



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

DIOGO FILIPE TEIXEIRA CARVALHO

outubro de 2022

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

Diogo Filipe Teixeira Carvalho

1091304

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

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

Diogo Filipe Teixeira Carvalho

1091304

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

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Armando Jose Vilaça de Campos

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor António Mário Henriques Pereira

Professor Adjunto, IPL

PALAVRAS-CHAVE

Juntas adesivas de degrau; Juntas de dois adesivos; Adesivo estrutural; Método de Elementos Finitos; Modelo de dano coesivo; Previsão de resistência; Alterações geométricas.

RESUMO

A constante procura por novos e mais eficientes métodos produtivos leva a indústria a adotar cada vez mais as ligações adesivas. Este método de ligação visa substituir os métodos convencionais de ligação como o parafuso/rebite e a soldadura e é já predominante nas indústrias aeronáutica e automóvel. As principais vantagens das ligações adesivas são a sua capacidade de unir materiais dissimilares, a simplificação do processo de produção e a excelente resistência a solicitações de fadiga. Um dos principais aliados à proliferação deste tipo de junta foi o desenvolvimento de métodos numéricos computacionais precisos capazes de auxiliar no projeto e previsão de resistência da junta adesiva.

Neste trabalho será estudada a resistência de juntas adesivas de degrau em aderentes de alumínio da liga AW 6082-T651 com um e dois adesivos, para vários comprimentos de sobreposição. Foram para este efeito considerados três tipos de adesivos com características distintas, o adesivo frágil Araldite® AV138 e os adesivos com diferentes níveis de ductilidade Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Na análise experimental foram fabricadas as juntas e posteriormente testadas à tração. De seguida foram analisados os resultados obtidos em forma de curvas força-deslocamento ($P-\delta$) e modos de rotura. A análise numérica foi elaborada no programa ABAQUS® com o auxílio de um modelo de dano coesivo integrado com forma triangular. O estudo numérico incidiu sobre as tensões de arrancamento e corte, resistência e energia dissipada. Os valores obtidos foram depois comparados entre si e também com valores relativos a juntas de sobreposição simples.

A título de conclusão, foi possível validar a precisão dos modelos coesivos quando comparados com os dados obtidos experimentalmente. Para os comprimentos de sobreposição de 12,5 mm e 25 mm, a junta que revelou deter maior resistência foi aquela com a configuração Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752 de proporção 12,5%-75%-12,5%. Nos comprimentos de sobreposição de 37,5 mm e 50 mm, a configuração mais vantajosa tratou-se da Sikaforce® 7752-Araldite® AV138-Sikaforce® 7752. A técnica de dois adesivos não revelou aumentos de resistência significativos, embora na energia dissipada o aumento de desempenho seja notório, principalmente nas juntas de comprimentos de sobreposição superior.

KEYWORDS

Stepped-lap joint; Bi-adhesive joints; Structural adhesive; Finite Element Method; Cohesive zone models; Strength prediction; Geometrical modifications.

ABSTRACT

The constant search for new and more efficient production methods leads industry to increasingly adopt adhesive bonding. This joining method aims to replace conventional joining methods such as bolting/riveting and welding and is already prevalent in the aeronautics and automotive industries. The main advantages of adhesive bonds are their ability to join dissimilar materials, the simplification of the production process and the excellent resistance to fatigue stresses. One of the main allies to the widespread use of this type of joint was the development of highly accurate computer-aided numerical methods capable of assisting in the design and joint strength prediction.

In this work, the strength of stepped-lap joints in aluminium adherends of the AW 6082-T651 alloy with one and two adhesives, for various overlap lengths, will be studied. For this purpose, three types of adhesives with different characteristics were considered, the brittle adhesive Araldite® AV138 and the adhesives with different levels of ductility Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752. In the experimental analysis, the joints were manufactured and subsequently tested in tension. Then, the results obtained in the form of load-displacement curves ($P-\delta$) and failure modes were analysed. The numerical analysis was performed in the ABAQUS® program with the aid of an integrated cohesive zone model with a triangular shape. The numerical study focused on peel and shear stresses, strength, and dissipated energy. The values obtained were then compared with each other, and also with values related to single-lap joints.

