem o melhor aumento de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 , sendo este perfeitamente linear até $L_0=37,5$ mm, sofrendo uma ligeira estagnação para $L_0=50$ mm.

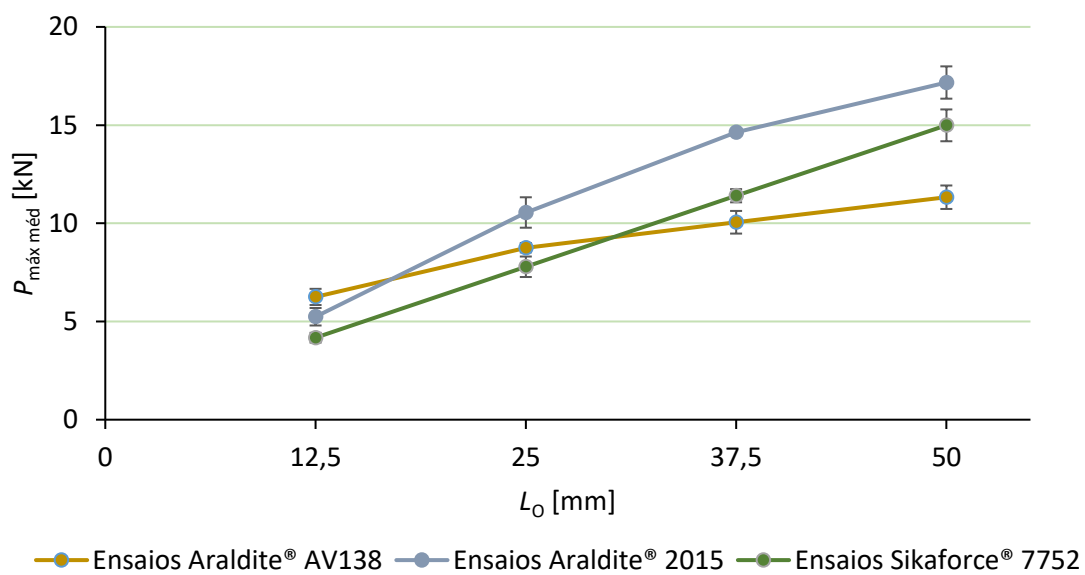
3.1.5.3.3 Junta em degrau

Na Tabela 9 e Figura 58, estão representados os valores médios de $P_{\text{máx}}$, juntamente com os respectivos desvios padrão, referentes às juntas em degrau para os três adesivos testados.

Analisando os dados obtidos, pode-se verificar que existe um aumento de $P_{\text{máx}}$ com o aumento de L_0 . Esse aumento é menos notório para o Araldite® AV138, principalmente em L_0 mais elevados. Tanto o Araldite® 2015 como o Sikaforce® 7752, têm um comportamento quase linear, sendo que o maior $P_{\text{máx}}$ é obtido pelo Araldite® 2015.

Tabela 9 - Valores médios de $P_{\text{máx méd}}$ [N], para as juntas em degrau e para os diferentes adesivos

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	6250,60	8757,30	10052,93	11327,78
Desvio Padrão	411,83	239,40	576,86	598,11
Araldite® 2015	5241,26	10549,77	14641,69	17168,94
Desvio Padrão	444,80	774,97	138,20	822,81
Sikaforce® 7752	4175,10	7786,28	11404,34	14988,66
Desvio Padrão	247,80	521,41	335,87	810,62

Figura 58 - Valores médios de $P_{\text{máx méd}}$ e desvio padrão em função de L_0 para os diferentes adesivos na junta em degrau.

3.1.5.3.4 Junta de chanfro interior

Na Tabela 10 e Figura 59, estão representados os valores médios de $P_{\text{máx}}$, juntamente com os respectivos desvios padrão, referentes às juntas de chanfro interior para os três adesivos testados.

Feita uma análise dos dados obtidos, é logo possível verificar que quanto menor o ângulo α , maior é $P_{\text{máx}}$. Para esta configuração de junta, os três adesivos têm um comportamento bastante semelhante entre eles. Ambos sofrem uma descida acentuada de $P_{\text{máx}}$ quando se passa de $\alpha=3^\circ$ para $\alpha=10^\circ$. Para os restantes valores de α , essa descida é mais suave. Nesta configuração de junta, o Araldite® AV138 é o que tem um melhor comportamento, obtendo um valor $P_{\text{máx}}$ bastante superior ao dos outros adesivos testados, o que veio contrariar a tendência que se tinha vindo a verificar até aqui. Neste

caso, a resistência do Araldite® AV138 é uma vantagem, uma vez que esta configuração é a que retira mais partido dessa característica.

Tabela 10 - Valores médios de $P_{\text{máx méd}}$ [N] para as juntas de chanfro interior e para os diferentes adesivos

Graus Scarf [°]	3	10	15	20	30	45
Araldite® AV138	29700	10648	7926	5715	4480	3325
Desvio Padrão	1500	346,63	642,49	310,02	150,89	366,66
Araldite® 2015	21903	7509	4858	3567	2832	1868
Desvio Padrão	1600	772,04	141,92	205,56	101,03	325,56
Sikaforce® 7752	13500	4677	3132	2378	1543	1142
Desvio Padrão	510,90	195,40	286,25	229,38	167,86	63,51

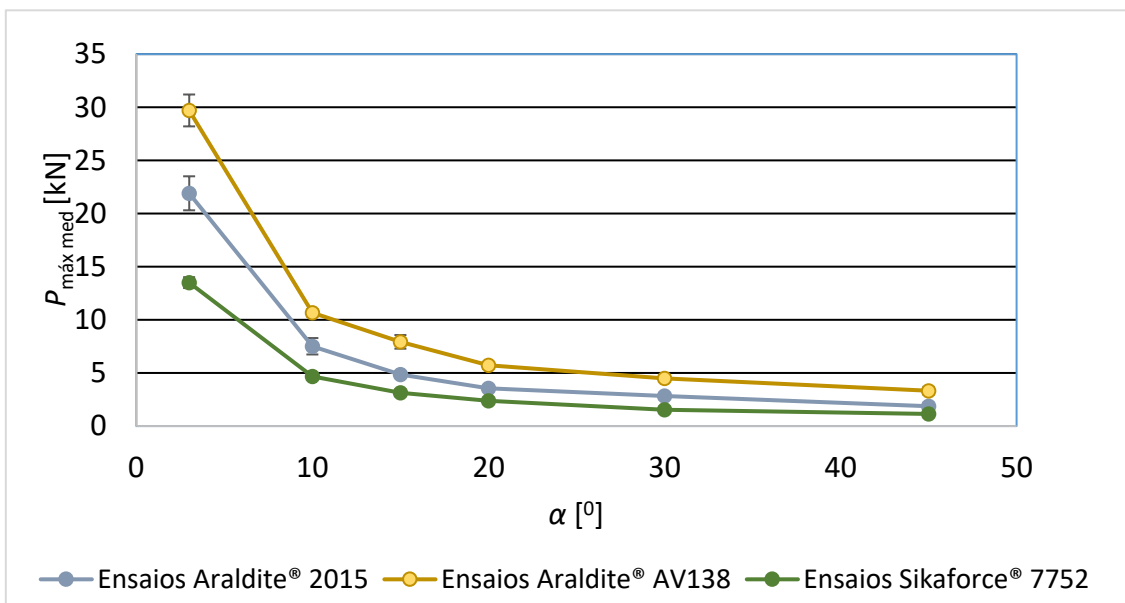


Figura 59 - Valores médios de $P_{\text{máx}}$ e desvio padrão em função de α para os diferentes adesivos em junta de chanfro interior

3.1.5.4 Análise dos resultados obtidos

Concluída a análise dos dados apresentados para as JSS, é possível verificar que $P_{\text{máx}}$ aumenta conforme o valor de L_0 , sendo que esse aumento varia de adesivo para adesivo,

uma vez que é mais acentuado nuns do que noutros. Para o $L_0=12,5$ mm, o Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 possuem valores muito semelhantes de $P_{m\acute{a}x}$, na ordem dos 5 kN, no entanto, quando se aumenta para $L_0=25$ mm, o Araldite® AV138 só tem um aumento de 24,3 % em $P_{m\acute{a}x}$, enquanto no Araldite® 2015 se verifica um aumento de 79,3%. Mas o incremento mais significativo ocorreu no Sikaforce® 7752, que para $L_0=25$ mm foi de 97,9%. Para L_0 maiores, existe um aumento menos acentuado, nomeadamente no Araldite® AV138 que, para $L_0=50$ mm, tem um incremento de 16,6% face ao $P_{m\acute{a}x}$ obtido para $L_0=37,5$ mm. Isto acontece no Araldite® AV138, por este ser um adesivo considerado frágil e não ter capacidade de plastificação. Desta forma, quando se aproxima de $P_{m\acute{a}x}$, ocorre logo rotura da junta. Já o Araldite® 2015, que é considerado um adesivo dúctil, consegue plastificar e alcançar valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevados. O Sikaforce® 7752 é um adesivo que consegue um compromisso entre ductilidade e fragilidade e, como tal, tem um comportamento intermédio entre o Araldite® AV138 e o Araldite® 2015, até porque, conforme se verifica nos resultados obtidos, os seus valores de $P_{m\acute{a}x}$ estão sempre situados entre os valores dos outros dois adesivos. Para esta configuração de junta, o adesivo que se destaca com os melhores resultados, é o Araldite® 2015, se bem que o Sikaforce® 7752 também obteve valores bastante próximos, principalmente para $L_0=50$ mm. Mesmo assim, o Araldite® AV138 é uma escolha viável, dependendo da aplicação dos esforços a que a junta vai estar sujeita. No que diz respeito aos valores do desvio padrão, os três adesivos obtiveram valores relativamente baixos. Relativamente ao desvio padrão percentual máximo, o Araldite® AV138, para $L_0=12,5$ mm, teve um valor de 8,1%, o Araldite® 2015, para $L_0=12,5$ mm, obteve 4,5% e o Sikaforce 7752, para $L_0=25$ mm, obteve 6,2%.

Para as JSD, $P_{m\acute{a}x}$ também aumenta em função de L_0 , mas nesta configuração este aumento está limitado aos comprimentos de sobreposição menores, salvo uma excepção, devido à ocorrência de plastificação dos aderentes. No caso do Araldite® AV138, que para $L_0=12,5$ mm apresenta o valor de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevado, sofre estagnação em $L_0=25$ mm (16,1 kN), não conseguindo para os valores de L_0 superiores alcançar mais do que um $P_{m\acute{a}x}$ na ordem dos 16 kN, ou seja, incrementos de 3,4 e 1,9% para L_0 de 37,5 mm e $L_0=50$ mm, respectivamente. Para o Araldite® 2015, já se obtiveram resultados ligeiramente diferentes para os valores menores de L_0 . De $L_0=12,5$ mm para $L_0=25$ mm, $P_{m\acute{a}x}$ aumentou de 11,4 kN para 22,7 kN, ou seja, 99,3% (sensivelmente o dobro). De $L_0=25$ mm para $L_0=37,5$ mm, ultrapassa-se o limite elástico dos aderentes, pelo que apenas se regista um aumento de 5,8%. Para $L_0=50$ mm o valor de $P_{m\acute{a}x}$ mantêm-se praticamente igual. O Sikaforce® 7752 também sofre um aumento abrupto do $P_{m\acute{a}x}$ quando passa para $L_0=25$ (101%) e para $L_0=37,5$ (49,6%). Para $L_0=50$, $P_{m\acute{a}x}$ atinge um valor muito semelhante ao do Araldite® 2015. Concluindo, para juntas JSD com $L_0=12,5$ mm, tanto o Araldite® AV138 como o Araldite® 2015, são escolhas viáveis, uma vez que atingiram valores de $P_{m\acute{a}x}$ muito semelhantes. Para $L_0=25$ mm, a escolha óbvia recai sobre o Araldite® 2015, que apresenta o valor de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevado. Para $L_0=37,5$ mm,

mais uma vez o Araldite 2015 é a melhor escolha, embora o Sikaforce® 7752 seja também uma escolha viável. Relativamente aos desvios padrão, os valores para o Araldite® AV138 foram reduzidos, sendo que o maior foi de 6,11% para $L_0=25$ mm. No caso do Araldite® 2015, os valores também foram relativamente reduzidos, destacando-se apenas o mais elevado de 3,68%, para $L_0=25$ mm. Para o Sikaforce® 7752, o maior valor de desvio padrão foi para $L_0=37,5$ mm, com 5,53%.

Para as juntas em degrau, tal como nas JSS e JSD, existe um aumento variável de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 , dependendo do tipo de adesivo utilizado. O comportamento do Araldite® AV138 é semelhante ao observado nas configurações de junta anteriores. Para $L_0=12,5$ mm, este adesivo obteve o valor $P_{m\acute{a}x}$ mais elevado (6,25 kN), com um aumento de 40% para $L_0=25$ mm. No entanto, para valores superiores de L_0 , $P_{m\acute{a}x}$ estabiliza, não passando dos 11,33 kN, para $L_0=50$ mm. No que diz respeito ao Araldite® 2015, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ duplica quando se muda de $L_0=12,5$ mm (5,24 kN) para $L_0=25$ mm (10,55 kN). Para valores superiores de L_0 , ocorrem aumentos significativos de $P_{m\acute{a}x}$, nomeadamente de $L_0=25$ mm para $L_0=37,5$ mm, no qual se observa um incremento de 38,8%. Para $L_0=50$ mm, este incremento é menor, sendo de apenas 17,2%, o que demonstra que um aumento de L_0 não seria muito vantajoso. O Sikaforce® 7752 continua a manter o seu comportamento intermédio entre o Araldite® AV138 e o 2015. Para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm, este é o adesivo que possui $P_{m\acute{a}x}$ mais reduzido, conseguindo ultrapassar o Araldite® AV138 em $L_0=37,5$ mm. Os incrementos são satisfatórios, com 86,5% de $L_0=12,5$ mm para $L_0=25$ mm, 46,5% de $L_0=25$ mm para $L_0=37,5$ mm e 31,4% de $L_0=37,5$ mm para $L_0=50$ mm. No caso deste adesivo, é provável que se fossem obter melhores resultados com o aumento de L_0 , mas também é provável que esses resultados fossem muito semelhantes àqueles já obtidos pelo Araldite® 2015 para L_0 já testados. Os valores de desvio padrão são bastante razoáveis, com exceção de $L_0=12,5$ mm para o Araldite® AV138, com um valor de 6,6%. Para este mesmo L_0 , mas para o Araldite® 2015, obteve-se também o desvio padrão máximo, neste caso de 8,5%. Para $L_0=25$ mm do Sikaforce® 7752, foi obtido o valor de 6,7%.

A configuração de junta de chanfro interior tem um comportamento diferente das configurações anteriormente abordadas, pois neste caso $P_{m\acute{a}x}$ não varia em função de L_0 , mas sim em função de α . De acordo com os dados obtidos, os três adesivos apresentam uma tendência muito semelhante, à medida que se diminui α . Os incrementos de $P_{m\acute{a}x}$ são relativamente reduzidos para as configurações de 45° a 10° , sendo que $P_{m\acute{a}x}$ sofre um aumento muito acentuado quando o ângulo α muda para $3,43^\circ$. Nesta configuração, o Araldite® AV138 é o adesivo com a melhor *performance*, obtendo sempre os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$ para todos os ângulos testados. Por exemplo, para $\alpha=3^\circ$, $P_{m\acute{a}x}$ assume um valor de 29,7 kN, enquanto o Araldite® 2015 tem um $P_{m\acute{a}x}$ de 21,9 kN. Aqui, o Sikaforce® 7752 fica em último lugar, obtendo apenas $P_{m\acute{a}x}$ de 13,5 kN. A escolha clara recai no Araldite® AV138, como sendo o adesivo mais adequado para esta

configuração. O Araldite® 2015 é uma segunda opção bastante viável, obtendo resultados bastante razoáveis. O Sikaforce® 7752 é o adesivo com a pior *performance* nesta configuração, não conseguindo manter a sua posição intermédia entre o Araldite® 2015 e o Araldite® AV138. No que diz respeito aos valores de desvio padrão máximos para cada adesivo, existem valores razoáveis e outros um pouco elevados. No Araldite® AV138, para 45° foi obtido um valor de 11%. No Araldite® 2015, obteve-se um valor de 17,4%, para 45°. No Sikaforce® 7752, o valor mais alto foi para um α de 30°, com 10,9%.

3.2 Trabalho numérico

3.2.1 Condições da análise numérica

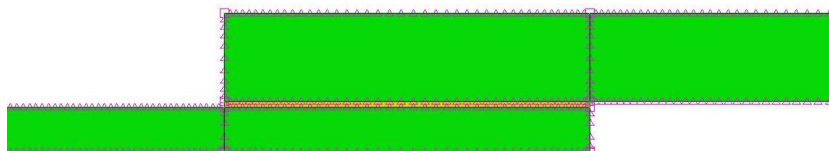
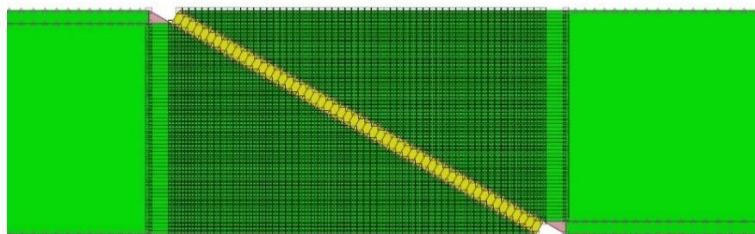
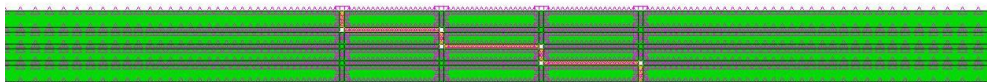
A análise numérica dos quatro tipos de junta foi executada, usando o *software* ABAQUS®. Tendo como base o MEF, na escolha deste *software*, foi também considerado o facto de este ter integrado um módulo de Modelo de Dano Coesivo, usado para prever a resistência das juntas adesivas seleccionadas. Neste *software*, os aderentes foram modelados como sendo sólidos elasto-plásticos e os adesivos com elementos de MDC (ver Figura 60). As juntas foram modeladas em duas dimensões, com elementos sólidos de estado plano de deformação para modelação dos aderentes. No caso dos elementos MDC da camada adesiva, foi apenas considerado um elemento da espessura do adesivo, que segue uma lei de tracção-separação triangular.



Figura 60 – Atribuição das características dos materiais no ABAQUS®

A análise de rotura por MDC foi efectuada, considerando não linearidades geométricas. Para os modelos de análise de tensões, as malhas são bem refinadas, de forma a se conseguir obter resultados mais precisos, principalmente na zona de sobreposição, até porque a malha é mais refinada nesta zona e nas proximidades, diminuindo ao longo do resto da junta adesiva. O número de elementos atribuídos e do *bias ratio* (rácio de refinamento crescente ao longo de uma aresta de um modelo) depende do comprimento da junta e da necessidade, ou não, de obter resultados mais precisos.

Tal como foi referido anteriormente, a zona de sobreposição e proximidades das juntas foram as que tiveram a malha mais refinada (ver Figura 61, Figura 62, Figura 63 e Figura 64), assim sendo, o efeito *bias* foi aplicado da zona central da junta para as extremidades.

Figura 61 - Efeito *bias* na região de sobreposição da JSSFigura 62 - Efeito *bias* na região de sobreposição da JSDFigura 63 - Efeito *bias* na região de sobreposição da junta de chanfro interiorFigura 64 - Efeito *bias* na região de sobreposição da junta em degrau

No que diz respeito à região da junta que não está em contacto com o adesivo, foi utilizado um efeito *bias*, de forma a que a malha fosse mais refinada das extremidades para a zona de sobreposição (ver Figura 65, Figura 66 e Figura 67).

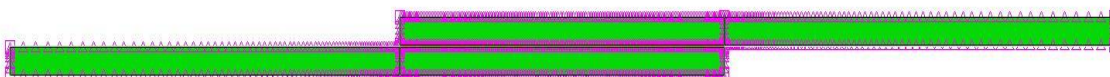
Figura 65 – Efeito *bias* da malha na região não ligada dos aderentes para JSS



Figura 66 - Efeito *bias* da malha na região não ligada dos aderentes, para JSD

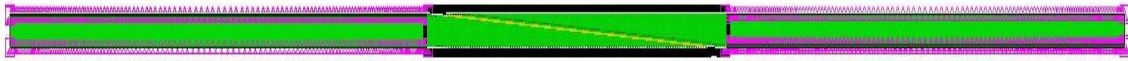


Figura 67 - Efeito *bias* da malha na região não ligada dos aderentes, para junta de chanfro interior

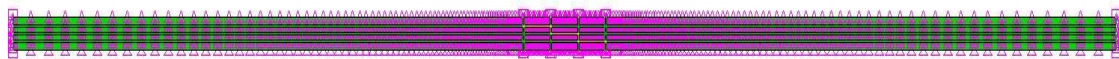


Figura 68 - Efeito *bias* da malha na região não ligada dos aderentes para junta em degrau

Esta variação do número de elementos e do efeito *bias* na malha das diferentes configurações de junta, tem como principal objectivo diminuir a capacidade de processamento necessária para as simulações, e, conseqüentemente, o tempo destas, isto sem comprometer a precisão dos resultados obtidos. No caso da simulação da junta de chanfro interior para $\alpha=3,43^\circ$, esta opção foi crucial, uma vez que esta foi a configuração de junta com maior peso a nível de processamento e de tempo, sendo que cada simulação demorava aproximadamente 90 minutos.

Para se conseguir simular de forma realista as condições dos ensaios experimentais, as condições fronteira foram definidas, de forma a que uma das extremidades da junta fosse encastrada e que a extremidade oposta estivesse sujeita a uma restrição vertical e a um deslocamento de tracção. Nas Figura 69, Figura 70, Figura 71 e Figura 72, é possível observar as condições de fronteira para ensaios aplicadas nas juntas, usando o ABAQUS®.

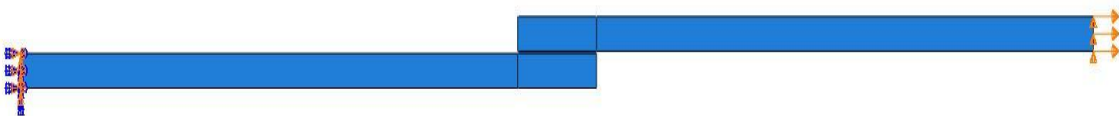


Figura 69 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos para JSS

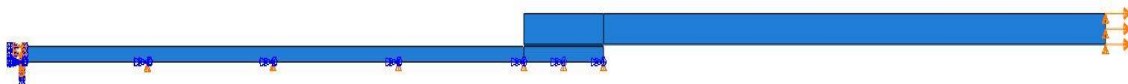


Figura 70 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos para JSD



Figura 71 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos para junta de chanfro interior



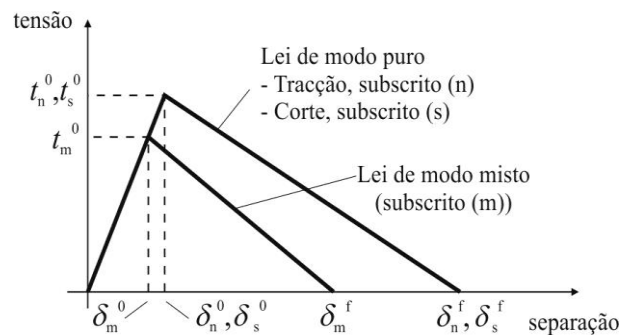
Figura 72 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos para junta em degrau

3.2.2 Modelo de dano coesivo

Como falado anteriormente, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e, subsequentemente, degradação das propriedades dos materiais até à rotura.

3.2.2.1 Modelo de dano triangular

A lei de dano triangular, ver Figura 73, assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva (\mathbf{K}), que contém os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões e deformações em tracção e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respectivamente).

Figura 73 - MDC triangular implementado no *software* ABAQUS®.

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

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por $K_{nn} = E$, $K_{ss} = G$ e $K_{ns} = 0$. A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões para iniciação do dano que se segue, por já ter sido provada a sua fiabilidade [73], sendo dado por:

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

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 73), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma:

$$\frac{G_n}{G_n^c} + \frac{G_s}{G_s^c} = 1. \quad (3)$$

3.2.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tracção e corte, é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_n^c e G_s^c (Figura 73). No passado, foram publicados alguns estudos que, por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço [74, 75]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [76, 77]. Assim sendo, é necessária a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados. Para o adesivo Araldite® 2015, as leis coesivas da camada de adesivo foram determinadas em trabalhos anteriores [78, 79], por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Nestes trabalhos é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_n^c e G_s^c através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respectivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_n^c ou G_s^c é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tracção ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respectivo de caracterização à fractura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 11 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto. Os valores de E e G , módulo de elasticidade em tensão e corte da camada de adesivo, respectivamente, foram

determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST – *Thick adherend shear test*), respectivamente [80].

Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm

E [MPa]	1850	G [MPa]	650
t_n^0 [MPa]	23,0	t_s^0 [MPa]	22,8
G_n^c [N/mm]	0,43	G_s^c [N/mm]	4,7

Tal como no caso anterior, para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138, foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [81]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fractura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente. Foram utilizados os valores de resistência à tracção e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaio de corte TAST para a definição de t_n^0 e t_s^0 , respectivamente. Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_n^c e G_s^c para adesivos frágeis. As leis obtidas para tracção e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com L_0 de 20 mm), e as leis do adesivo foram estimadas de forma idêntica ao caso anterior, por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas, com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST). Noutro trabalho [48], conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 12 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 12 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm

E [MPa]	4890	G [MPa]	1560
t_n^0 [MPa]	39,45	t_s^0 [MPa]	30,2
G_n^c [N/mm]	0,2	G_s^c [N/mm]	0,38

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de G_s^c por ensaio de fractura ENF, seguido de

ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [82]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de t_s^0 e G_s^c obtidos na referência [82], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efectuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tracção, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de G_n^c foi obtido por ensaios de fractura DCB [83], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tracção de provetes maciços, ensaiados no mesmo trabalho [78]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solitação à tracção, o valor de t_n^0 não tem influência digna de registo para variações de t_n^0 até 25% do valor obtido por método inverso (variação nos dois sentidos) [78], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [83]. A Tabela 13 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 13 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm

E [MPa]	493,81	G [MPa]	37,49
t_n^0 [MPa]	12,25	t_s^0 [MPa]	10,50
G_n^c [N/mm]	2,36	G_s^c [N/mm]	5,56

3.2.3 Análise de tensões na junta

Neste capítulo, será efectuada uma análise das tensões nas variadas configurações de junta, nomeadamente JSS, JSD, junta em degraus e junta de chanfro interior, juntamente com os três adesivos seleccionados, nomeadamente Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

3.2.3.1 Juntas de sobreposição simples

Neste subcapítulo, analisam-se as tensões instaladas em regime elástico nas JSS, comparando as tensões σ_y e τ_{xy} obtidas numericamente no ABAQUS®. A análise é realizada a meio da espessura do adesivo, para os diversos adesivos e valores de L_0 das juntas. Esta análise tem como objectivo 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 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 $0 \leq x/L_0 \leq 1$ [70, 71].

As Figura 74, Figura 75 e Figura 76 apresentam as distribuições de tensões σ_y para as JSS, em função de L_0 . As tensões σ_y registam uma magnitude inferior a $\tau_{méd}$, com excepção das extremidades de ligação das juntas, em virtude de estas constituírem zonas de singularidade de tensão, devido à rotação dos substratos [7, 84, 85]. Por causa desta rotação, nestas regiões geram-se tensões de tracção, 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 arrancamento das extremidades da ligação adesiva e compressão na zona intermédia da mesma. A resistência destas juntas é significativamente afectada pelas tensões σ_y , dada a criticidade das mesmas para a ligação adesiva, pelo que estas podem conduzir à rotura precoce da junta [14, 86, 87].

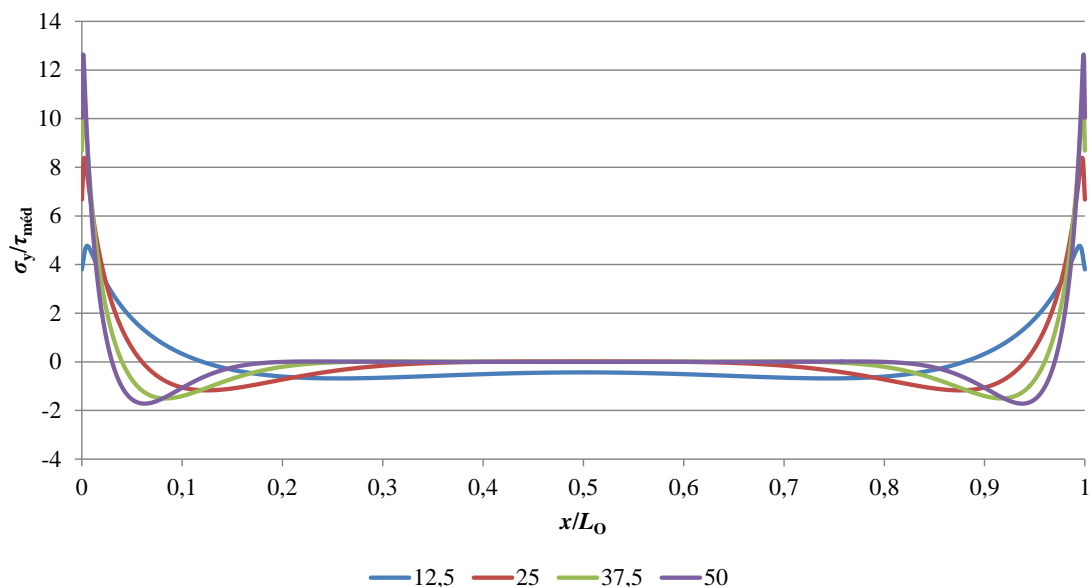


Figura 74 - Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0

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 [88].

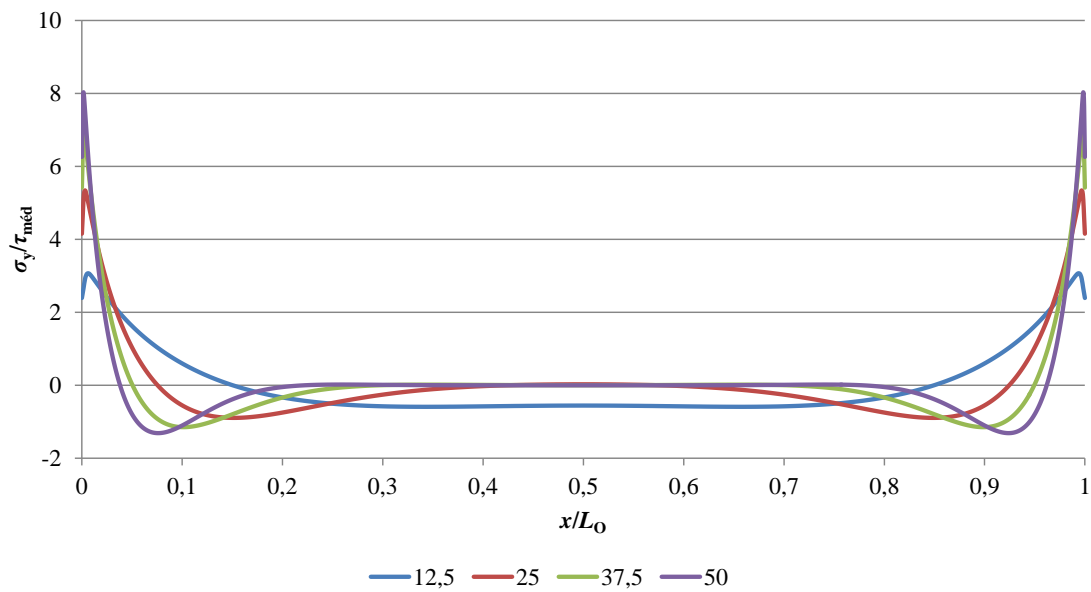


Figura 75 - Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0

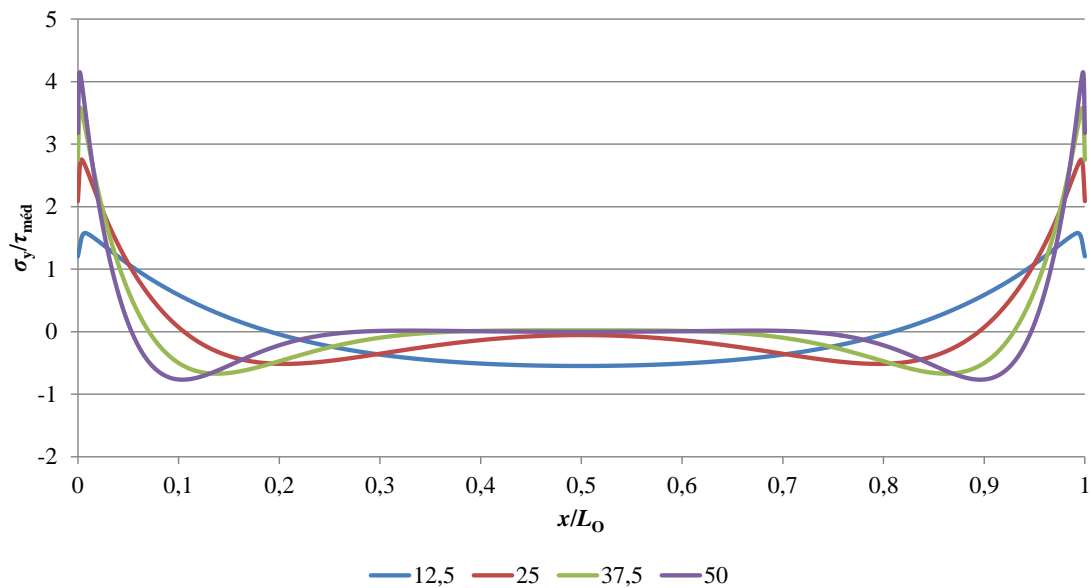


Figura 76 - Distribuição de tensões σ_y em JSS com o adesivo Sikaforce® 7752, para os diversos valores de L_0

Nas Figura 77, Figura 78 e Figura 79, 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 $\tau_{méd}$, exceptuando nas extremidades da sobreposição, que constituem zonas de concentração de tensão [7, 84, 85]. 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 [89, 90]. No entanto, na região central da sobreposição, o referido

efeito é anulado, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tracção 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 [48]. 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 fractura ocorre no momento em que é atingida τ_f , e pela capacidade de plastificação quase nula destes adesivos [90]. 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 $\tau_{méd}$ [91]. 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 [14, 92]. Deste modo, numa situação limite, toda a região da sobreposição estaria a ser solicitada no momento da rotura [91].

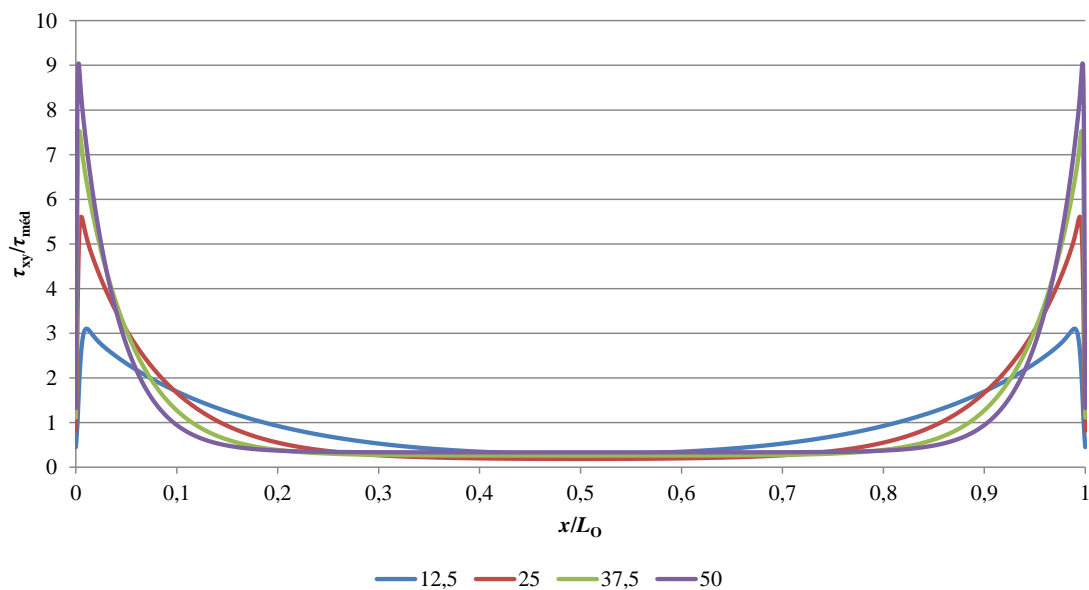


Figura 77 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0 .

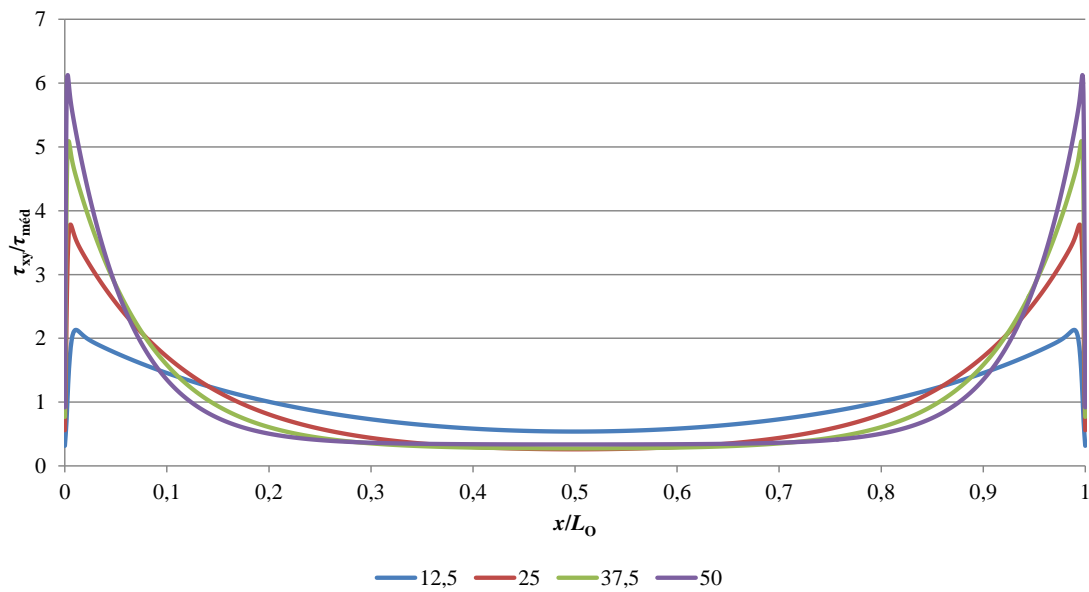


Figura 78 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0 .

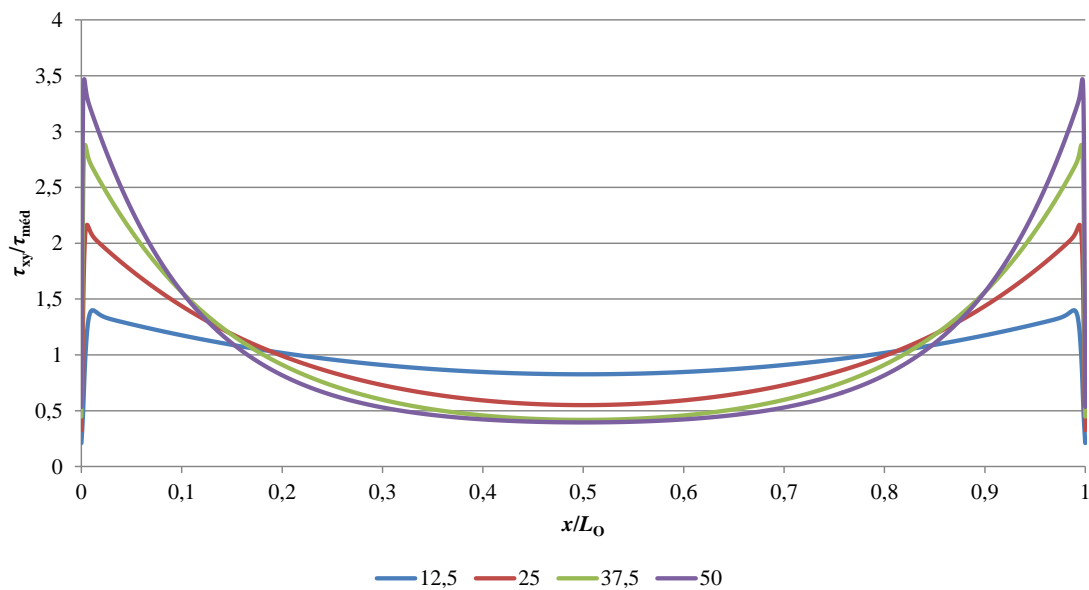


Figura 79 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSS com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0 .

Fazendo uma 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 tracção de 9,04, 6,1 e de 3,5, respectivamente, o que condiz com a ordem decrescente de rigidez dos mesmos.

3.2.3.2 Juntas de sobreposição dupla

Neste subcapítulo, analisam-se as tensões instaladas em regime elástico nas 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 objectivo 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 $P_{máx}$. Os gráficos das tensões apresentados, foram obtidos mediante um procedimento de normalização de tensões, que consistiu em dividir as tensões σ_y e τ_{xy} por $\tau_{méd}$, 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 $0 \leq x/L_0 \leq 1$ [70, 71].

As Figura 80, Figura 81 e Figura 82, 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 se regista uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , com excepção das extremidades da ligação, devido à singularidade de tensão [7, 84, 85]. 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 tracção [89], e picos de compressão na extremidade interior da sobreposição [93]. Estas diferenças nos perfis de tensões, devem-se sobretudo ao facto das JSD não apresentarem deflexão transversal do substrato interior, devido ao carregamento simétrico [94, 95]. Isto promove uma redução generalizada das tensões de pico σ_y nas JSD em todos os valores de L_0 [96]. 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 [93].

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.

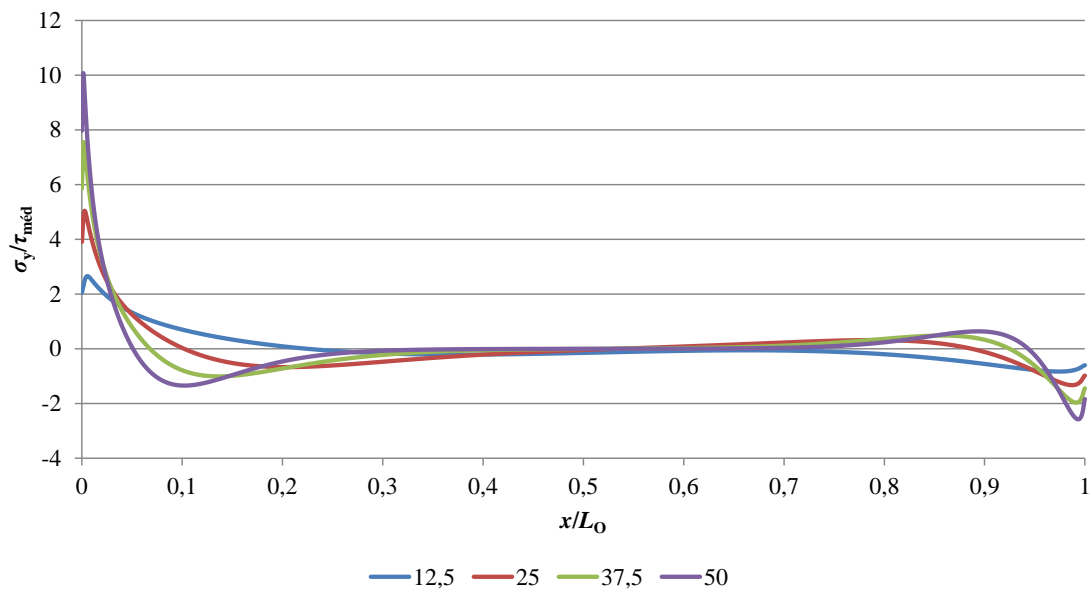


Figura 80 - Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0 .

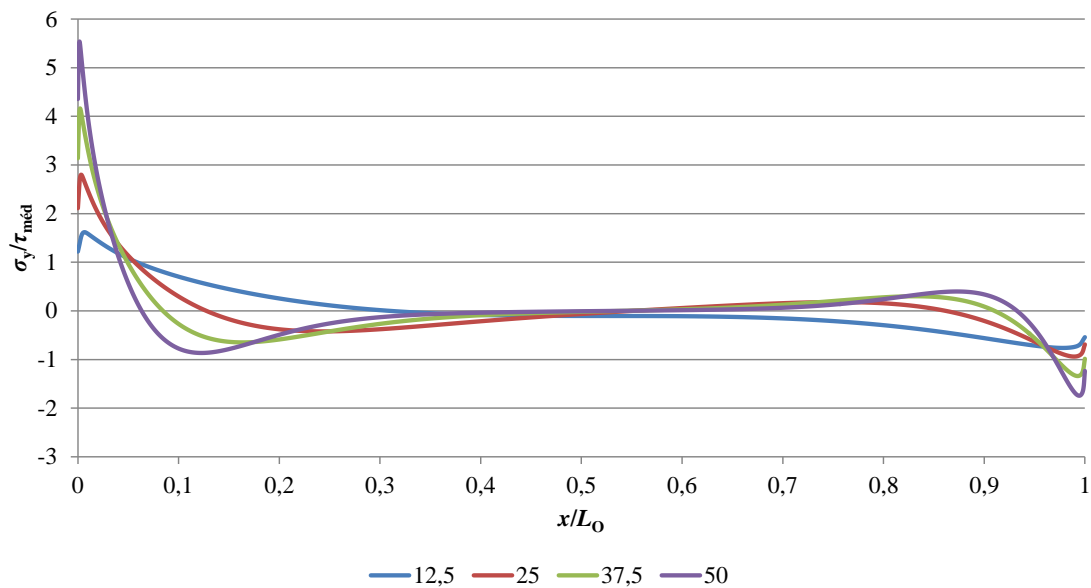


Figura 81 - -- Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0 .

Para o valor de $L_0=50$ mm, os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 apresentam, respectivamente, valores de pico de tensão σ_y normalizados em tracção 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%, respectivamente.