In conclusion, it was possible to validate the accuracy of the cohesive models when compared with the experimentally obtained data. For overlap lengths of 12.5 mm and 25 mm, the joint that proved to have the highest strength was the one with the Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752 configuration of proportion 12.5%-75%-12.5 %. In the overlap lengths of 37.5 mm and 50 mm, the most advantageous configuration was Sikaforce® 7752-Araldite® AV138-Sikaforce® 7752. The two-adhesive technique did not reveal significant increases in strength, although in the dissipated energy the performance increase is noticeable, especially in joints of higher overlap lengths.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

DCB	<i>Double-cantilever beam</i>
EF	Elementos finitos
ENF	<i>End-notched flexure</i>
JCE	Junta de chanfro exterior
JCI	Junta de chanfro interior
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
JTT	Junta topo a topo
MDC	Modelo de Dano Coesivo
MEFE	Método de Elementos Finitos Estendido
MMC	Mecânica de Meios Contínuos
TLC	Tensão longitudinal crítica

Lista de Símbolos

E	Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
G_c	Resistência à fratura
G_{Ic}	Tenacidade à tração
L_0	Comprimento de sobreposição

t	Espessura
t_A	Espessura do adesivo
t_P	Espessura do aderente
σ_e	Tensão de cedência à tração
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y	Tensão de arrancamento
τ_{xy}	Tensão de corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhe pata de osga [4]	7
Figura 2 – Diferentes regiões de uma junta adesiva (adaptado de [6])	8
Figura 3 – Modos de carregamento presentes em juntas adesiva (adaptado de [11])	12
Figura 4 – Modos de rotura de juntas adesivas (adaptado de [17])	14
Figura 5 – Configurações possíveis de juntas adesivas (adaptado de [8])	16
Figura 6 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura nula: aproximação local (a) e aproximação contínua (b)) (adaptado de [47])	22
Figura 7 – Comparativo entre junta com filete e junta sem filete (adaptado de [18])	30
Figura 8 – Comparativo entre JCE e JSS [7]	31
Figura 9 – Parâmetros geométricos de uma JSS com entalhe (adaptado de [95])	31
Figura 10 – Raios considerados no estudo de Zhao et al. (adaptado de [96])	32
Figura 11 – Geometria estudada por Haghpanah et al. (adaptado de [97])	32
Figura 12 – Detalhe da junta de sobreposição sinusoidal (adaptado de [98])	33
Figura 13 – σ_y (a) e τ_{xy} (b) presentes em JSS e juntas de degrau (adaptado de [99])	34
Figura 14 – Geometria da junta de múltiplo degrau duplo (adaptado de [100])	35
Figura 15 – Geometria da junta de degrau interno (adaptado de [101])	35
Figura 16 – Geometria considerada na reparação de painéis compósitos (adaptado de [102])	36
Figura 17 – Geometria considerada na conceção da junta em degrau.	41
Figura 18 – Geometria considerada na área de ligação da junta.	42
Figura 19 – Curvas σ - ϵ referentes à liga de alumínio AW 6082-T651 [111].	44
Figura 20 – Curvas σ - ϵ obtidas por ensaio a provetes <i>bulk</i> de adesivo Araldite® AV138 [108].	44
Figura 21 – Curvas σ - ϵ obtidas por ensaio a provetes <i>bulk</i> de adesivo Araldite® 2015 [111].	45
Figura 22 – Curvas σ - ϵ obtidas por ensaio a provetes <i>bulk</i> de adesivo Araldite® 7752 [112].	46
Figura 23 – Corte dos aderentes em serra de banda.	47
Figura 24 – Aderentes após remoção de rebarba e limpeza.	47
Figura 25 – Diferentes etapas do processo de maquinagem: a) início do ataque da fresa; b) primeira passagem da fresa e c) segunda passagem da fresa.	48