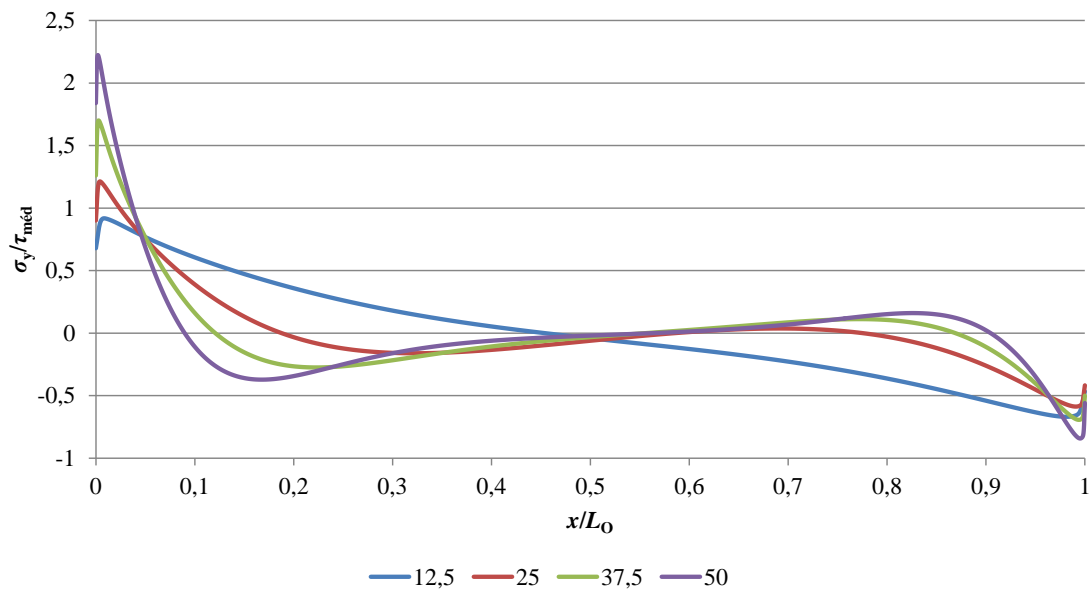


Figura 82 - Distribuição de tensões σ_y em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0 .

Nas Figura 83, Figura 84 e Figura 85, 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 solitação 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 [97]. 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 [93]. As modificações no perfil de tensões τ_{xy} das JSD, devem-se reflectir numa resistência da junta superior a duas vezes a das JSS, correspondente à relação entre as áreas coladas de ambas as configurações de junta [92]. À semelhança do que se verificou nas JSS, o aumento de $P_{máx}$ 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 [90].

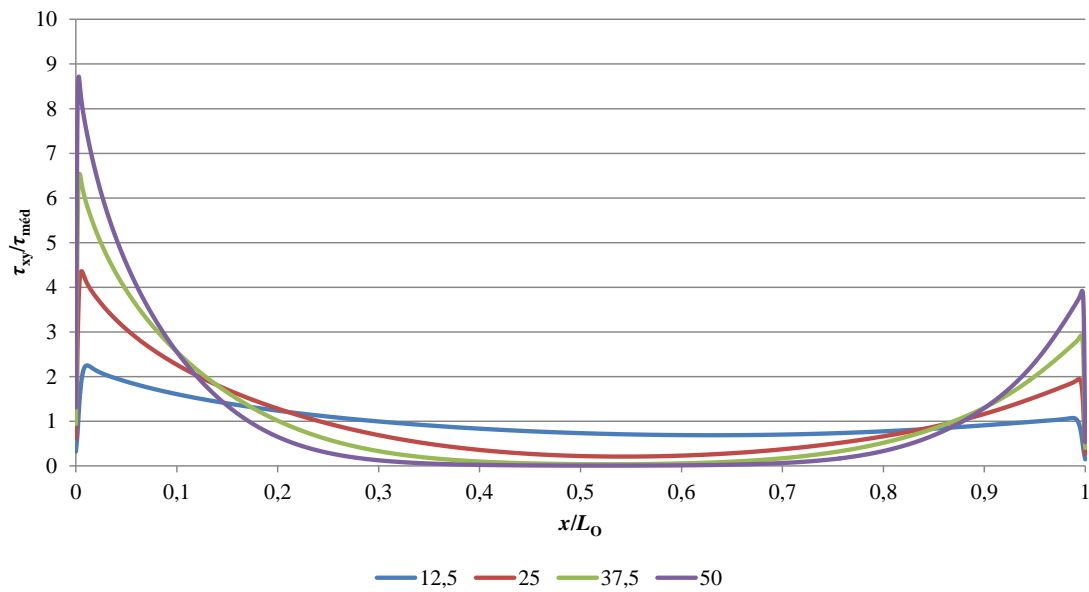


Figura 83 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® AV138, para os diversos valores de L_0 .

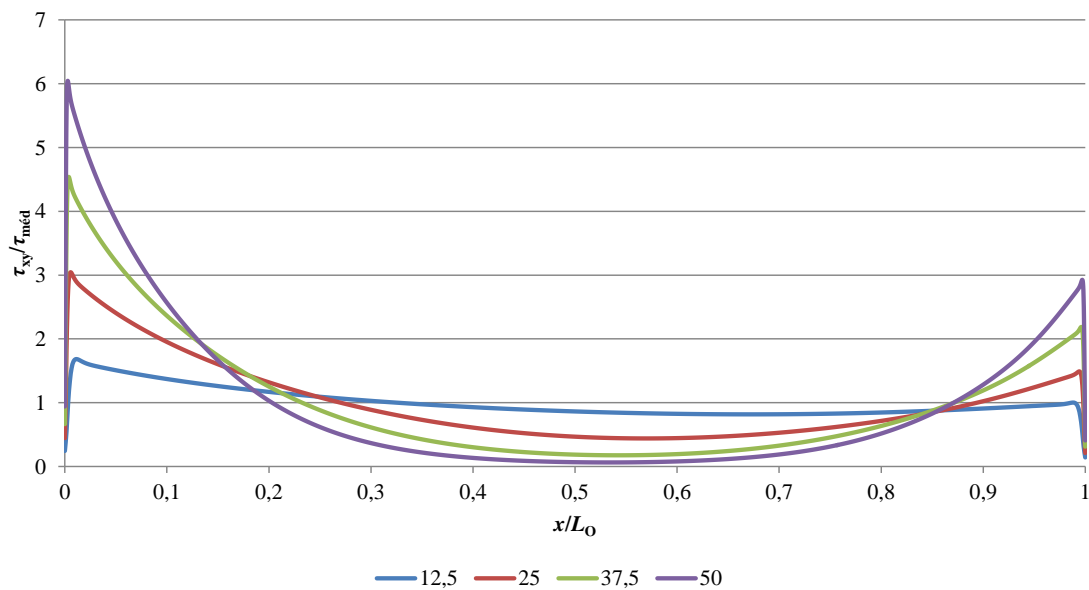


Figura 84 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo Araldite® 2015, para os diversos valores de L_0 .

Fazendo uma comparação entre os três adesivos ensaiados, denota-se que o adesivo Araldite® AV138, devido à sua rigidez, é o 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.

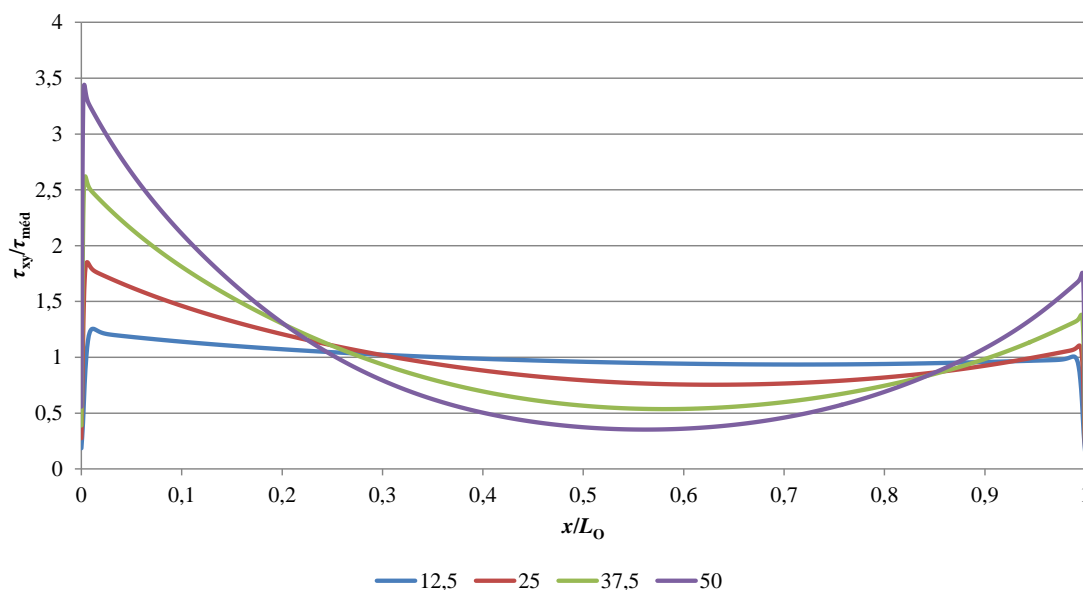


Figura 85 - Distribuição de tensões τ_{xy} em JSD com o adesivo SikaForce® 7752, para os diversos valores de L_0 .

Quantificando os picos de tensão 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, respectivamente. Esta variação está em concordância com a ordem 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%, respectivamente. Este decréscimo, deve ser responsável por um aumento da resistência superior a duas vezes, das JSD face às JSS, para igual valor de L_0 (relação de áreas coladas).

3.2.3.3 Juntas em degrau

Este subcapítulo, apresenta a distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) a meio da espessura do adesivo para as juntas em degrau, considerando os vários valores de L_0 , para melhor compreender as variações na resistência para as diferentes configurações de junta. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{med} , que representa a média dos valores de τ_{xy} na ligação adesiva, para cada L_0 . As distribuições de tensões são apresentadas em função de x/L_0 ($0 \leq x \leq L_0$) [72].

Inicialmente, são mostradas as diferenças na distribuição de tensões entre adesivos, como mostram as Figura 86 e Figura 87 para as tensões σ_y e τ_{xy} , respectivamente, considerando as juntas com $L_0=12,5$ mm. Não contabilizando a forma específica das curvas, que é abordada após esta análise, é claro que maior rigidez aumenta os picos de tensão, especialmente nas arestas dos degraus. É sabido, através de um estudo de

Adams [7] para juntas de sobreposição simples e dupla, que as deformações começam pelas tensões dos aderentes, o que leva ao desenvolvimento de maiores tensões, consoante a rigidez do adesivo. Elevados picos de tensão são propensos a afectar a resistência das juntas, especialmente para adesivos rígidos, como o Araldite® AV138, porque estes adesivos não estão acomodados a estes picos [98]

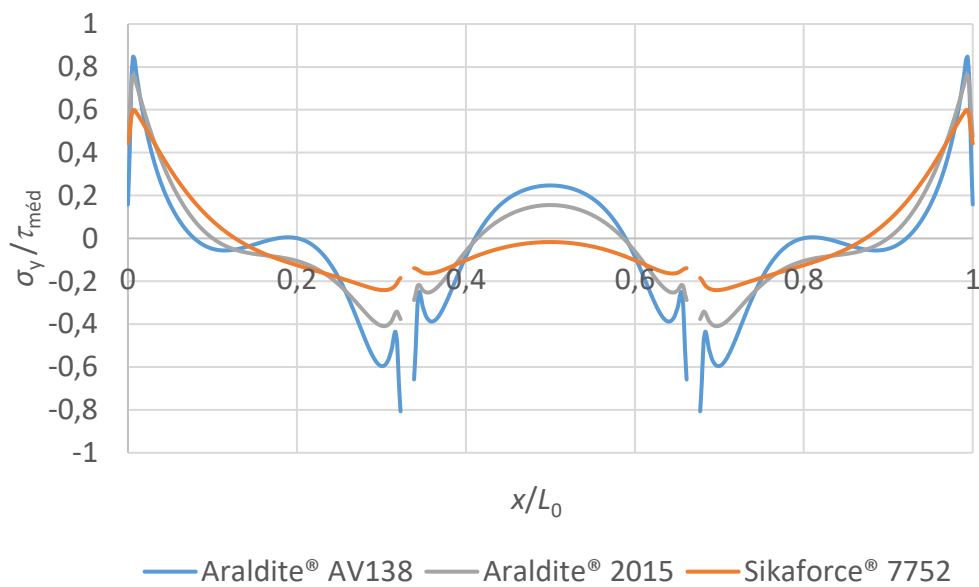


Figura 86 – Comparação das tensões de arrancamento entre os três adesivos, para $L_0=12,5$ mm

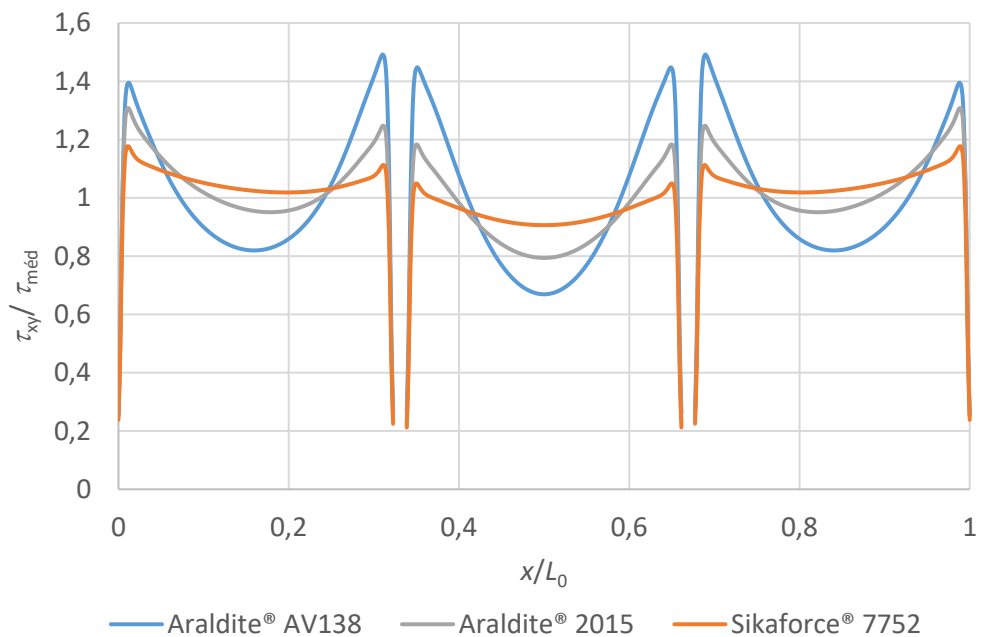


Figura 87 – Comparação das tensões de corte entre os três adesivos para, $L_0=12,5$ mm

Seguindo esta análise, a distribuição de tensões σ_y e τ_y é avaliada em função de L_0 .

As Figura 88 e Figura 89 mostram a distribuição de tensões σ_y e τ_{xy} , respectivamente, para o Araldite® 2015 com $12,5 \leq L_0 \leq 50$ mm. Apesar de a diferença nos picos de tensão entre os adesivos ser coerente com o que foi referido anteriormente, os resultados e conclusões que se seguem a respeito do efeito de L_0 nas tensões, podem ser extrapolados para os outros dois adesivos neste estudo. Independentemente de L_0 , a tensão σ_y é muito menor que a tensão de corte média $\tau_{méd}$, com excepção dos degraus. O maior valor de tensão σ_y deu-se em $x/L_0=0$ e 1, e registaram-se tensões σ_y compressivas nas transições entre degraus em $x/L_0 \approx 0,33$ e $0,67$.

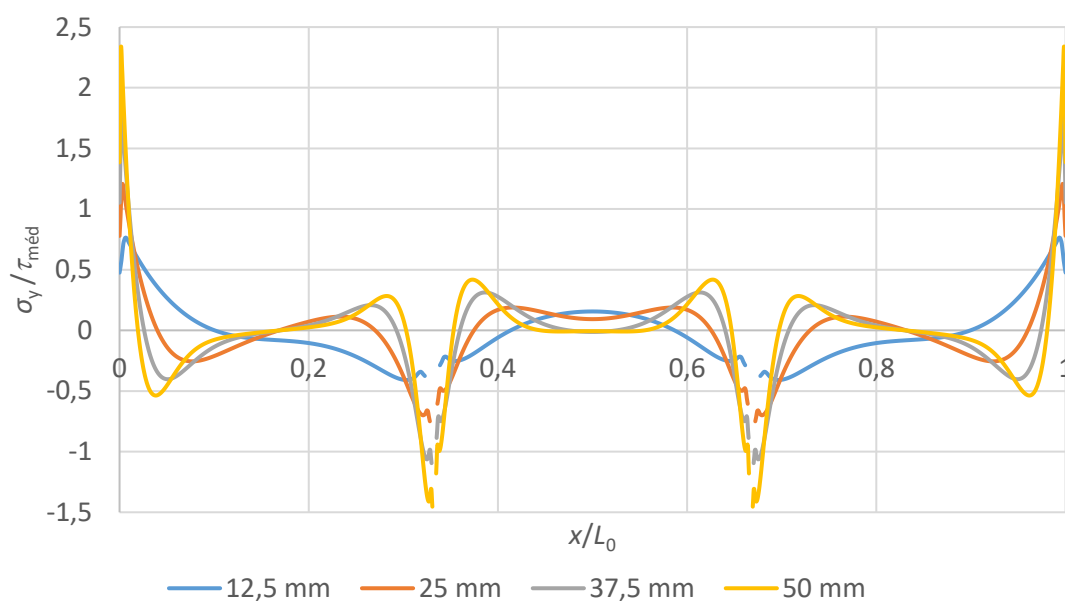


Figura 88 – Comparação das tensões de arrancamento do Araldite® 2015 em função de L_0

Se não forem contabilizadas as variações de tensão nos degraus, está-se perante o fenómeno que acontece nas JSS [94, 99], que é provocado pela rotação dos aderentes, que causa arrancamento das extremidades da ligação e comprime a zona intermédia da mesma. A distribuição de tensões τ_{xy} , apresentada na Figura 89, varia bastante entre os três degraus, mas no interior de cada degrau, revelou uma variação típica de JSS. De facto, em cada degrau é encontrada uma zona interior com tensão reduzida, com picos de tensão nas extremidades [100]. Isto acontece, devido à variação da deformação axial do aderente em cada degrau.

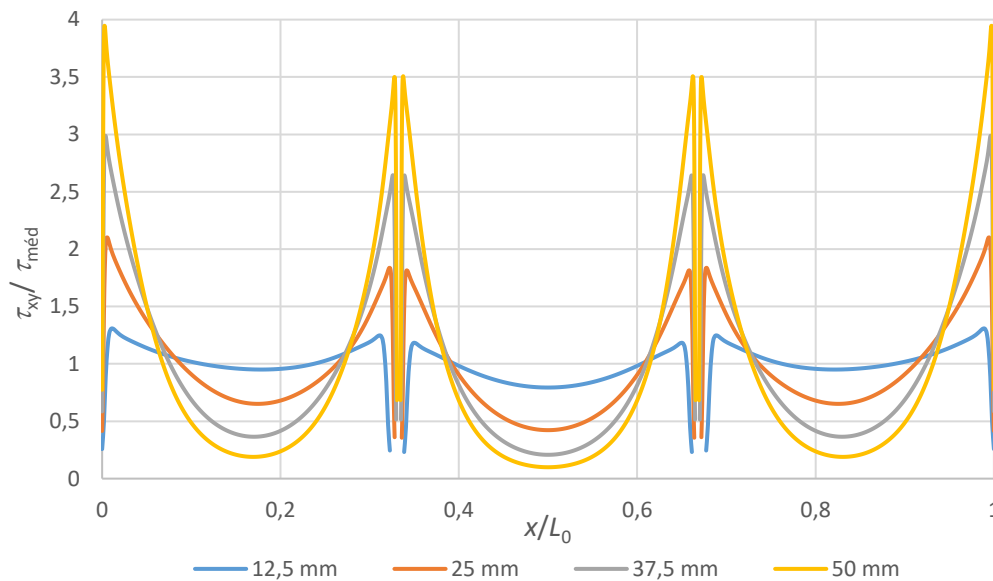


Figura 89 – Comparação das tensões de corte do Araldite® 2015 em função do L_0

Portanto, a sobreposição de dois aderentes em degrau e com comportamento oposto de deformação, resulta em picos de tensão τ_{xy} em ambas as extremidades dos degraus. Entre os degraus, os degraus de fora têm uma magnitude ligeiramente maior de tensão τ_{xy} do que no degrau interno, embora esta variação não seja significativa [53]. Comparando os diferentes L_0 , é notório que os picos de tensão τ_{xy} aumentam progressivamente com o aumento deste parâmetro, o que é devido ao aumento dos gradientes da deformação axial dos aderentes dentro de cada degrau, para maiores L_0 .

Esta modificação no perfil de tensão ao longo de L_0 , pode afectar severamente a resistência da junta se o adesivo for frágil. Neste caso, ocorre a rotura quando a tensão de rotura do adesivo for atingida no ponto mais carregado da ligação, que tipicamente ocorre nas suas extremidades. Isto não deve ser crítico na presença de adesivos dúcteis, porque estes sofrem plastificação quando é atingido o pico de tensão, e as forças transmitidas continuam a aumentar, enquanto o limite de ductilidade do adesivo não for atingido [101]. Então, $P_{máx}$ não deve aumentar proporcionalmente com o aumento de L_0 , dado que tanto a tensão σ_y como a tensão τ_{xy} aumentam com L_0 . Este efeito deve ser mais visível usando adesivos rígidos.

3.2.3.4 Juntas de chanfro interior

Neste subcapítulo é feita uma análise às tensões de corte e arrancamento existentes nas juntas de chanfro interior testadas com os três adesivos, através de gráficos que relacionam a evolução da tensão com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), que está compreendido entre os valores de 0 e 1. Estes dados são obtidos

pelo ABAQUS®, e posteriormente tratados em MS Excel® com o objectivo de poderem ser analisados na forma de tensão normalizada versus posição na junta. As tensões σ_y e τ_{xy} são apresentadas normalizadas pela tensão de corte média ($\tau_{méd}$), para cada valor de α [102]. De modo a obter-se a distribuição das tensões e a efectuar-se a comparação entre os valores obtidos para as várias juntas de chanfro interior, considerou-se para todos os casos de estudo o primeiro incremento (ou seja, considerou-se valores idênticos de deslocamento aplicado) dos resultados obtidos pelo *software* ABAQUS®, e as tensões a meio da camada de adesivo (*path* definido na modelação das juntas foi a meio da camada do adesivo).

De seguida, apresentam-se várias figuras que mostram a evolução das tensões σ_y normalizadas em função do adesivo, e para $\alpha=3,43^\circ$ (Figura 90) e $\alpha=45^\circ$ (Figura 91).

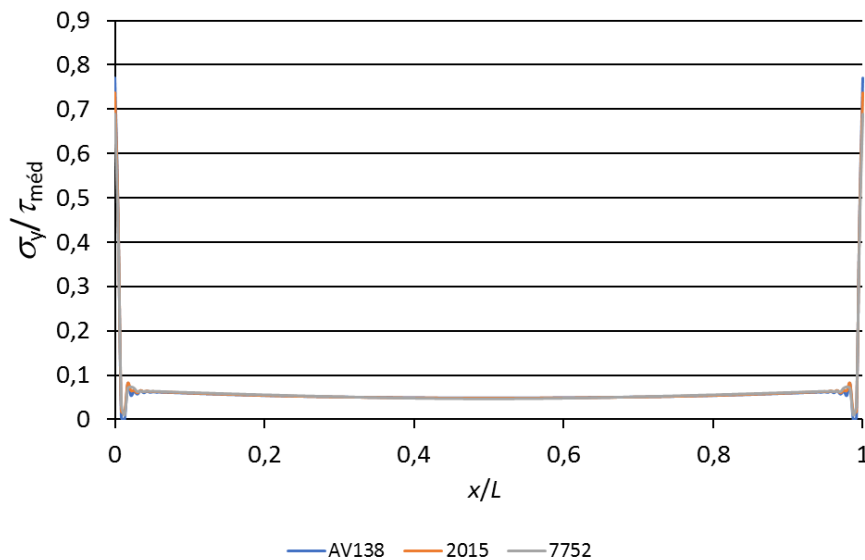


Figura 90 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para $3,43^\circ$

Pode-se observar que as tensões σ_y crescem (mais acentuadamente em forma de picos) com o aumento da rigidez do adesivo, isto é, as curvas de tensões para o adesivo Araldite® AV138 apresentam os picos de tensões mais altos e o adesivo SikaForce® 7752 o comportamento mais uniforme. Este comportamento está directamente relacionado com a rigidez do adesivo, e vai de encontro a análises semelhantes com outras configurações de juntas, nomeadamente juntas de sobreposição simples e dupla [49], e é particularmente crítico no caso de adesivos que combinem elevada rigidez e fragilidade [103]. Neste caso, a camada de adesivo não consegue acomodar os picos de tensão que se geram na camada de adesivo, o que afecta negativamente a resistência da junta. Comparando as curvas da Figura 90 e Figura 91, é possível verificar que existe uma aproximação da tensão de arrancamento à de corte, com o aumento de α ,

independentemente do adesivo testado. No entanto, esta variação é abordada em mais detalhe nos capítulos seguintes.

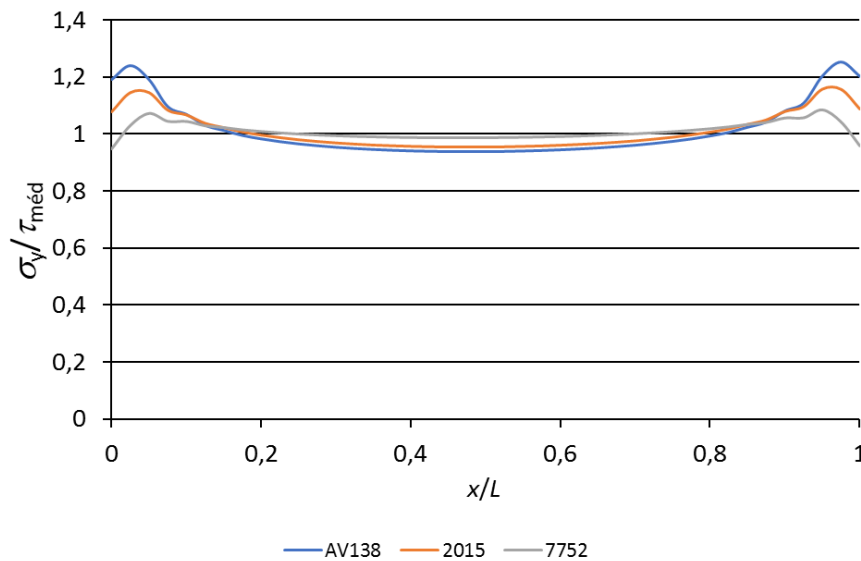


Figura 91 - Comparação da tensão normalizada de arrancamento entre adesivos, para 45°

As Figura 92, Figura 93 e Figura 94, apresentam as tensões σ_y normalizadas para cada adesivo em várias juntas de chanfro interior em função de α .

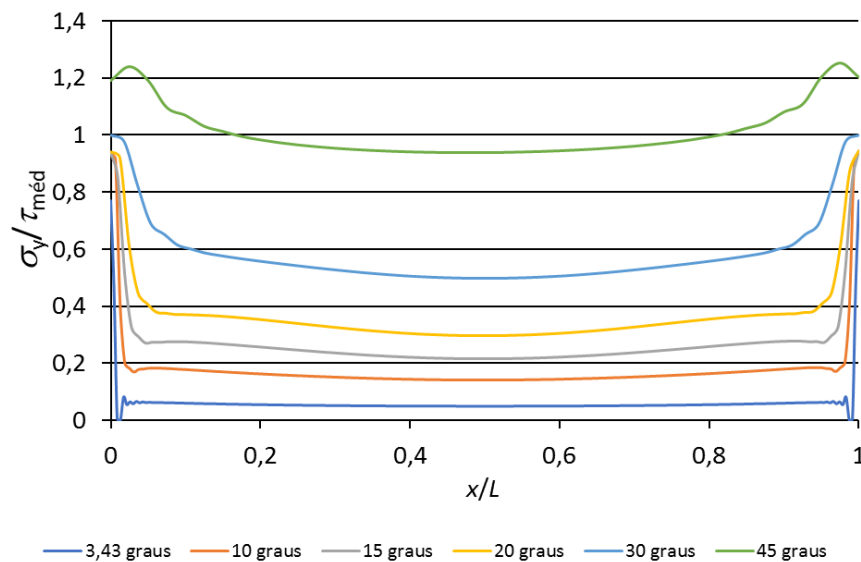


Figura 92 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138

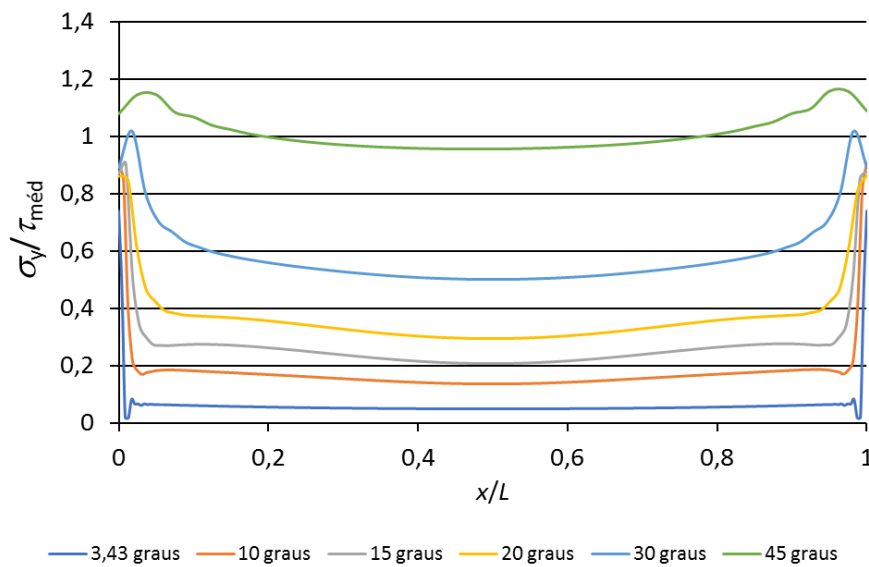


Figura 93 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015

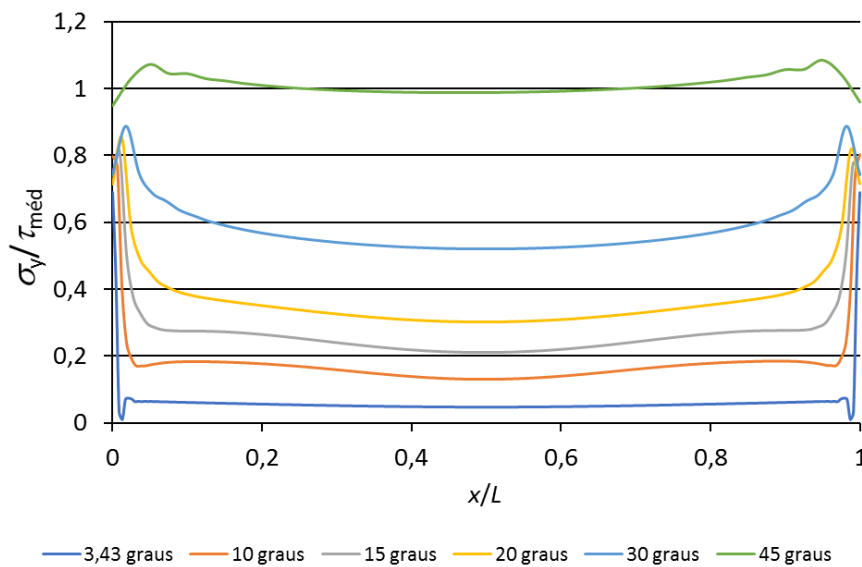


Figura 94 - Comparação da tensão de arrancamento normalizada entre ângulos, para o adesivo SikaForce® 7752

O que se observa é que, com o aumento de α , as tensões σ_y normalizadas aumentam de forma significativa, tendendo para valores próximos da tensão de corte média, o que pode ser explicado pelo facto de o ângulo de chanfro interior de 45° proporcionar uma preponderância idêntica destas tensões [104]. A variação de α de $3,43^\circ$ para 45° , corresponde a um aumento de mais de dez vezes σ_y na zona intermédia da camada do adesivo, o que mostra que a diminuição do ângulo nestas juntas diminui consideravelmente o esforço de arrancamento. Esta modificação, pode ser explicada pela orientação dos esforços na junta de chanfro interior na zona de ligação, que se

aproximam de uma sollicitação de corte da camada adesiva. O efeito da redução de espessura do substrato, particularmente para valores de α reduzidos, traduz-se em tensões σ_y de magnitude insignificante, o que é bastante benéfico para o comportamento à rotura da junta adesiva, especialmente para adesivos rígidos que não conseguem acomodar este tipo de tensões. Este comportamento contrasta com o observado numa junta de sobreposição simples, em que a espessura de substrato se mantém constante, o que conduz a tensões σ_y significativas nas extremidades do adesivo [105]. A comparação entre os três adesivos mostra uma tendência semelhante, embora o aumento da rigidez do adesivo conduza a maiores gradientes e picos de tensão, nas extremidades da ligação.

Apresentam-se de seguida várias figuras que mostram a evolução da tensão normalizada de corte em função de α para os vários adesivos. A Figura 95 e Figura 96 mostram a evolução das tensões τ_{xy} normalizadas em função do adesivo e para $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=45^\circ$, respectivamente.

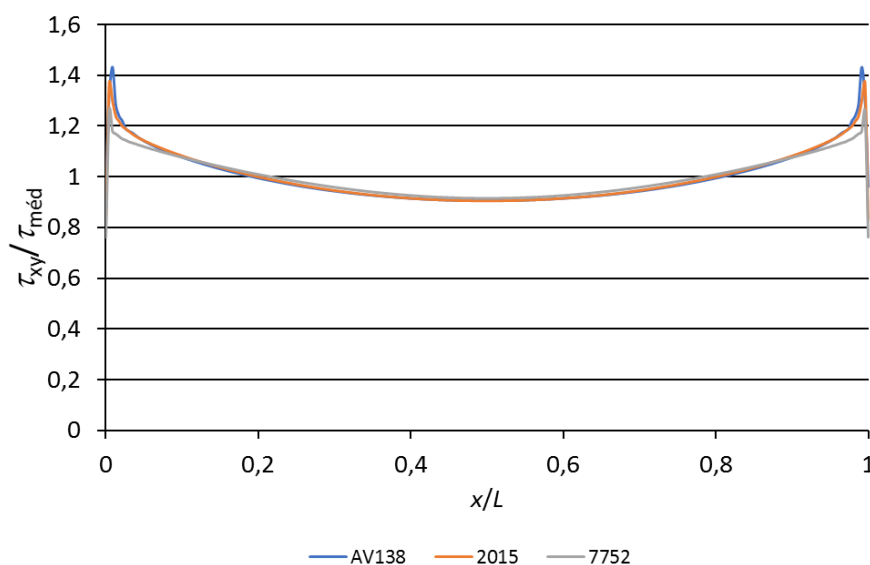


Figura 95 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para $3,43^\circ$

Analisando a Figura 95 e Figura 96, verifica-se que quanto maior a rigidez do adesivo, maior serão os picos de tensão obtidos, o que é prejudicial para as juntas, na medida em que o adesivo poderá não ter ductilidade suficiente para acomodar estas tensões, o que por sua vez pode provocar rotura. A magnitude dos picos de tensões τ_{xy} diminui com o aumento de α , o que será, no entanto, mais detalhado no estudo que se segue.

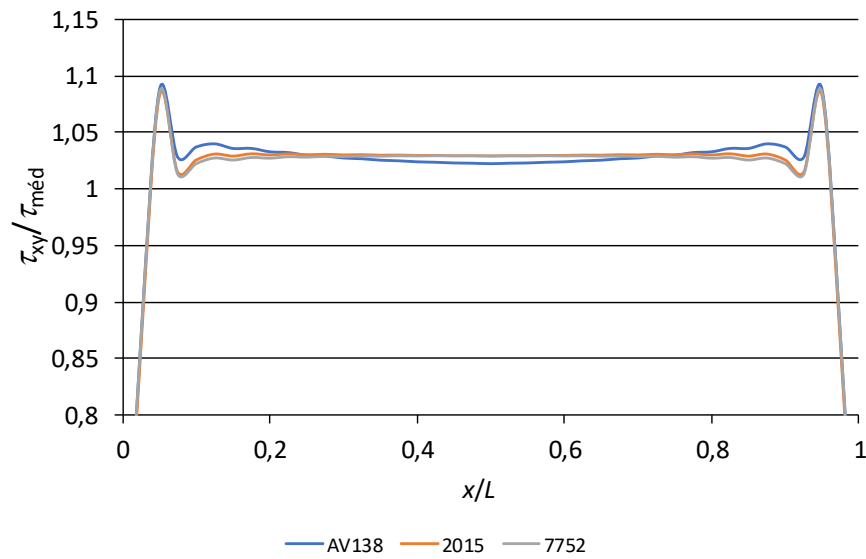


Figura 96 - Comparação da tensão normalizada de corte entre adesivos, para 45°

As Figura 97, Figura 98 e Figura 99, apresentam as curvas obtidas para o comportamento de cada adesivo em várias juntas de chanfro interior, em função de α .

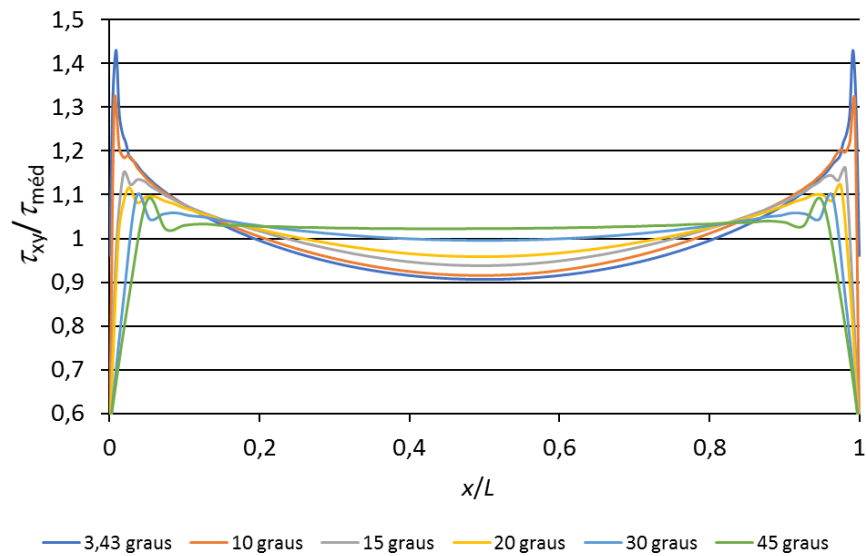


Figura 97 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® AV138

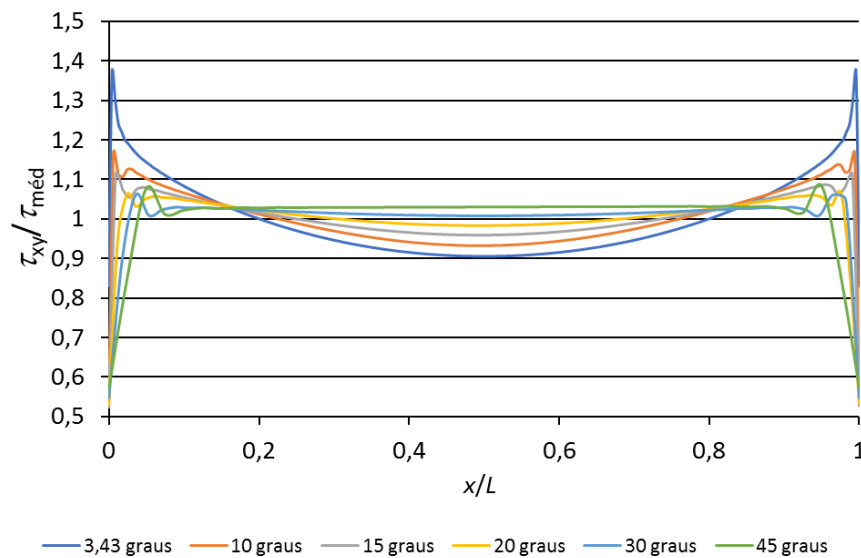


Figura 98 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo Araldite® 2015

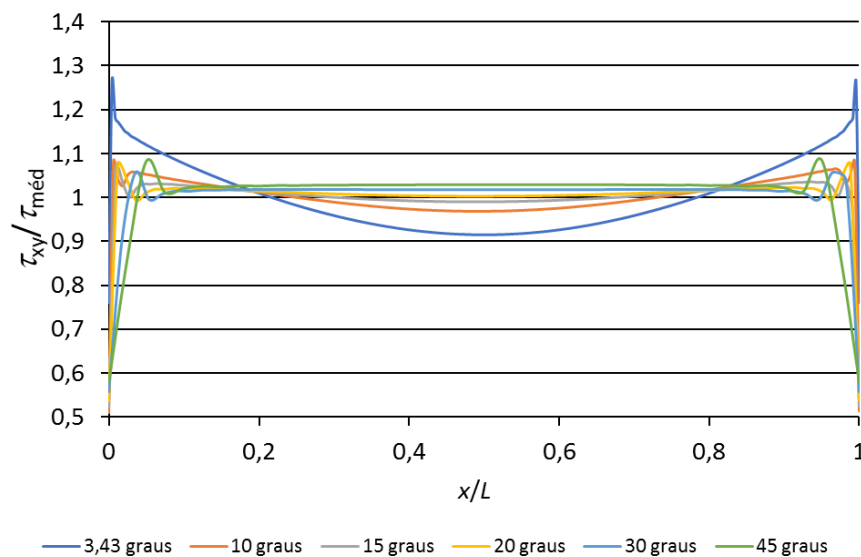


Figura 99 - Comparação da tensão de corte normalizada entre ângulos, para o adesivo SikaForce® 7752

Observando as Figura 97, Figura 98 e Figura 99, pode-se dizer que as tensões τ_{xy} normalizadas caracterizam-se pela existência de picos nas extremidades, e um comportamento mais uniforme na zona interior da ligação, independentemente do valor de α . Pela comparação de diferentes valores de α , verifica-se que os picos de tensão tendem a aumentar com a redução de α . Esta variação é particularmente significativa para α inferior a 10° , principalmente para os adesivos Araldite®. Isto pode ser explicado pelo facto de a variação da geometria da junta de chanfro interior aumentar o efeito de esforço diferencial dos substratos nas extremidades da ligação

[106], e que se pode encontrar frequentemente, por exemplo, em juntas de sobreposição [107]. O comportamento observado para valores de α reduzidos, pressupõe uma degradação do estado de tensão na camada adesiva, que por si só tenderia a diminuir a resistência da junta. No entanto, a diminuição de α também aumenta exponencialmente o comprimento da zona ligada, o que tipicamente se sobrepõe ao efeito das tensões e permite um grande aumento da resistência da junta [108]. O adesivo Araldite® AV138, é aquele que apresenta picos de valores mais altos, e o Sikaforce® 7752 é o que apresenta o comportamento mais uniforme. Esta modificação deve-se essencialmente à rigidez dos adesivos, já que, à medida que existe mais rigidez no adesivo, maior é a influência da deformação diferencial dos substratos nas extremidades da ligação [104].

3.2.4 Estudo da variável de dano

Nos subcapítulos que se seguem, serão apresentados os estudos da variável de dano SDEG para as várias configurações de junta. 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 as várias configurações de junta para os diferentes adesivos. Esta variável tem os seus valores compreendidos 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.

3.2.4.1 Junta de sobreposição simples

Através da análise da Figura 100, 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, excepto 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 [109].

A análise da evolução da variável de dano com o carregamento aplicado é também bastante útil. Este estudo foi realizado para as JSS [110] 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 $P_{m\acute{a}x}$).

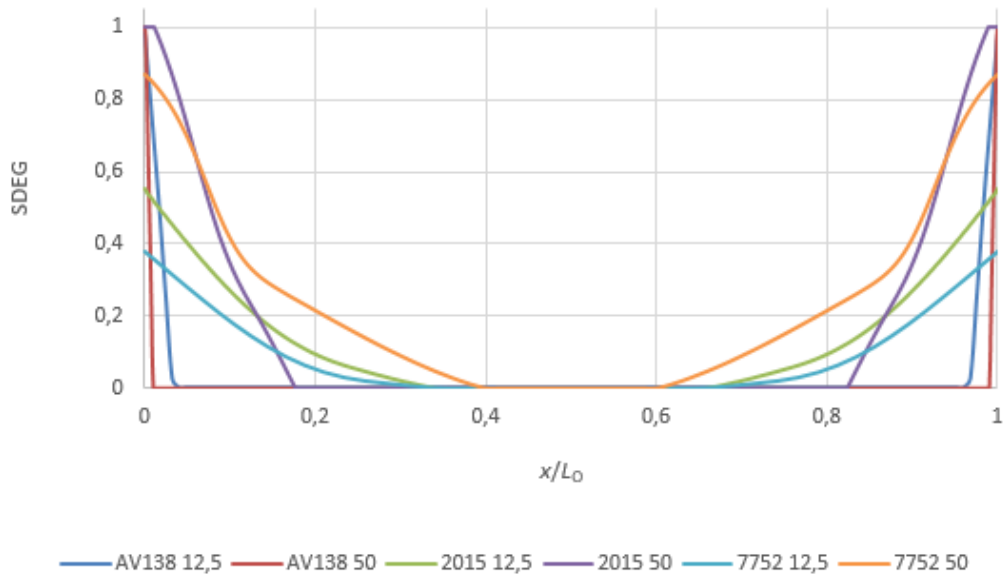


Figura 100 - Variável de dano na camada de adesivo no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingido, para as JSS [110]

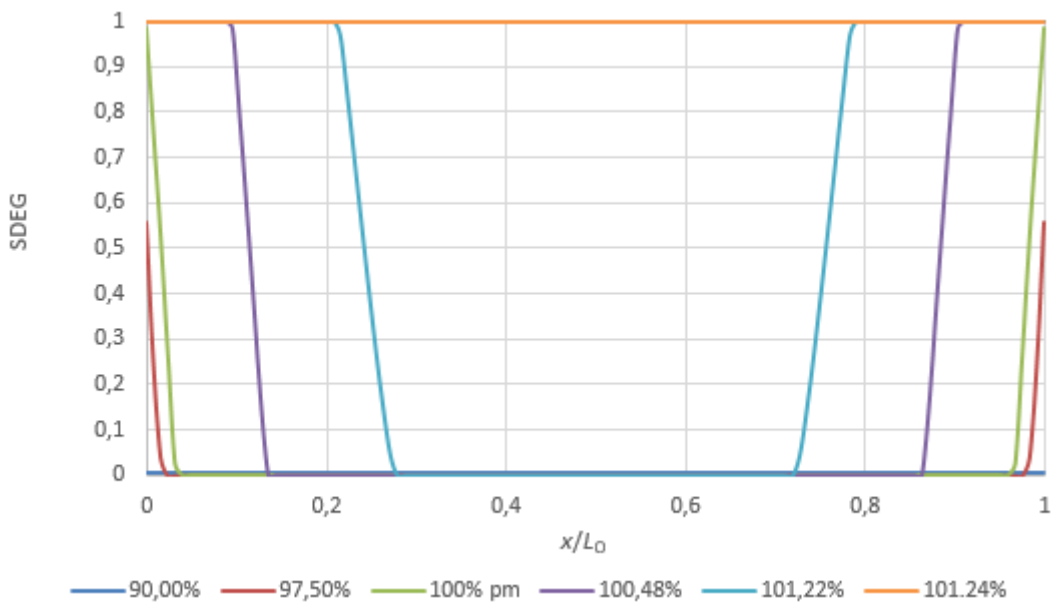


Figura 101 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Araldite® AV138, para $L_0=12,5$ mm

Para as JSS e o adesivo Araldite® AV138 (Figura 101 e Figura 102), 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 103 e

Figura 104) foi a variação mais gradual de SDEG através da zona adesiva. Este fenómeno acontece, devido a este adesivo ter uma ductilidade significativa. Para $\delta/\delta_{p_{máx}}=100\%$, por exemplo, apenas uma fracção 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 $\delta/\delta_{p_{máx}}\approx 162,63\%$, enquanto para $L_0=50$ mm corresponde a um $\delta/\delta_{p_{máx}}\approx 102,71\%$, o que corresponde a um processo de rotura muito mais gradual do que para o Araldite® AV138.