Figura 26 – Disposição dos aderentes a aguardar fabrico.....	49
Figura 27 – Detalhe da aplicação de adesivo em junta Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752.	50
Figura 28 – Provete na sua posição final de cura.	50
Figura 29 – Operação de limpeza do excesso de adesivo e respetiva marcação do provete.....	51
Figura 30 – Aspeto final das juntas após limpeza para os 4 L_0 em estudo.....	52
Figura 31 – Rotura do provete no fim do seu ensaio à tração na máquina de ensaios Shimadzu® AG-X 100.	52
Figura 32 – Detalhe da rotura de 3 provetes de $L_0=50$ mm.	53
Figura 33 – Valores de $P_{máx.}$ obtidos experimentalmente para juntas simples de Araldite® 2015.....	59
Figura 34 – Valores de $P_{máx.}$ obtidos experimentalmente para juntas simples de Sikaforce® 7752.....	60
Figura 35 – Valores de $P_{máx.}$ obtidos experimentalmente para juntas de dois adesivos na configuração 7752-2015-7752.....	61
Figura 36 – Valores de $P_{máx.}$ obtidos experimentalmente para juntas de dois adesivos na configuração 7752-AV-7752.	61
Figura 37 – Exemplo do particionamento de uma junta de dois adesivos com $L_0=12,5$ mm	62
Figura 38 – Características consideradas o material alumínio para comportamento elástico (a) e para comportamento plástico (b))	63
Figura 39 – Parâmetros de iniciação de dano (a)), comportamento elástico (b)) e tenacidade à fratura (c)) considerados para o adesivo Araldite® 2015	63
Figura 40 – Definição das diferentes secções criadas em ABAQUS®	64
Figura 41 – Detalhe da atribuição de cada uma das secções criadas a cada uma das suas respetivas áreas	64
Figura 42 – Tipo de análise realizada e valores de incrementação considerados no modelo numérico ...	65
Figura 43 – Parâmetros considerados para a extremidade encastrada (a)) e para a extremidade livre (b))	66
Figura 44 – Pormenor da malha na zona de ligação da junta (análise MDC)	66
Figura 45 – Representação gráfica da rotura da junta adesiva em estudo	67
Figura 46 - Lei coesiva triangular [114].	68
Figura 47 - Lei coesiva triangular modo I (a) e modo II (b) (adaptado de [116]).	69
Figura 48 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=12,5$ mm em junta de adesivo simples.....	76
Figura 49 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=25$ mm em junta de adesivo simples.....	77

Figura 50 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=37,5$ mm em junta de adesivo simples.....	77
Figura 51 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=50$ mm em junta de adesivo simples.....	78
Figura 52 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=12,5$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.....	79
Figura 53 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=25$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.	79
Figura 54 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=37,5$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.....	80
Figura 55 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=50$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.	80
Figura 56 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=12,5$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.	81
Figura 57 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=25$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.	82
Figura 58 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=37,5$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.	82
Figura 59 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=50$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.	83
Figura 60 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=12,5$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.	83
Figura 61 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=25$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.	84
Figura 62 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=37,5$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.	84
Figura 63 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=50$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.	85
Figura 64 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm em junta de adesivo simples.	86
Figura 65 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=25$ mm em junta de adesivo simples.	86
Figura 66 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=37,5$ mm em junta de adesivo simples.	87
Figura 67 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=50$ mm em junta de adesivo simples.	87
Figura 68 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.....	88
Figura 69 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=25$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.	88