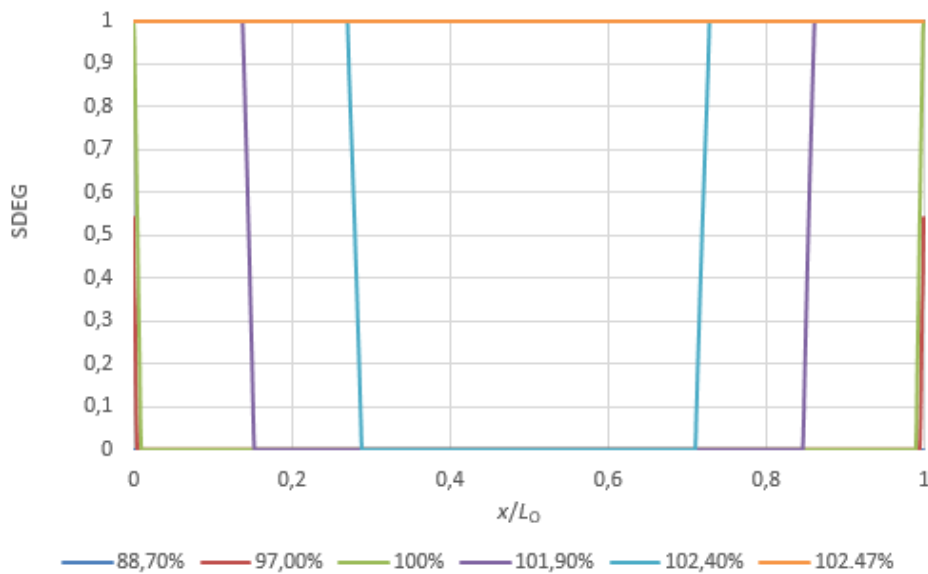


Figura 102 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Araldite® AV138, para $L_0=50$ mm

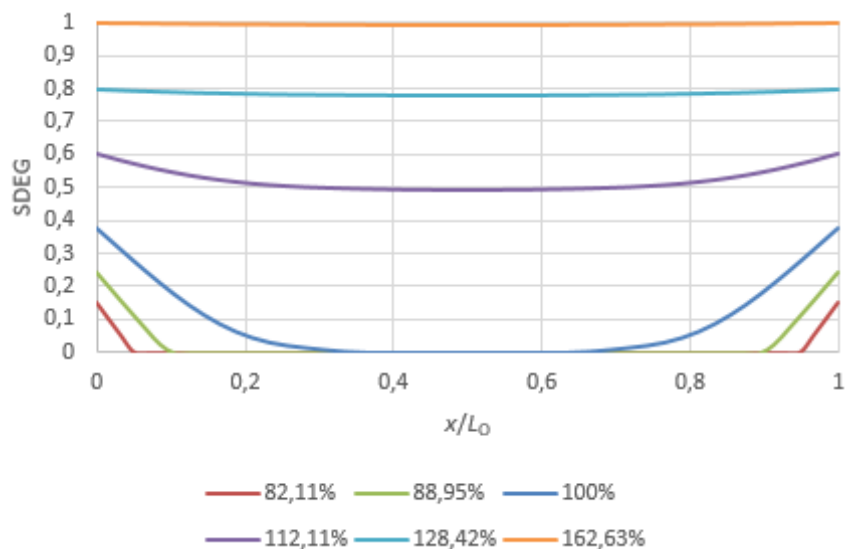


Figura 103 -- Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Sikaforce® 7752, para $L_0=12,5$ mm

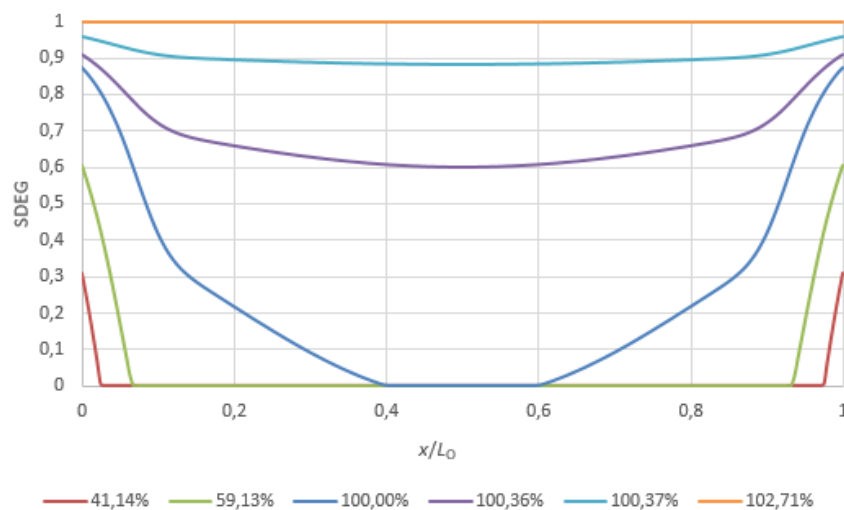


Figura 104 - Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Sikaforce® 7752 para $L_0=50$ mm

3.2.4.2 Junta de sobreposição dupla

Para as JSD (Figura 105) e para todos os adesivos [109], 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 (como a JSS) devido às distribuições também assimétricas das tensões σ_y e τ_{xy} ao longo da sobreposição (comparar a Figura 80 a Figura 85 para as JSD, com a Figura 74 a Figura 79 para as JSS). 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 $L_0=12,5$ mm 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 atingido para $L_0=12,5$ mm 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 estricção do substrato, sem que se observe mais dano.

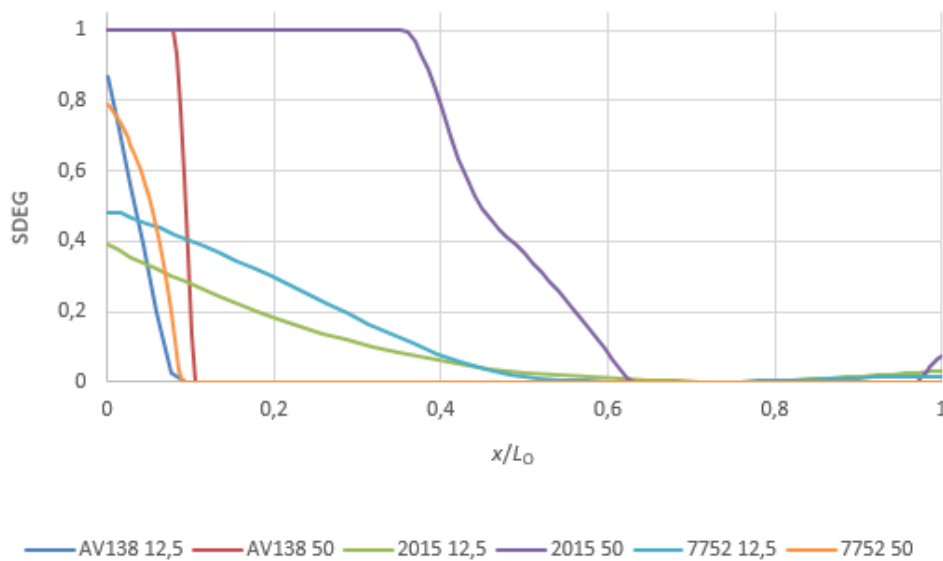


Figura 105 - Variável de dano na camada de adesivo no instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$, para as JSD

Apresenta-se na Figura 106 e Figura 107 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, respectivamente. As Figura 108 e Figura 109 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 [110], 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 na distribuição das tensões das JSD, relativamente às JSS. Esta diferença, é, provavelmente, responsável por os valores de $P_{m\acute{a}x}$ serem, mais do que duas vezes superiores, 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 [110], 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 estrição 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 $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}=100\%$ (31,1%), é o resultado da plastificação do substrato

interior, que reduz o valor efectivo 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 $2\times$, entre estas duas configurações de junta.

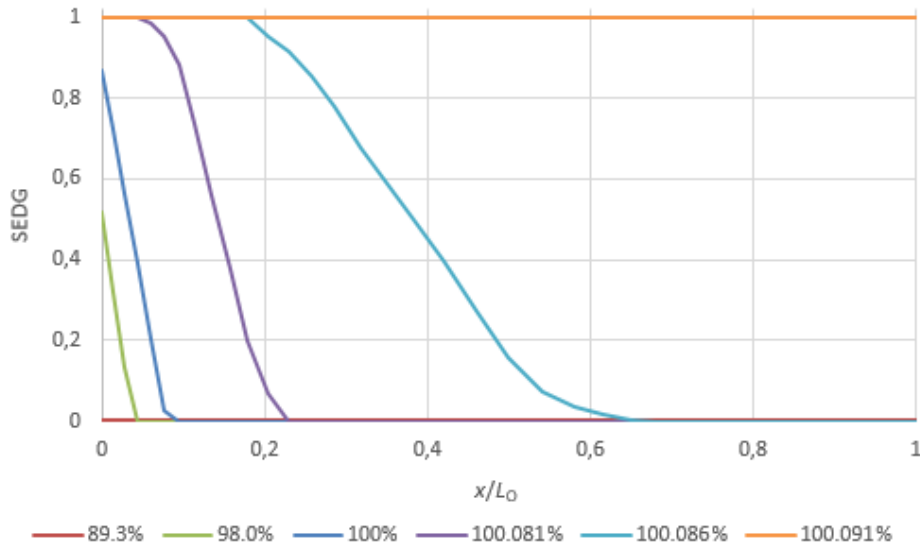


Figura 106 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ , para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm

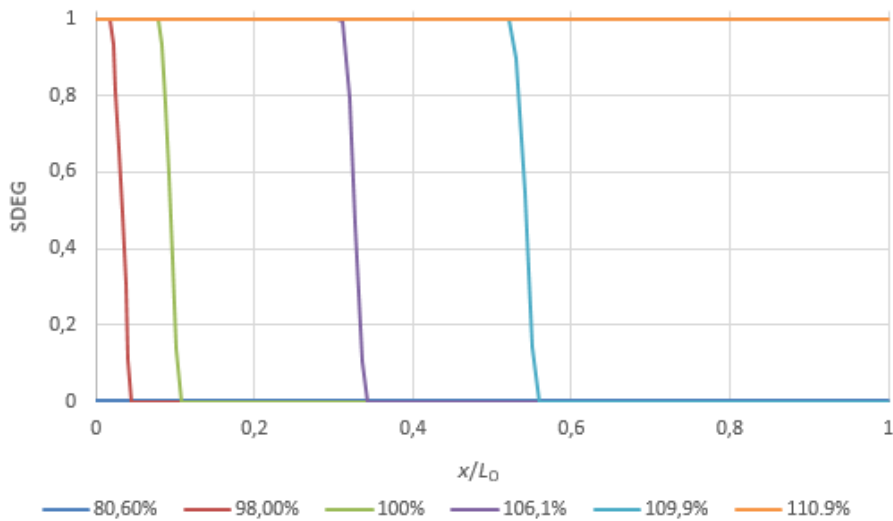


Figura 107 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ , para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm

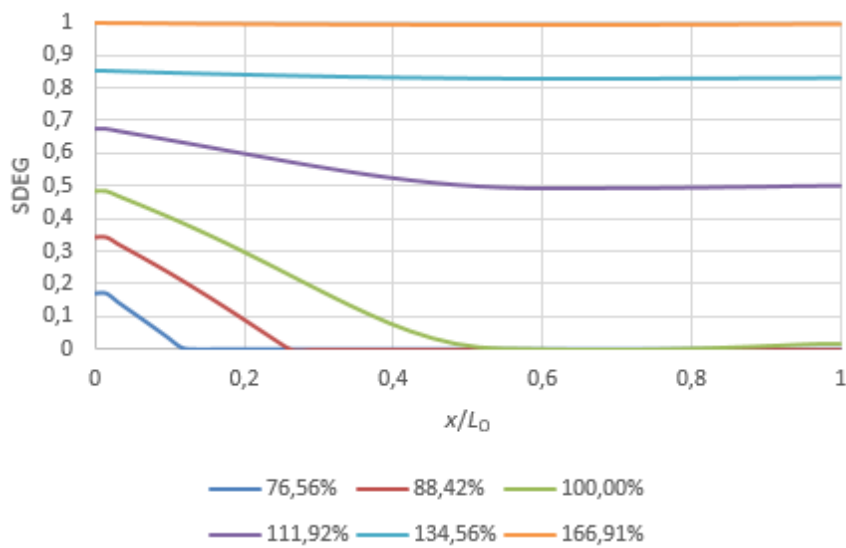


Figura 108 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ , para as JSD com Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm

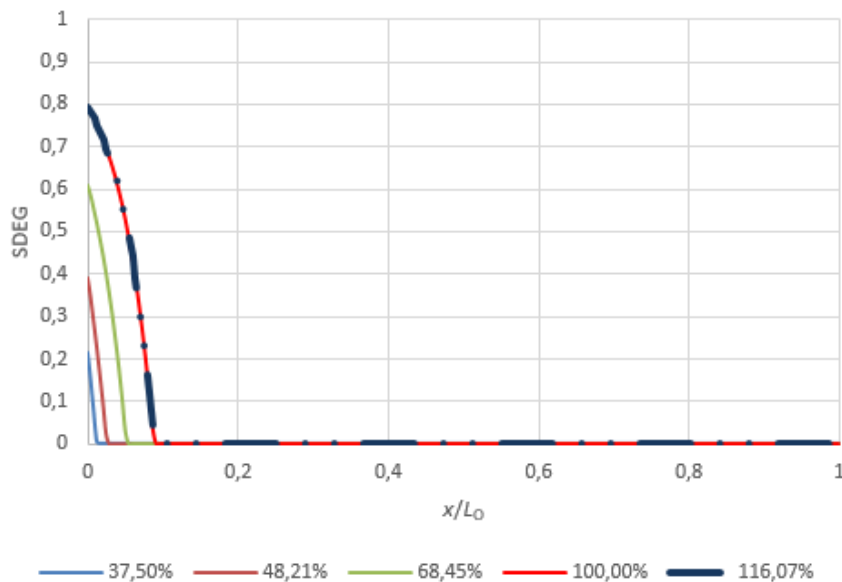


Figura 109 - Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ , para as JSD com Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm

3.2.4.3 Junta em degrau

A degradação da rigidez da lei do MDC (variável SDEG) fornece, para um dado incremento, a redução da rigidez da lei de modo misto do MDC, comparado com a rigidez inicial (Figura 73). Durante o regime elástico, a variável SDEG toma o valor zero e alcança a unidade, quando se atinge a rotura na lei do MDC. As Figura 110, Figura 111 e Figura 112 demonstram a distribuição do dano ao longo da zona de ligação em função de L_0 , quando é atingido $P_{m\acute{a}x}$, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respectivamente [72]. No caso do Araldite® AV138, é possível observar que este tem uma transição abrupta entre os estados de não-danificado e danificado.

Por exemplo, o adesivo efectua a transição da zona elástica para completamente danificado numa distância muito pequena, consequência da falta de capacidade de plastificação do adesivo. Ao aumentar a ductilidade do adesivo, a evolução do dano torna-se gradualmente mais suave, uma vez que, neste caso, a camada adesiva é submetida a deformações plásticas significativas antes de sofrer rotura total, sendo isto particularmente evidente para as curvas relacionadas com o Sikaforce® 7752 (Figura 112). Também devido a esta diferença, o dano em $P_{máx}$ para o Araldite® AV138 está limitado aos dois degraus exteriores, enquanto para os outros dois adesivos, todos os degraus estão sujeitos a dano, se bem que com maior preponderância para os degraus exteriores.

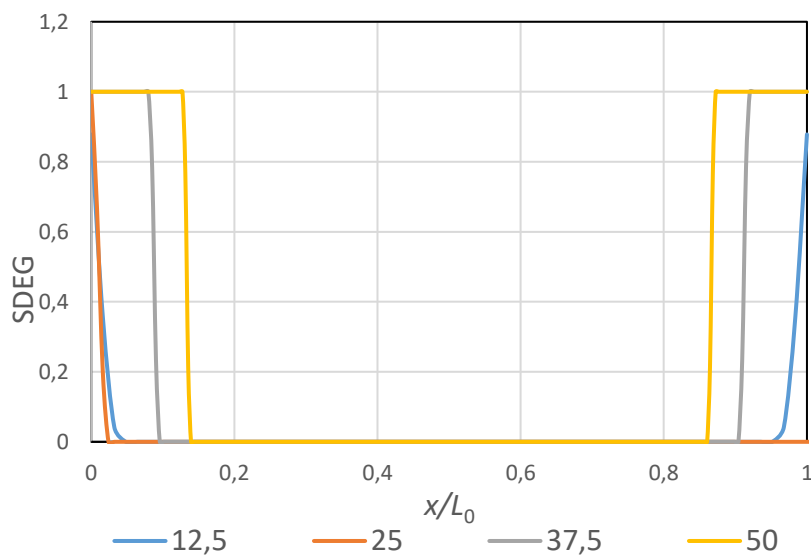


Figura 110 – SDEG nos elementos coesivos da camada adesiva quando $P_{máx}$ é atingido em função de L_0 : Araldite® AV138

A propagação mais generalizada do dano para os adesivos dúcteis deve provocar uma melhoria no comportamento, no que se refere a $P_{máx}$, uma vez que uma vasta porção do comprimento de ligação contribui para a resistência da junta [92]. Este cenário de carregamento é referido como rotura, em condições de cedência generalizada. Para todos os adesivos, o dano inicia-se e é mais elevado nos limites da zona de ligação, o que está de acordo com os picos de tensão σ_y e τ_{xy} , como se pode verificar nas Figura 88 e Figura 89. O aumento de L_0 promove maior extensão do dano para o interior do comprimento de ligação, por causa do aumento simultâneo do arrancamento e da deformação longitudinal diferencial dos aderentes, anteriormente verificada nas Figura 88 e Figura 89, como sendo responsável por um aumento nos picos de tensão com o aumento de L_0 . Isto está relacionado com a degradação do estado de tensão em $P_{máx}$, o que se deve reflectir num rácio $P_{máx}/L_0$ gradualmente mais reduzido, à medida que L_0

umenta. Não obstante, esta redução no desempenho das juntas com o aumento de L_0 é muito menos vincada do que em juntas de sobreposição simples, por exemplo [111], devido à configuração das juntas em degrau conseguir uma distribuição mais uniforme dos esforços ao longo de L_0 , por causa do efeito de redução de t_p , o que por sua vez aumenta $P_{m\acute{a}x}$ para o mesmo valor de L_0 .

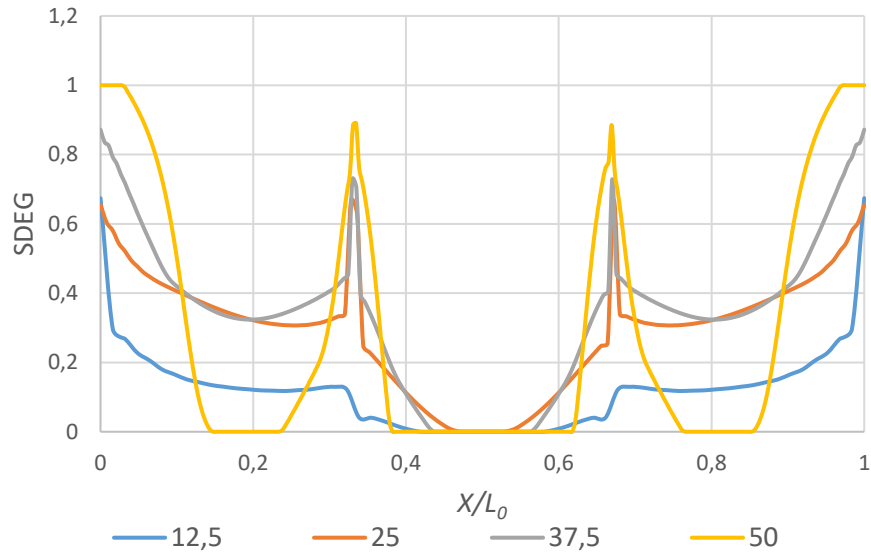


Figura 111 - SDEG nos elementos coesivos da camada adesiva quando $P_{m\acute{a}x}$ é atingido em função de L_0 : Araldite® 2015

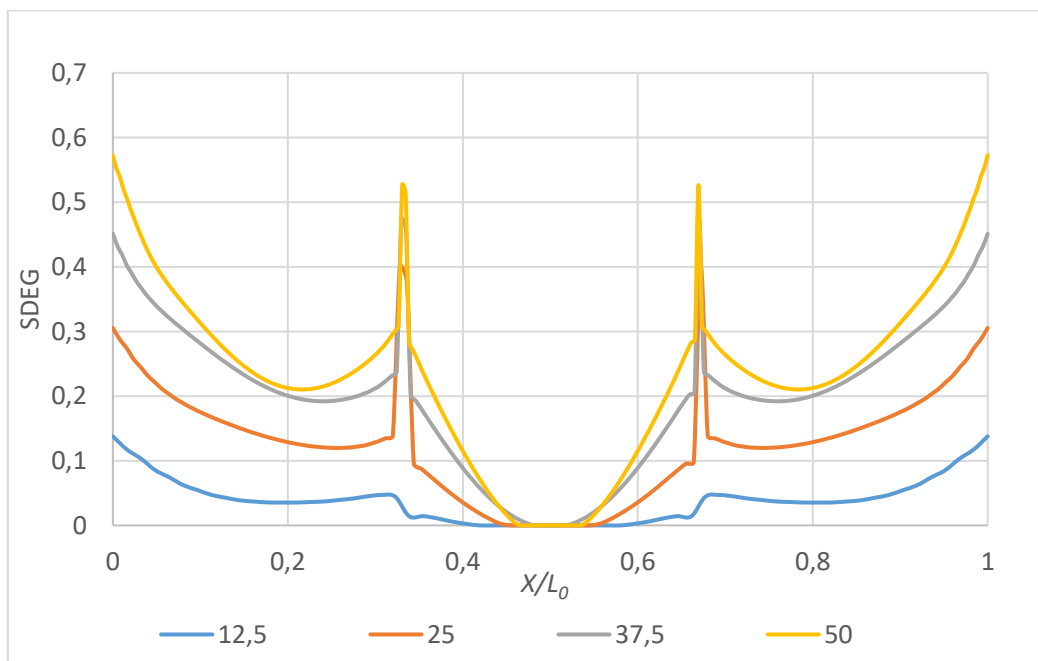


Figura 112 – SDEG nos elementos coesivos da camada adesiva quando $P_{m\acute{a}x}$ é atingido em função de L_0 : Sikaforce® 7752

A evolução da variável SDEG com a carga aplicada desde o início do dano até à rotura completa, é mostrada nas Figura 113 e Figura 114 para o adesivo frágil (Araldite AV138), e nas Figura 115 e Figura 116 para o adesivo mais dúctil (Sikaforce 7752). Nesta análise são só mostrados os valores limite de L_0 (12,5 mm e 50 mm), uma vez que as juntas com L_0 entre esses valores, apresentam um comportamento intermédio entre as juntas debatidas. Nestas figuras, são apresentadas as curvas SDEG para diferentes rácios de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \times 100$ [%], nas quais $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ é o deslocamento em $P_{m\acute{a}x}$ (como resultado, um rácio de 100% corresponde a $P_{m\acute{a}x}$). Para o Araldite AV138, a diferença de δ entre a ausência de dano (SDEG=0) e rotura (SDEG=1) é bastante reduzida, devido à fragilidade deste adesivo. Verificou-se que $P_{m\acute{a}x}$, independentemente do valor de L_0 , está associado apenas a pequenas plastificações nas extremidades da região ligada da junta, o que indica que o crescimento de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 não deve ser muito significativo. Um comportamento semelhante, sob condições idênticas, foi verificado em juntas de sobreposição simples [111]. Devido às características do adesivo, o valor de δ necessário para a iniciação do dano até à rotura é extremamente reduzido, factor indicativo de uma rotura abrupta (a separação dos aderentes foi alcançada para $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}=100,20\%$ ($L_0=12,5$ mm) e 101% ($L_0=50$ mm)). O aumento da ductilidade do adesivo muda completamente o processo de rotura, uma vez que a variação de SDEG ao longo da região ligada é muito mais suave, para todos os estágios de carregamento. Além disso, em $P_{m\acute{a}x}$ (i.e., $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}=100\%$), apenas uma pequena secção de adesivo continua no regime elástico de carga ($\approx 19,3\%$ para $L_0=12,5$ mm e 7,6% para $L_0=50$ mm). A restante parte da sobreposição está sujeita a dano. A evolução do dano nas juntas é muito mais gradual, quando são usados adesivos dúcteis. No caso do Sikaforce® 7752, é obtido dano completo para $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \approx 700\%$ ($L_0=12,5$ mm) e 250% ($L_0=50$ mm). Este comportamento está geralmente associado a um uso muito mais eficiente da resistência do adesivo, i.e., grande melhoria de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 [111].

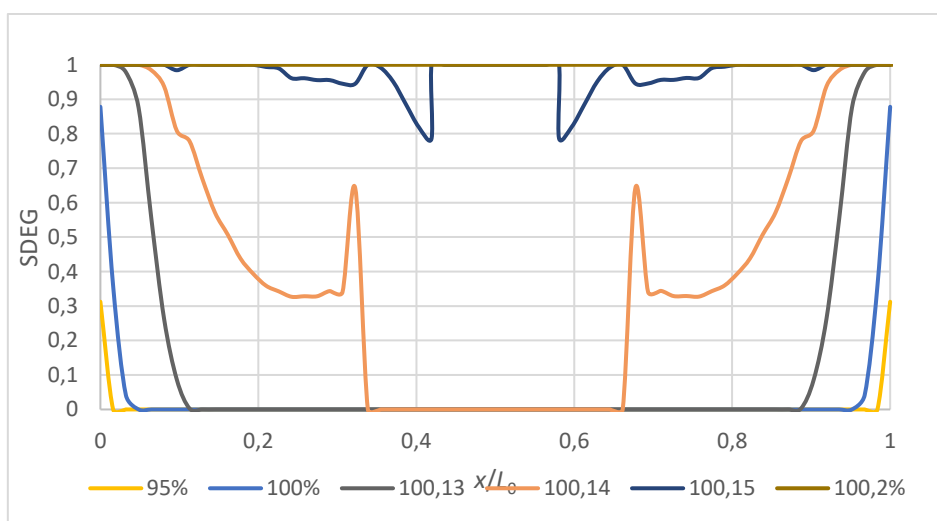


Figura 113 – Evolução do SDEG nos elementos coesivos da camada adesiva com a aplicação de δ , para o Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm

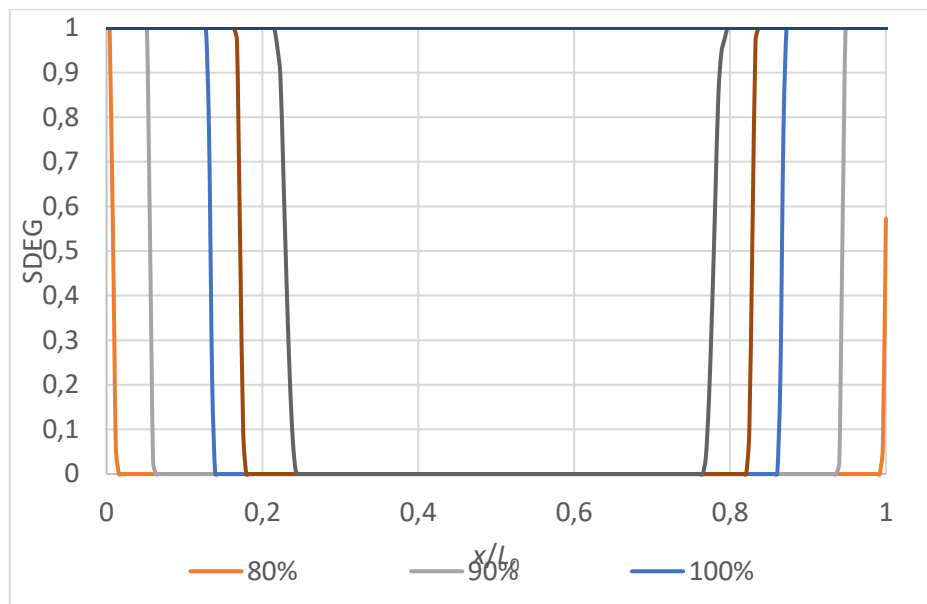


Figura 114 — Evolução do SDEG nos elementos coesivos da camada adesiva com a aplicação de δ , para o Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm

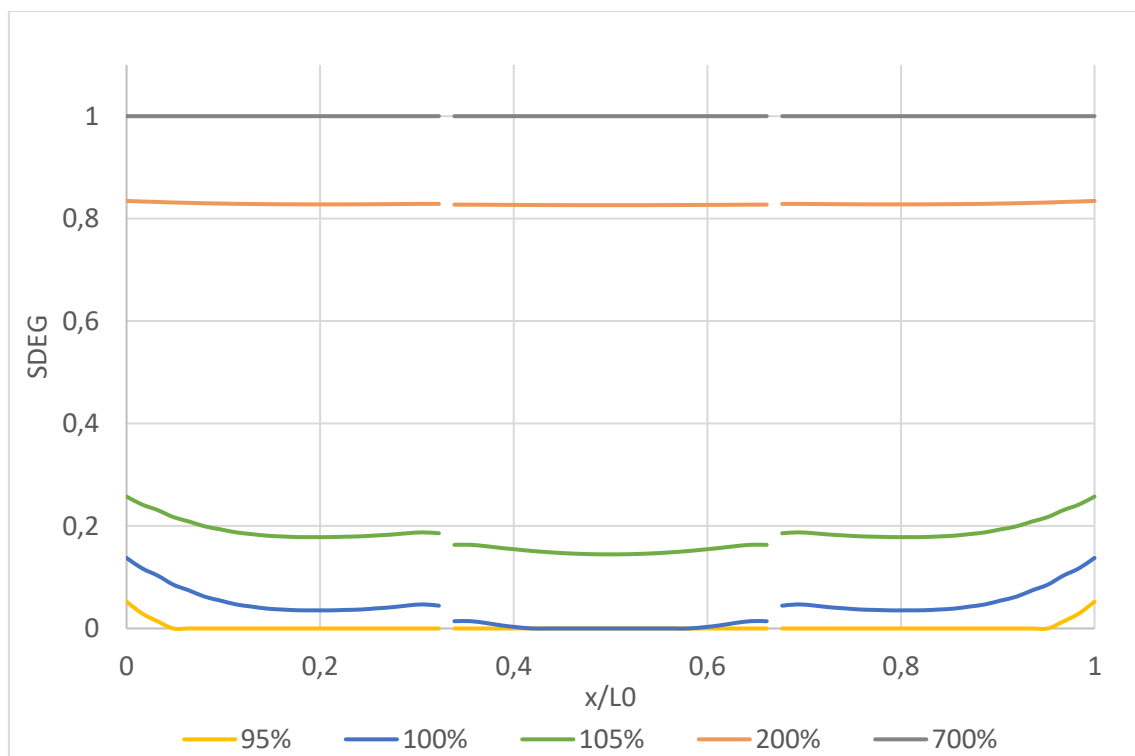


Figura 115 – Evolução do SDEG nos elementos coesivos da camada adesiva com a aplicação de δ , para o Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm

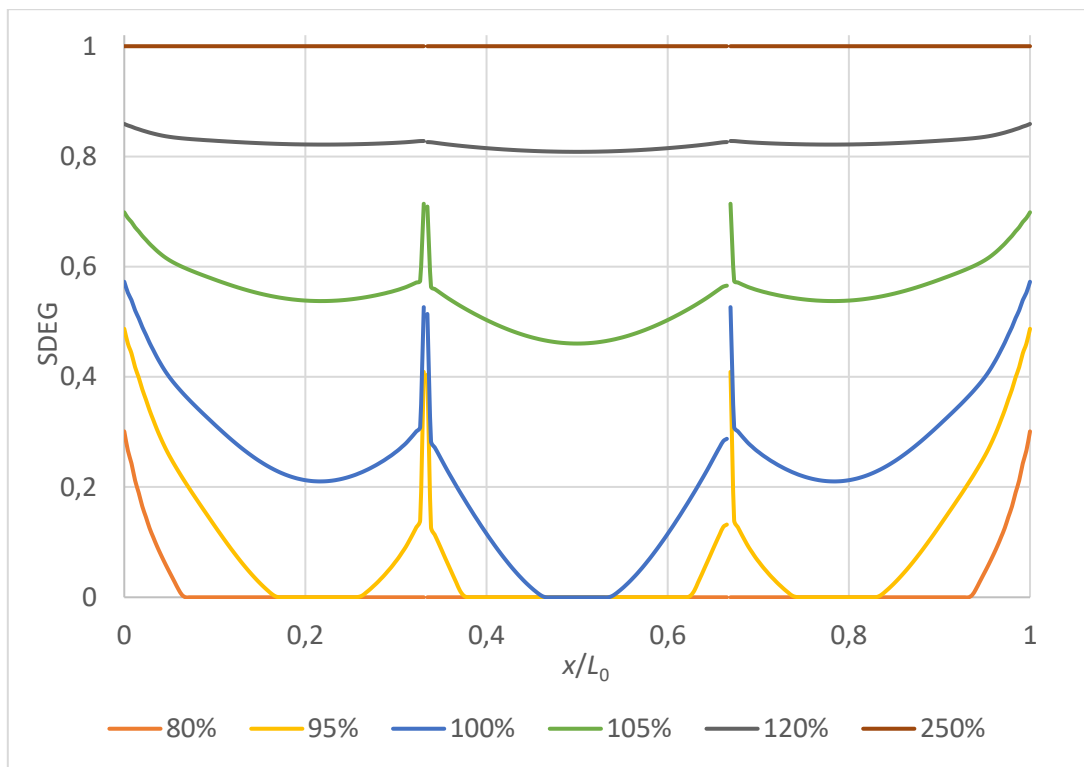


Figura 116 - Evolução do SDEG nos elementos coesivos da camada adesiva com a aplicação de δ para o Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm

3.2.4.4 Junta de chanfro interior

As Figura 117, Figura 118 e Figura 119, mostram a extensão do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), em juntas com diferentes α , para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respectivamente. O tratamento dos gráficos obtidos foi efectuado por [102]. Da análise das Figura 117, Figura 118 e Figura 119, pode-se dizer que a maior incidência de dano neste tipo de junta se dá nas extremidades, de forma coerente com a distribuição de tensões que foi apresentada no capítulo anterior. Na zona intermédia da ligação, o dano é tipicamente nulo, no instante em $P_{m\acute{a}x}$ é atingida. Analisando entre os vários α , observa-se que, com o seu aumento, se obtém menor magnitude localizada nas extremidades, e uma maior uniformidade no dano ao longo da camada adesiva, também no seguimento da variação da distribuição de tensões em função de α , na medida em que as tensões também se tornam mais uniformes para valores de α superiores. Entre adesivos, verifica-se que, com o aumento da sua rigidez, a magnitude do dano nos vários α aumenta e se concentra em zonas mais reduzidas nas extremidades da ligação, apresentando mais oscilações. Por outro lado, o aumento da ductilidade do adesivo, permite uma distribuição do dano mais uniforme no instante de $P_{m\acute{a}x}$, o que conduz a uma melhor utilização da resistência do adesivo em toda a extensão da ligação.

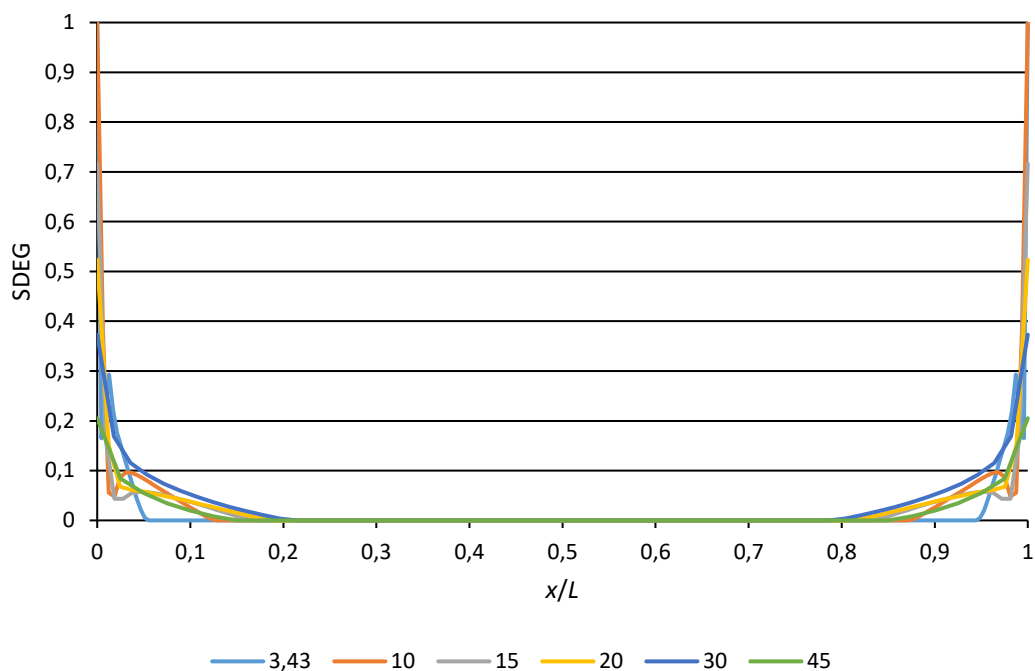


Figura 117 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 em juntas com diferentes α

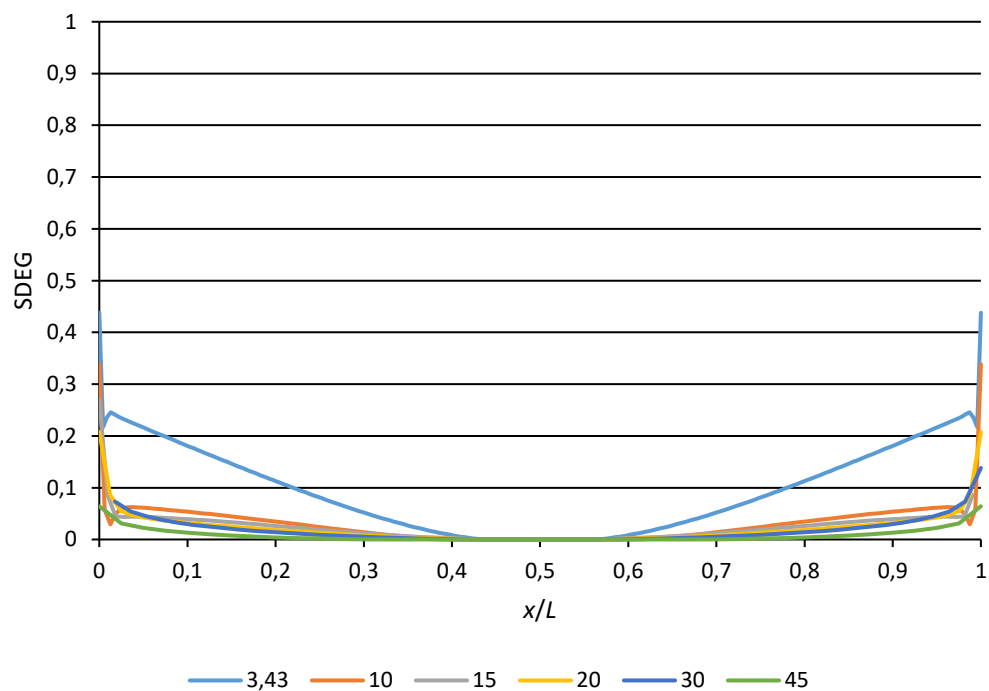


Figura 118 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para o adesivo Araldite® 2015 em juntas com diferentes α

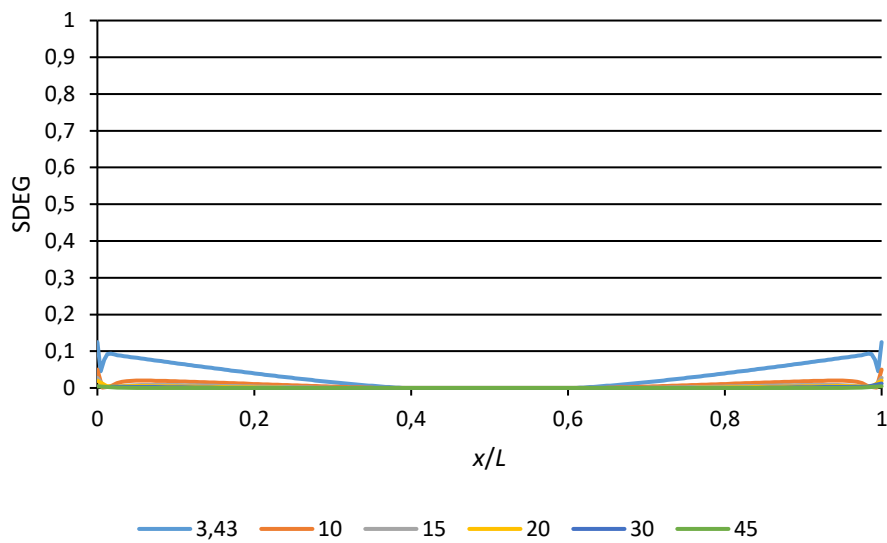


Figura 119 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para o adesivo Sikaforce® em juntas com diferentes α

De seguida, são representados os gráficos que relacionam a evolução do dano (SDEG) em vários pontos de carga, em função do comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para as condições extremas de rigidez, em termos de adesivos e ângulo de chanfro interior utilizados. 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 $P_{m\acute{a}x}$). As Figura 120 e Figura 121 apresentam a evolução do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 com $\alpha = 3,43^\circ$ e 45° , respectivamente.

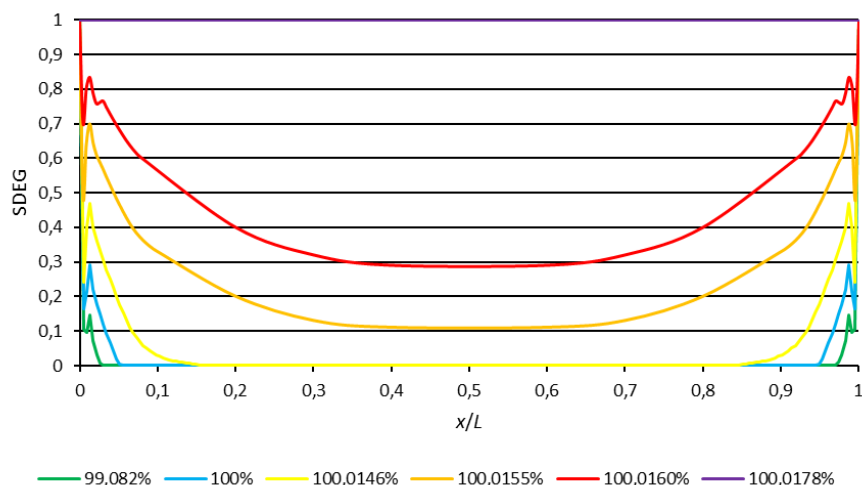


Figura 120 - Evolução do dano (SDEG) com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 com α de $3,43^\circ$

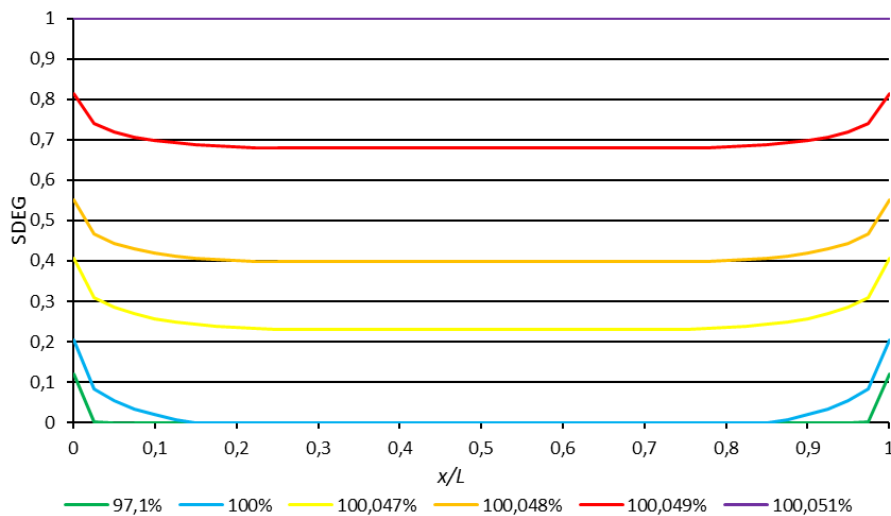


Figura 121 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para o adesivo Araldite® AV138 com α de 45°

As Figura 120 e Figura 121, reforçam o anteriormente concluído, no que diz respeito aos elevados gradientes de dano na extremidade da junta. Por outro lado, observa-se que o dano tem um processo de evolução extremamente rápido até à rotura final, em virtude do adesivo Araldite® AV138 ser frágil. De facto, para $\alpha=3,43^\circ$, a rotura completa ocorre para $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}\approx 100,02\%$, enquanto para $\alpha=45^\circ$, este valor sobe marginalmente para $\approx 100,05\%$. No seguimento da discussão apresentada anteriormente, relativa à distribuição de tensões, as curvas de dano para $\alpha=45^\circ$ são bastante mais uniformes durante todo o processo de dano, comparativamente às registadas para $\alpha=3,43^\circ$.

As Figura 122 e Figura 123, apresentam um estudo idêntico, embora neste caso para o adesivo Sikaforce® 7752, para o qual se pode afirmar que o dano tem um comportamento muito mais uniforme ao longo de todo o processo de dano, o que resulta da combinação de dois factores: a menor rigidez do adesivo, que por si só já proporciona distribuições de dano mais uniformes ao longo da camada de adesivo, e a ductilidade do adesivo, que resulta numa grande extensão da zona plástica, no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingido. Devido a estes factores, também $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}$ apresenta valores bastante elevados, o que significa que a rotura da junta não ocorre de forma abrupta, como no adesivo Araldite® AV138, mas ao invés disto, ocorre para um deslocamento bastante superior ao correspondente a $P_{\text{máx}}$. Mais especificamente, para $\alpha=3,43^\circ$ registou-se $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=174\%$ e para $\alpha=45^\circ$ obteve-se $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=403\%$. A comparação entre $\alpha=3,43^\circ$ e 45° , tal como no caso do adesivo Araldite® AV138, mostra que valores de α mais elevados, tendem a promover curvas de dano mais uniformes ao longo de todo o processo de rotura.

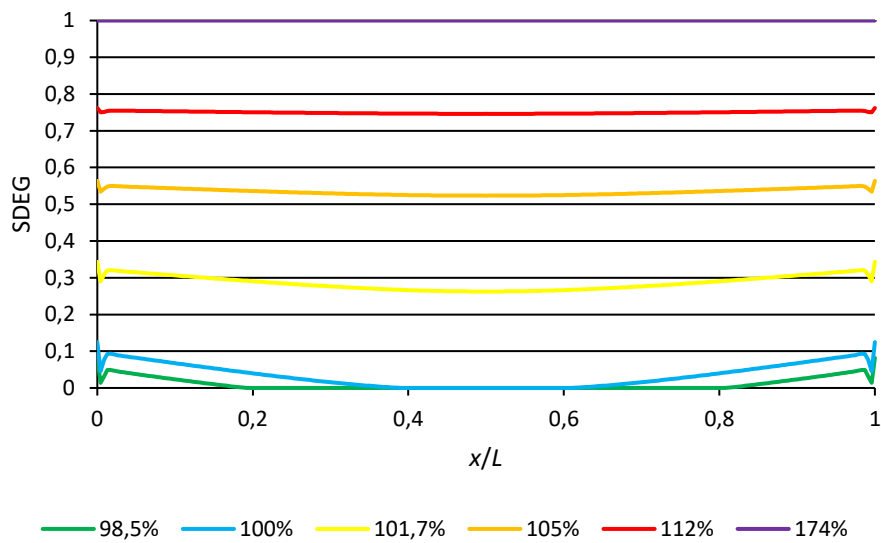


Figura 122 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para o adesivo Sikaforce® com α de 3,43°

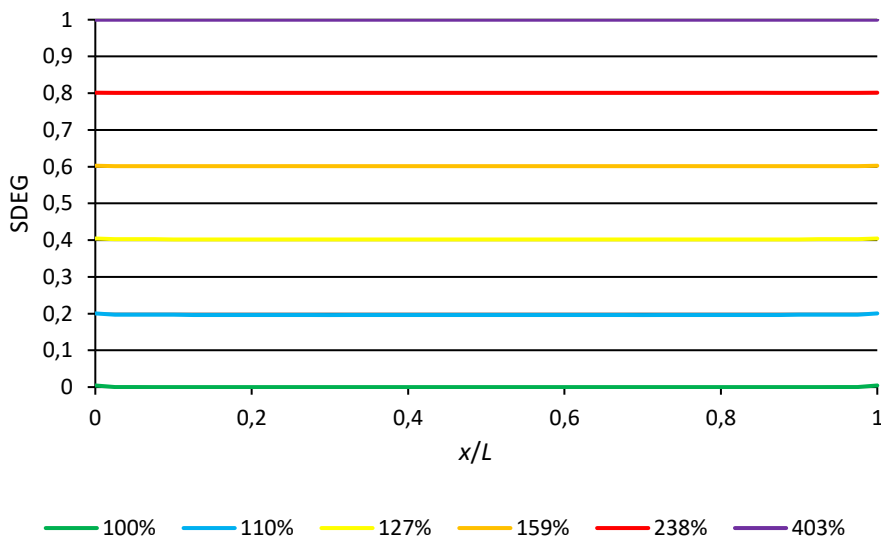


Figura 123 - Evolução do dano (SDEG) percentual com o comprimento normalizado da camada de adesivo (x/L), para o adesivo Sikaforce® com α de 45°

3.2.5 Previsão da resistência

Nos subcapítulos seguintes, serão apresentados os resultados numéricos obtidos através do ABAQUS®, para as várias configurações de junta e para os diversos adesivos analisados. Estes resultados serão também comentados e comparados com os resultados obtidos experimentalmente.

3.2.5.1 Junta de sobreposição Simples

Na Figura 124 é apresentada uma comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos, e os valores experimentais das JSS.

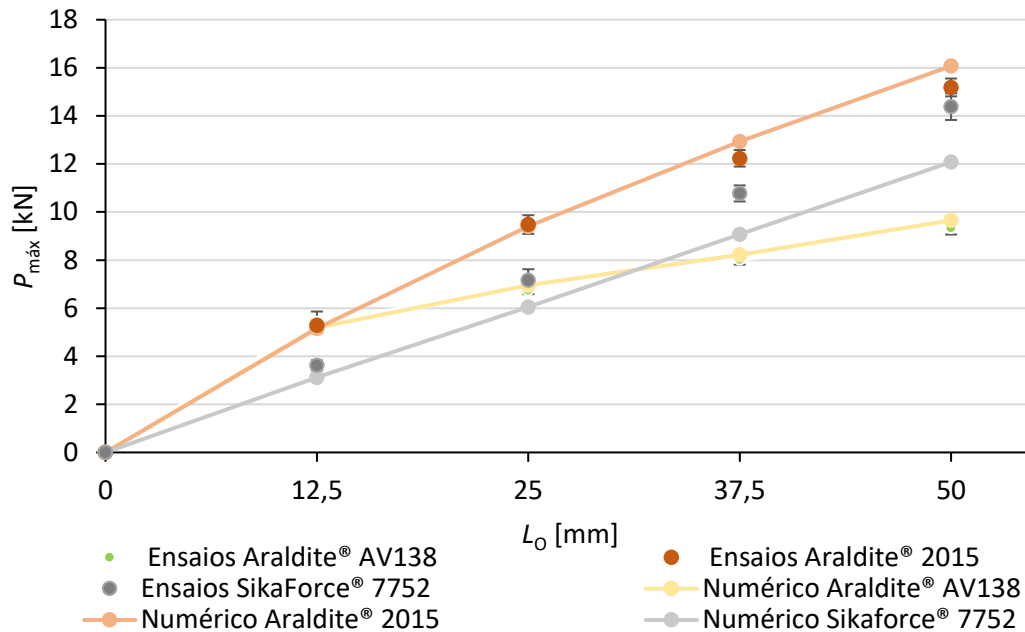


Figura 124 - Comparação de valores $P_{m\acute{a}x}$ numéricos com valores experimentais da JSS

Analisando a figura, é possível constatar que para o adesivo Araldite® AV138, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos coincidem com os valores $P_{m\acute{a}x}$ experimentais, estando contidos no desvio padrão calculado. Relativamente ao Araldite® 2015, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos são coincidentes com os experimentais, mas isto só acontece até $L_0=25$ mm (inclusive). Para $L_0=37,5$ mm, existe um pequeno desfasamento, estando o valor de $P_{m\acute{a}x}$ numérico no limiar do desvio padrão superior do resultado experimental. Para $L_0=50$ mm, verifica-se o mesmo comportamento, mas mais acentuado, uma vez que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ numérico está fora do valor superior do desvio padrão do resultado experimental. No que diz respeito ao Sikaforce® 7752, o desfasamento entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e experimentais começa em $L_0=12,5$ mm, sendo os valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais superiores aos numéricos. Esta discrepância entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e experimentais para os adesivos Araldite® 2015 e, particularmente, Sikaforce® 7752 (adesivo mais dúctil), reside no facto de nas simulações se usar uma lei triangular, e que, devido à ductilidade dos adesivos, seria mais adequado usar uma lei trapezoidal [67]. Já no caso do Araldite® AV138 (adesivo frágil), a lei triangular é bastante adequada, tendo em conta o facto de praticamente não existir desfasamento entre os valores numéricos e experimentais. A nível quantitativo, tal como aconteceu nos valores experimentais, o Araldite® 2015 é o adesivo que obtém melhor performance em todos os L_0 . No caso dos valores numéricos, existe uma maior discrepância entre os valores $P_{m\acute{a}x}$ do Araldite® 2015 e do Sikaforce® 7752, do que aquela existente nos resultados experimentais.

3.2.5.2 Junta de sobreposição dupla

Na Figura 125, é apresentada uma comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e os valores experimentais das JSD. Para o Araldite® AV138, é possível verificar a repetição do mesmo comportamento já observado nas JSS, ou seja, os valores $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e experimentais, coincidem quase na perfeição. Isto, tal como já foi referido no subcapítulo anterior, deve-se à fragilidade do adesivo e à utilização de uma lei triangular na simulação das juntas. No caso do Araldite® 2015, já se nota uma diferença de comportamento relativamente à JSS, uma vez que neste caso os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e experimentais são bastante similares ao longo de L_0 . No Sikaforce® 7752, continuar a existir uma diferença um pouco acentuada entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e experimentais, se bem que desta vez essa diferença passe por todos os L_0 , excepto para $L_0=50$ mm, onde os valores numéricos e experimentais são equivalentes.

Tal como aconteceu nos resultados de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais, nos numéricos os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 possuem valores de $P_{m\acute{a}x}$ muito semelhantes, para $L_0=50$ mm, havendo uma diferença acentuada para $L_0=25$ mm.

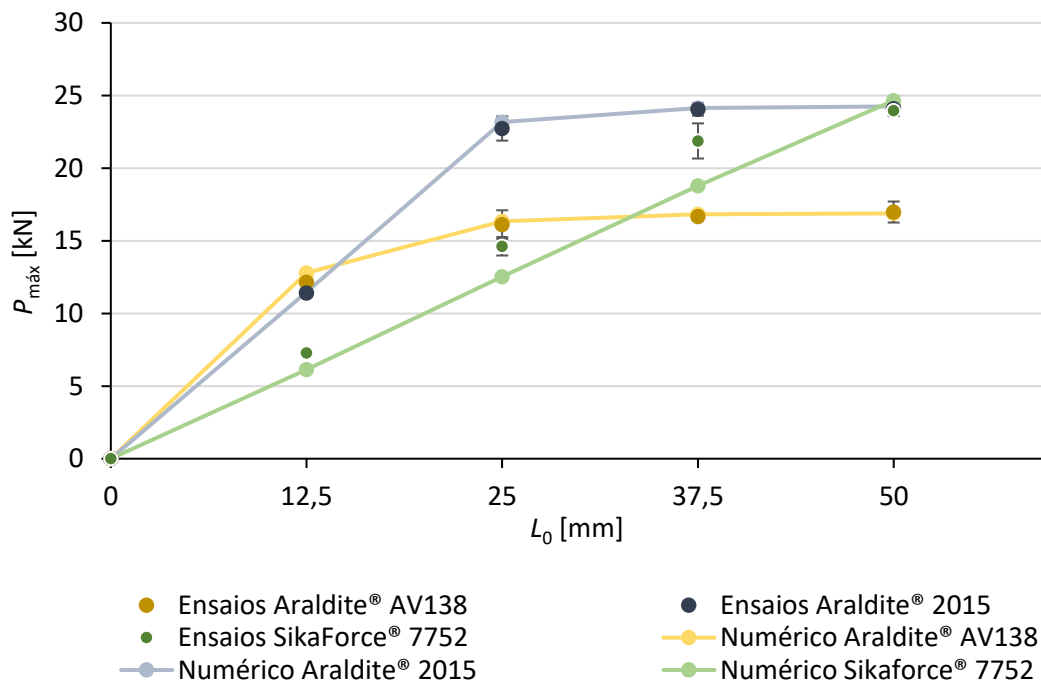


Figura 125 – Comparação de valores numéricos com valores experimentais da JSD

3.2.5.3 Junta em degraus

Na Figura 126, é apresentada uma comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e os valores experimentais das juntas em degrau. Analisando o gráfico presente na Figura 126, é possível verificar que, para o Araldite® AV138, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos

coincidem com os valores $P_{m\acute{a}x}$ experimentais para todos os L_0 , comportamento que se tem vindo a verificar nas outras configurações já analisadas. No caso do Araldite® 2015, existem algumas ligeiras discrepâncias: para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ numérico é ligeiramente superior ao experimental, estando mesmo assim dentro do desvio padrão calculado. Para o Sikaforce® 7752 verifica-se a mesma tendência na discrepância entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e experimentais, sendo os valores experimentais superiores aos numéricos. Para esta configuração de junta, essa discrepância vai-se acentuando, à medida que se aumenta L_0 .

O adesivo com melhor *performance* nos resultados numéricos foi o Araldite® 2015, seguindo a mesma tendência dos resultados experimentais, se bem que para $L_0=12,5$ mm, o Araldite® AV138 é ligeiramente superior.

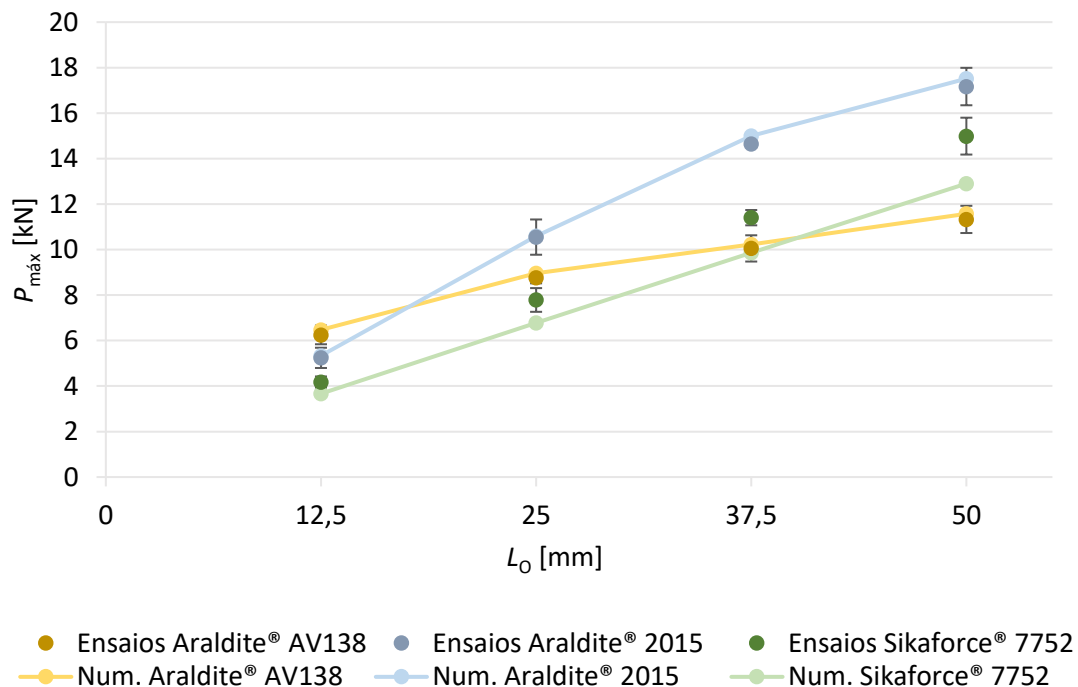


Figura 126 - Comparação de valores numéricos com valores experimentais da junta em degrau

3.2.5.4 Junta com chanfro interior

Na Figura 127, é apresentada uma comparação entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e os valores experimentais, para as juntas de chanfro interior. Da mesma forma que se verificou nos resultados experimentais, nesta configuração de junta, o Araldite® AV138 é, sem margem de dúvida, o adesivo com a melhor performance para todos os α . Os valores $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e experimentais, são quase perfeitamente compatíveis, existindo desvios quase imperceptíveis. Para o Araldite® 2015, existe uma pequena discrepância entre os valores $P_{m\acute{a}x}$ numérico e experimental para $\alpha=3^\circ$ mas, no entanto, o valor

numérico está dentro do intervalo do desvio padrão. Para os restantes α , os valores numéricos são coincidentes com os experimentais. No que diz respeito ao Sikaforce® 7752, este foi o adesivo com o pior desempenho para todos os α . O valor de $P_{\text{máx}}$ numérico para $\alpha=3,43^\circ$ é inferior ao experimental, estando fora do desvio padrão deste. Para os restantes α , os valores de $P_{\text{máx}}$ numéricos e experimentais são coincidentes.

Tal como já se tinha verificado anteriormente, esta configuração de junta é a que melhor consegue tirar partido da resistência do Araldite® AV138.

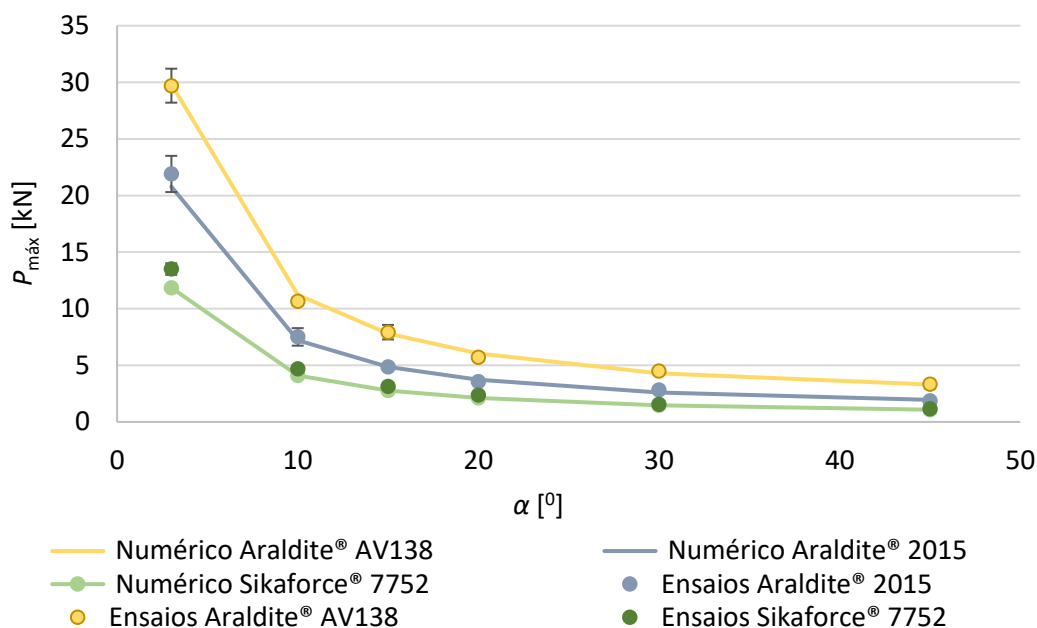


Figura 127 - Comparação de valores numéricos com valores experimentais da junta de chanfro interior

3.3 Análise dos resultados obtidos

Neste capítulo é efectuada uma análise comparativa dos adesivos testados em função das geometrias de junta escolhidas.

Araldite® AV138

Na Figura 128, está representada uma comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ para o adesivo Araldite® AV138, em função do tipo de junta. Analisando a Figura 128, é logo possível verificar que, na junta de chanfro interior, para $L_0=50$ mm ($\alpha=3,43^\circ$), o Araldite® AV138 obtém o melhor resultado. Isto porque, apesar da sua elevada rigidez, que provoca maiores picos de tensão, nas juntas de chanfro interior, as tensões são praticamente uniformes (Figura 92 à Figura 99), o que faz com que um adesivo resistente, mas frágil, apresente um bom comportamento, ao contrário do que acontece, por exemplo, com

as JSS. No entanto, para valores de L_0 menores, as JSD têm valores superiores às juntas de chanfro interior, degraus e JSS. Isto é causado pelo facto de as JSD terem no fundo duas camadas de adesivo em paralelo, o que duplica a área adesiva para o mesmo L_0 . Relativamente às JSS e juntas em degrau, estas são as que obtêm piores resultados, principalmente para valores de L_0 superiores. Isto ocorre pelo facto de a elevada rigidez do Araldite® AV138 não permitir plastificação, passando de imediato do regime elástico, para rotura da camada adesiva. Esta plastificação já se verifica no Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, que são adesivos dúcteis, o que lhes permite atingir maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$.

Concluindo, para $L_0 > 37,5$ mm, a melhor opção para este adesivo recai na junta de chanfro interior. Para valores de $L_0 \leq 37,5$ mm a geometria de junta mais adequada é a JSD. As geometrias JSS e de degraus poderão ser utilizadas, caso os esforços a que estarão sujeitas seja reduzido.

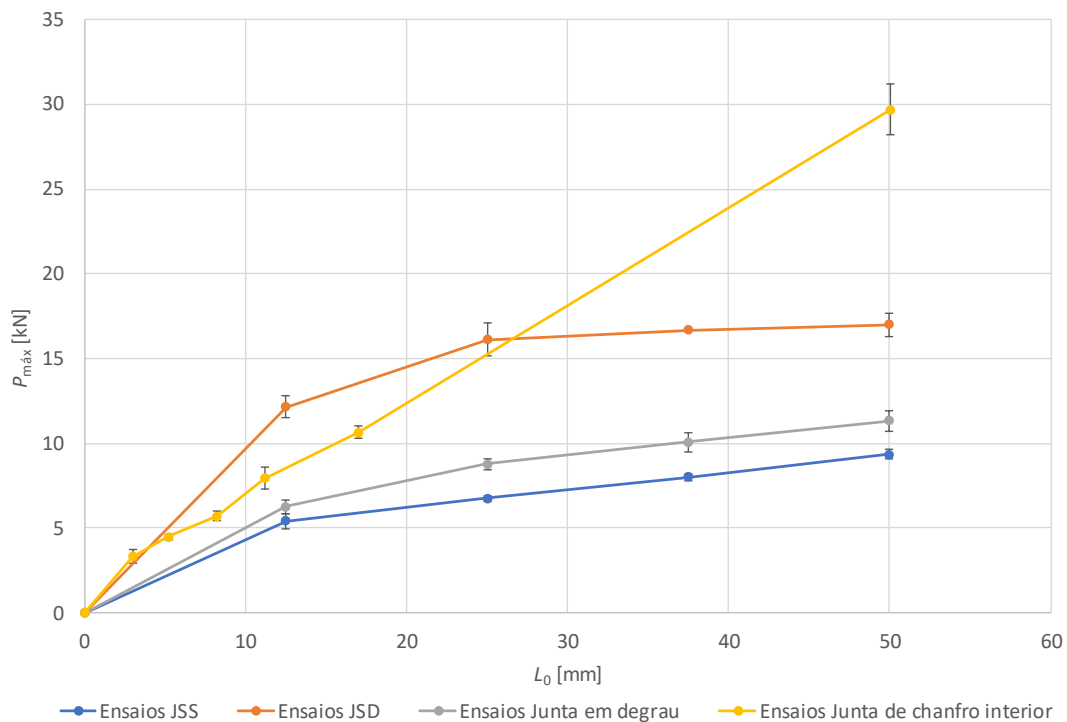


Figura 128 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (c/ desvio padrão) para o Araldite® AV138, em função do tipo de junta

Araldite® 2015

Na Figura 129, está representada uma comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo Araldite® 2015, em função do tipo de junta. Para este adesivo, a geometria de junta com melhor desempenho é a JSD, para todos os L_0 testados. No entanto, é possível verificar que, a partir de $L_0=25$ mm, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é pouco afectado pelo aumento de L_0 , uma

que vez que se começa a atingir o limite de plastificação do aderente. A junta de chanfro interior, para $L_0=50$ mm ($\alpha=3,43^\circ$), aproxima-se de um valor de $P_{m\acute{a}x}$ semelhante ao da JSD e, com uma pequena diminuição de α , se poderia atingir um $P_{m\acute{a}x}$ superior, mas ir-se-ia deparar com a mesma limitação da plastificação do aderente. A JSS e a junta em degrau obtiveram valores semelhantes até $L_0=25$ mm, sendo que a partir deste valor a junta em degrau fica claramente à frente, em termos de valor de $P_{m\acute{a}x}$. Esta diferença tem como base a ductilidade deste adesivo, que permite absorver os maiores picos de tensão da JSS, relativamente às juntas em degrau até $L_0=25$ mm, mas, a partir desse ponto, deixa de ter capacidade para aumentar o índice de plastificação, o que se reflecte em valores inferiores de $P_{m\acute{a}x}$.

Para o Araldite® 2015, a geometria que mais se adequa é a JSD, para todos os L_0 . Para aplicações em que não seja requerida uma elevada resistência, é sempre possível optar pela junta em degraus, ou até mesmo JSS. A junta de chanfro interior não oferece uma performance tão elevada, que justifique a sua utilização face à JSD, uma vez que a junta de chanfro interior, é das mais custosas de fabricar.

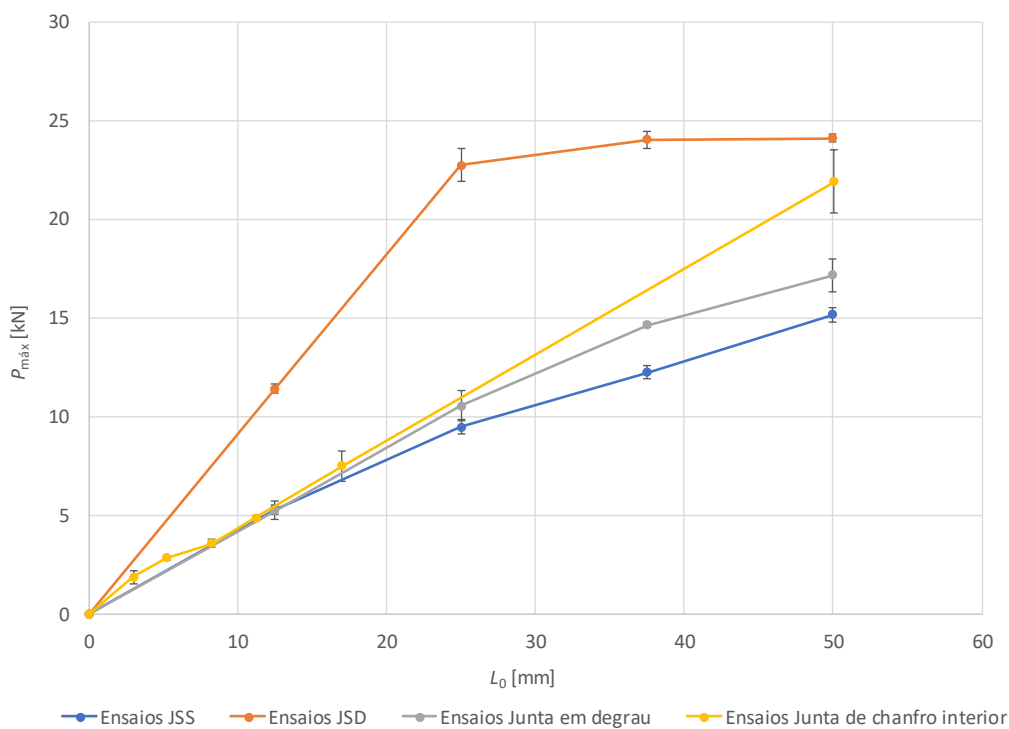


Figura 129 - Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (c/ desvio padrão) para o Araldite® 2015 em função do tipo de junta

Sikaforce® 7752

Na Figura 129, está representada uma comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo Sikaforce® 7752, em função do tipo de junta. Para este adesivo, a JSD é a que oferece

melhor desempenho, para todos os L_0 . Até $L_0=37,5$ mm, verifica-se um aumento acentuado de $P_{m\acute{a}x}$, mas para $L_0=50$ mm, já se verifica uma diminuição do aumento de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 . No entanto, seria possível aumentar L_0 um pouco mais, até se atingir o limite de plastificação do aderente, uma vez que este adesivo tem uma grande ductilidade, que por sua vez também contribui imenso para a redução de tensões nesta geometria. As outras geometrias de junta, obtiveram resultados muito semelhantes entre elas, mas ficam muito aquém dos valores da JSD, não passando dos 15 kN, face aos 25 kN obtidos pela JSD, para $L_0=50$ mm. De facto, este comportamento observa-se porque a ductilidade extremamente elevada do adesivo torna praticamente irrelevante a existência ou não de gradientes de tensão ao longo da camada adesiva.

Em termos de aplicação, a escolha claramente recai na JSD. No entanto, não sendo necessária elevada resistência, é possível optar pela JSS, uma vez que a geometria é mais facilmente produzida, e a diferença comparativamente à junta em degrau é praticamente desprezável. A junta de chanfro interior é, à partida, posta de parte como sendo uma alternativa viável, podendo, no entanto, ser utilizada em aplicações nas quais seja necessária uma superfície lisa.

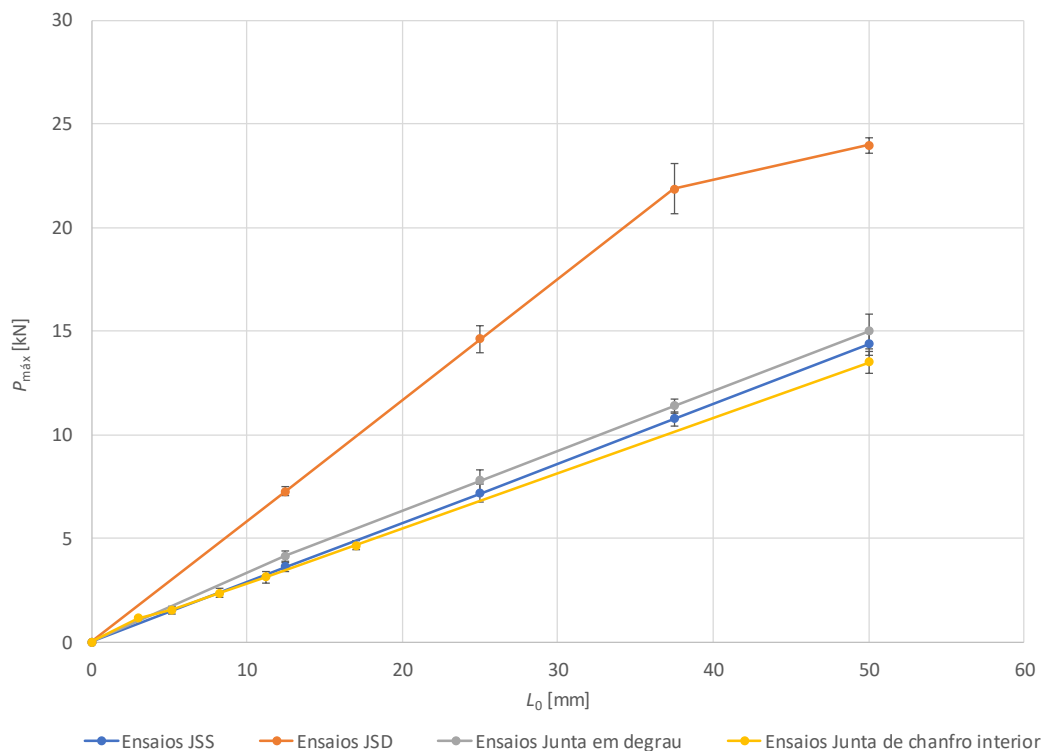


Figura 130 - Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (c/ desvio padrão) para o Sikaforce® 7752 em função do tipo de junta

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi efectuada uma comparação experimental e numérica por modelos de dano coesivo de diversos tipos de juntas adesivas para três adesivos.

Dos resultados obtidos experimentalmente, é possível concluir que o desempenho das juntas é muito influenciado pela escolha do adesivo. Para o Araldite® AV138, a junta com melhor desempenho foi a junta de chanfro interior, mas isto só se verificou para o maior L_0 testado. Este comportamento da junta de chanfro interior, deve-se ao facto de a sua geometria conseguir tirar partido da elevada resistência do Araldite® AV138, na medida em que apresenta distribuição de tensões praticamente constantes. De seguida, para os valores de sobreposição inferiores, a JSD foi a junta que melhor se comportou, duplicando os valores da JSS. Isto é devido ao facto de a área de sobreposição da JSD ser o dobro, para o mesmo L_0 . No entanto, a rigidez do Araldite® AV138 é o seu ponto fraco, pois não permite plastificação, o que faz com que o aumento de L_0 não surta muito efeito na melhoria do $P_{máx}$. Relativamente ao Araldite® 2015, que é um adesivo mais dúctil, verificou-se que a JSD é a junta que obtém melhor desempenho deste adesivo. Isto deve-se à sua maior ductilidade, aliada à maior área de sobreposição da JSD. De seguida, aparece a junta de chanfro interior, mas esta junta só se aproxima do valor de $P_{máx}$ da JSD, para L_0 maiores. É possível também verificar que o valor de $P_{máx}$ para a JSD não sofre melhorias significativas com o aumento de L_0 , a partir de certo ponto ($L_0=37,5$ mm), porque se atinge o limite de plastificação do aderente, e o mesmo se iria verificar se o valor de α na junta de chanfro interior fosse ainda mais reduzido, não conseguindo passar acima dos 25 kN de $P_{máx}$. No que diz respeito ao Sikaforce® 7752 (adesivo mais dúctil), é possível mais uma vez constatar que a JSD é a geometria com melhor *performance*. Também se verifica que o valor da JSD para o Araldite® 2015 e para o Sikaforce® 7752, para $L_0=50$ mm, é praticamente igual. Isto deve-se, como já foi referido anteriormente, ao facto de se atingir o limite de plastificação do aderente. As restantes configurações de junta ficam com valores de $P_{máx}$ muito abaixo da JSD. Mais uma vez, isto acontece devido ao facto de esta geometria de junta ter uma área de sobreposição maior, para um dado L_0 .

Dos resultados numéricos, é possível concluir que estes estão em concordância com os resultados obtidos experimentalmente. Através da análise numérica, é possível verificar que os picos de tensão têm tendência em aumentar, quanto maior for o valor de L_0 . Isto é mais notório no Araldite® AV138 que, em consequência da sua fragilidade, tem

maiores picos de tensão, razão pela qual, nas geometrias JSS, JSD e junta em degraus, é o adesivo com pior desempenho. No entanto, consegue ser o melhor adesivo para a junta de chanfro interior (para baixos valores de α), isto porque esta geometria de junta permite que as tensões sejam uniformes, conseguindo assim mitigar os efeitos da fragilidade do Araldite® AV138, e tirar melhor partido da sua boa resistência. Para as restantes geometrias de junta, o uso de adesivos dúcteis, como é o caso do Araldite® 2015 e do Sikaforce® 7752, permite a absorção e melhor distribuição desses gradientes de tensão, conseguindo assim melhorar a resistência da junta face a um adesivo frágil, como o Araldite® AV138. No que diz respeito ao estudo da variável de dano (SDEG), é possível concluir que, para as geometrias de junta JSS e junta de chanfro exterior, o dano é iniciado nas extremidades de sobreposição, sendo que nas juntas em degrau o dano é iniciado nos degraus exteriores. Nas JSD, devido à sua geometria, que provoca distribuição de tensões assimétricas (ao contrário das outras geometrias) ao longo da sobreposição, o dano é iniciado na extremidade exterior da sobreposição. Também é possível verificar a influência do adesivo na propagação do dano. No caso do Araldite® AV138, verifica-se que este tem uma transição muito abrupta do estado não danificado para danificado, ou seja, passa do regime elástico para rotura, sem ocorrer plastificação do adesivo, devido à sua elevada fragilidade. No entanto, este efeito não se verifica de forma tão acentuada nas juntas de chanfro interior que, como foi referido anteriormente, apresentam tensões praticamente uniformes, o que, por sua vez, promove uma distribuição mais suave do dano. Nos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, consegue-se uma melhor distribuição do dano ao longo da sobreposição, devido à sua ductilidade, pois esta promove a plastificação dos adesivos depois de atingido o limite elástico. Isto permite uma transição mais suave até à rotura, que por sua vez provoca melhoria de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 e, consequentemente, uma melhor resistência global da junta.

Pode-se concluir, referindo que a técnica dos MDC demonstrou ser bastante precisa na previsão da resistência das diferentes geometrias de junta, para os vários adesivos, devendo-se isto ao facto de permitir uma análise detalhada das tensões e do dano, como forma de justificar os resultados obtidos. Apesar da utilização de uma lei triangular, os resultados obtidos numericamente para os adesivos dúcteis (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) foram próximos daqueles obtidos experimentalmente, se bem que o uso de uma lei trapezoidal talvez permitisse resultados ainda mais precisos, e uma melhor análise da plastificação destes adesivos. No contexto geral, os melhores resultados foram obtidos para o Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, para a geometria JSD, para todos os L_0 . Na geometria de chanfro interior, o Araldite® AV138 é uma excelente opção para valores elevados de L_0 , se bem que nas outras geometrias, a resistência proporcionada por este adesivo não varia significativamente com o aumento de L_0 , devido à sua fragilidade.

Como propostas de trabalhos futuros, sugerem-se os seguintes:

- Utilização de aderentes com maior resistência mecânica, para evitar a plastificação, para as configurações de junta em que se verificou $P_{m\acute{a}x}$ mais elevados, no sentido de testar o adesivo e não o aderente;
- Utilização de uma lei trapezoidal no MDC, para melhorar as previsões numéricas, no caso dos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752;
- Efectuar o mesmo estudo comparativo para outros tipos de solicitações, como por exemplo fadiga ou impacto.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000: McGraw-Hill.
2. da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
3. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindustria.
4. Dillard, D.A., A.V. Pocius, and M. Chaudhury, *Adhesion science and engineering*. 2002: Elsevier.
5. Dilger, K., *Automobiles. Adhesive Bonding—Science, Technology and Applications*, 2005: p. 357-385.
6. Bishopp, J., *Aerospace: a pioneer in structural adhesive bonding*, in *Handbook of adhesives and sealants*, P. Cognard, Editor. 2005, Elsevier: Oxford. p. 215-347.
7. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005: Elsevier.
8. Hentinen, M., *Boats and marine*. Adams RD. Adhesive bonding: Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited. Cambridge England, 2005.
9. Adams, R. and J. Comyn, *Joining using adhesives*. *Assembly Automation*, 2000. **20**(2): p. 109-117.
10. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
11. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014.
12. Her, S.-C., *Stress analysis of adhesively-bonded lap joints*. *Composite structures*, 1999. **47**(1): p. 673-678.
13. Yeh, H.-Y. and D. Tandjung, *Mixed mode fracture analysis of the lap shear specimen test per ASTM D1002*. *Journal of reinforced plastics and composites*, 2005. **24**(8): p. 839-853.
14. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. *Composites Science and Technology*, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.

15. Pinto, A.G., et al., *Shear strength of adhesively bonded polyolefins with minimal surface preparation*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 452-456.
16. Ribeiro, N.F.Q.R., *Efeito de alterações geométricas na resistência de juntas de sobreposição*. 2012, Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
17. Tzetzis, D. and P. Hogg, *Experimental and finite element analysis on the performance of vacuum-assisted resin infused single scarf repairs*. Materials & Design, 2008. **29**(2): p. 436-449.
18. de Moura, M., A. de Morais, and A. de Magalhães, *Materiais compósitos-Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico.(2005)*. Porto: Publindústria. **369**.
19. Andruet, R.H., D.A. Dillard, and S.M. Holzer, *Two-and three-dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2001. **21**(1): p. 17-34.
20. Sheppard, A., D. Kelly, and L. Tong, *A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 1998. **18**(6): p. 385-400.
21. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*. 2014, Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
22. Montes, J.R., L.C. Martínez, and J.C. del Real Romero, *Procesos industriales para materiales metálicos*. 2006: Editorial Visión Libros.
23. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**(1/2): p. 41-47.
24. Adams, R. and N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of strain analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
25. Harris, J. and R. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
26. Sosa, J.C. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
27. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of applied mechanics, 1944. **11**(1): p. A17-A27.
28. Panigrahi, S. and B. Pradhan, *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. Journal of Reinforced plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
29. Hart-Smith, L.J., *Stress analysis- A continuum mechanics approach(in adhesive bonded joints)*. Developments in adhesives- 2 (A 82-28576 13-39). 1981, London: Applied Science Publishers. 1-44.

30. Penado, F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1998. **11**(3): p. 272-287.
31. Williams, M., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the seismological society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
32. Fernlund, G. and J. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 1: Analytical method*. International journal of adhesion and adhesives, 1991. **11**(4): p. 213-220.
33. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
34. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
35. Feraren, P. and H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(15): p. 2125-2142.
36. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18): p. 2445-2458.
37. Yang, Q. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
38. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
39. Daudeville, L. and P. Ladeveze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
40. Voyiadjis, G.Z. and P.I. Kattan, *Damage mechanics*. 2005: CRC Press.
41. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
42. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008: John Wiley & Sons.
43. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
44. Dolbow, J. and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.

45. Karachalios, E., R. Adams, and L.F. da Silva, *Single lap joints loaded in tension with ductile steel adherends*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **43**: p. 96-108.
46. Seong, M.-S., et al., *A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum*. Composite structures, 2008. **86**(1): p. 135-145.
47. de Sousa, C., et al., *Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2017. **231**(1-2): p. 210-223.
48. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
49. Nunes, S.L.S., et al., *Comparative Failure Assessment of Single and Double Lap Joints with Varying Adhesive Systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**(7-9): p. 610-634.
50. Gacoin, A., et al., *Comparison between experimental and numerical study of the adhesively bonded scarf joint and double scarf joint: Influence of internal singularity created by geometry of the double scarf joint on the damage evolution*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(5): p. 572-579.
51. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
52. Ridha, M., V.B.C. Tan, and T.E. Tay, *Traction–separation laws for progressive failure of bonded scarf repair of composite panel*. Composite Structures, 2011. **93**(4): p. 1239-1245.
53. Ichikawa, K., Y. Shin, and T. Sawa, *A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 464-470.
54. Bendemra, H., P. Compston, and P.J. Crothers, *Optimisation study of tapered scarf and stepped-lap joints in composite repair patches*. Composite Structures, 2015. **130**(Supplement C): p. 1-8.
55. Akpınar, S., *The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers*. Composites Part B: Engineering, 2014. **67**(Supplement C): p. 170-178.
56. Duong, C.N., *A general approach to fracture analysis of tapered bonded joints and doublers*. Engineering Fracture Mechanics, 2012. **96**(Supplement C): p. 355-379.
57. You, M., et al., *A numerical and experimental study of preformed angle in the lap zone on adhesively bonded steel single lap joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(3): p. 280-285.
58. Yan, Z.-M., et al., *A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum single lap joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(8): p. 687-695.

59. Haghpanah, B., S. Chiu, and A. Vaziri, *Adhesively bonded lap joints with extreme interface geometry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **48**(Supplement C): p. 130-138.
60. Ascione, F. and G. Mancusi, *Curve adhesive joints*. Composite Structures, 2012. **94**(8): p. 2657-2664.
61. Fessel, G., et al., *Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(7): p. 574-583.
62. Sancaktar, E. and S.R. Simmons, *Optimization of adhesively-bonded single lap joints by adherend notching*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2000. **14**(11): p. 1363-1404.
63. da Silva, L.F.M. and R.D. Adams, *Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(3): p. 227-235.
64. *ASTM E8 / E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2016, ASTM International: West Conshohocken, PA.
65. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, and L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
66. Campilho, R., *Adhesive, welded and weld-bonded single-lap joints: Numerical technique for strength prediction*. Vol. 24. 2012. 35-42.
67. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
68. Campilho, R.D.S.G., et al., *Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 86-95.
69. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
70. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015.
71. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016.
72. Silva, J.O.S., *Estudo de juntas adesivas em degrau: Análise experimentla e numérica por Modelos de Dano Coesivo*. 2017, Tese de Mestrado, em curso. Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
73. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.

74. Pocius, A., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction: The chemistry and physical properties of elastomer-based adhesives*. 2002, Hansen Gardner Publications, Inc., Maplewood.
75. Gonçalves, J., et al., *Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints*. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003. **26**(5): p. 479-486.
76. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. *International Journal of Solids and Structures*, 2004. **41**(2): p. 413-434.
77. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
78. De Moura, M., R. Campilho, and J. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. *Composites Science and Technology*, 2008. **68**(10): p. 2224-2230.
79. De Moura, M., R. Campilho, and J. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
80. Marques, E. and L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. *The Journal of Adhesion*, 2008. **84**(11): p. 915-934.
81. Campilho, R., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
82. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, ISEP: Porto.
83. Darwish, S. and A. Ghanya, *Critical assessment of weld-bonded technologies*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000. **105**(3): p. 221-229.
84. Radice, J. and J. Vinson, *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. *Composites science and technology*, 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
85. Taib, A.A., et al., *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. *International journal of adhesion and adhesives*, 2006. **26**(4): p. 237-248.
86. Kinloch, A., *Adhesion and adhesives: science and technology*. 2012: Springer Science & Business Media.
87. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, and J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009. **29**(2): p. 195-205.

88. Reis, P., F. Antunes, and J. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. *Composite structures*, 2005. **67**(1): p. 125-133.
89. Jiang, W. and P. Qiao, *An improved four-parameter model with consideration of Poisson's effect on stress analysis of adhesive joints*. *Engineering Structures*, 2015. **88**: p. 203-215.
90. Grant, L., R. Adams, and L.F. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. *International journal of adhesion and adhesives*, 2009. **29**(4): p. 405-413.
91. Da Silva, L.F., et al., *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009. **29**(6): p. 621-632.
92. Davis, M. and D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. *International journal of adhesion and adhesives*, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
93. Campilho, R., et al., *Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2008. **22**(13): p. 1565-1591.
94. Zhao, B., Z.-H. Lu, and Y.-N. Lu, *Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints—Variational method*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014. **49**: p. 115-126.
95. de Castro, J. and T. Keller, *Ductile double-lap joints from brittle GFRP laminates and ductile adhesives, Part I: Experimental investigation*. *Composites Part B: Engineering*, 2008. **39**(2): p. 271-281.
96. Shishesaz, M. and N. Bavi, *Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2013. **27**(11): p. 1197-1225.
97. Vallée, T., J.R. Correia, and T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations*. *Composites Science and Technology*, 2006. **66**(13): p. 1903-1914.
98. Ribeiro, T.E.A., et al., *Damage analysis of composite–aluminium adhesively-bonded single-lap joints*. *Composite Structures*, 2016. **136**: p. 25-33.
99. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. *Journal of Applied Mechanics*, 1944. **66**: p. A17–A27.
100. Mortensen, F. and O.T. Thomsen, *Simplified linear and non-linear analysis of stepped and scarfed adhesive-bonded lap-joints between composite laminates*. *Composite Structures*, 1997. **38**(1–4): p. 281-294.
101. Nunes, S.L.S., et al., *Comparative failure assessment of single and double-lap joints with varying adhesive systems*. *The Journal of Adhesion*, 2016. **92**: p. 610-634.

102. da Silva, D.F.O., *Utilização do método directo de obtenção de leis coesivas para previsão de resistência de juntas com chanfro interior*. 2017, Tese de Mestrado, em curso. Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
103. Alves, D.L., *Ligações adesivas com chanfro interior entre aderentes distintos*, in *Engenharia Mecânica*. 2016, ISEP: Porto.
104. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and 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. **21**(9): p. 855-870.
105. Davis, M. and D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
106. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. *Composites Part B: Engineering* 2009a. **40**: p. 149-157.
107. Odi, R.A. and C.M. Friend, *An improved 2D model for bonded composite joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2004. **24**(5): p. 389-405.
108. Moreira, R.D.F. and R.D.S.G. Campilho, *Strength improvement of adhesively-bonded scarf repairs in aluminium structures with external reinforcements*. *Engineering Structures*, 2015. **101**(Supplement C): p. 99-110.
109. Viana, F.A.L., *Previsão de resistência de juntas adesivas utilizando leis coesivas pelo método inverso*. 2017, Tese de Mestrado, em curso. Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
110. 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.
111. Fernandes, T.A., et al., *Adhesive selection for single lap bonded joints: experimentation and advanced techniques for strength prediction*. *The Journal of Adhesion*, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.