Figura 70 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=37,5$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.	89
Figura 71 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=50$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.	89
Figura 72 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.	90
Figura 73 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=25$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.	91
Figura 74 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=37,5$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.	91
Figura 75 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=50$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.	92
Figura 76 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.	92
Figura 77 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=25$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.	93
Figura 78 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=37,5$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.	93
Figura 79 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=50$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.	94
Figura 80 – Comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas simples de Araldite® 2015.	95
Figura 81 – Comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas simples de Sikaforce® 7752.	95
Figura 82 – Comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas de dois adesivos na configuração 7752-2015-7752.	96
Figura 83 – Comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas de dois adesivos na configuração 7752-AV-7752.	97
Figura 84 – Representação gráfica dos valores de $P_{máx.}$ obtidos para a proporção 12,5%-75%-12,5%.	98
Figura 85 – Representação gráfica dos valores de $P_{máx.}$ obtidos para a proporção 33%-34%-33%.	99
Figura 86 – Representação gráfica dos valores de $P_{máx.}$ obtidos para a proporção 25%-50%-25%.	100
Figura 87 – Representação gráfica dos valores de U obtidos para a proporção 12,5%-75%-12,5%.	102
Figura 88 – Representação gráfica dos valores de U obtidos para a proporção 33%-34%-33%.	103
Figura 89 – Representação gráfica dos valores de U obtidos para a proporção 25%-50%-25%.	105

Figura 90 – Comparação de valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos numericamente para juntas de degrau e JSS (Araldite® AV138).....	106
Figura 91 – Comparação de valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos numericamente para juntas de degrau e JSS (Araldite® 2015).....	107
Figura 92 – Comparação de valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos numericamente para juntas de degrau e JSS (Sikaforce® 7752).....	107

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese das características dos tipos mais comuns de adesivos estruturais (adaptado de [22]).	17
Tabela 2 – Critérios de rotura utilizados por autor (adaptado de [33]).	20
Tabela 3 – Síntese do estado-da-arte da previsão de resistência, baseado em análise MMC (adaptado de [23]).	24
Tabela 4 – Síntese do estado-da-arte da previsão de resistência, baseado na análise pela mecânica de fratura (adaptado de [23]).	25
Tabela 5 – Síntese do estado-da-arte da previsão de resistência, baseado na análise de MDC (adaptado de [23]).	26
Tabela 6 – Síntese do estado-da-arte da previsão de características, baseado na análise pela mecânica do dano (adaptado de [23]).	28
Tabela 7 – Síntese do estado-da-arte da previsão de características, baseado na análise pelo MEFE (adaptado de [23]).	28
Tabela 8 – Tabela resumo do estado-da-arte da utilização de degraus em juntas adesivas.	36
Tabela 9 – Valores considerados na geometria da junta em degrau.	42
Tabela 10 – Valores considerados na geometria da área de ligação da junta por proporção.	42
Tabela 11 – Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [109].	43
Tabela 12 – Comparativo entre as propriedades mecânicas facultadas pelo fabricante e obtidas experimentalmente.	43
Tabela 13 – Modos de rotura das juntas de adesivo simples Araldite® 2015.	53
Tabela 14 – Modos de rotura das juntas de adesivo simples Sikaforce® 7752.	55
Tabela 15 – Modos de rotura das juntas de dois adesivos na configuração Sikaforce® 7752-Araldite® AV138-Sikaforce® 7752.	56
Tabela 16 – Modos de rotura das juntas de dois adesivos na configuração Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752.	58
Tabela 17 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Araldite® AV138 [73].	71
Tabela 18 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Araldite® 2015 [73].	71

Tabela 19 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 [124].	72
Tabela 20 – Correspondência da designação comercial dos adesivos em estudo e sua respectiva designação curta.	72
Tabela 21 – Classificação dos modos de rotura observados na análise numérica.	73
Tabela 22 – Modos de rotura observados nas juntas de adesivo simples.	74
Tabela 23 – Modos de rotura observados nas juntas de proporção 12,5%-75%-12,5%.	74
Tabela 24 – Modos de rotura observados nas juntas de proporção 33%-34%-33%.	75
Tabela 25 – Modos de rotura observados nas juntas de proporção 25%-50%-25%.	75
Tabela 26 – Valores de $P_{máx.}$ e incremento percentual de resistência para a proporção 12,5%-75%-12,5%.	98
Tabela 27 – Valores de $P_{máx.}$ e incremento percentual de resistência para a proporção 33%-34%-33%. ...	99
Tabela 28 – Valores de $P_{máx.}$ e incremento percentual de resistência para a proporção 25%-50%-25%.	101
Tabela 29 – Valores de U e incremento percentual de resistência para a proporção 12,5%-75%-12,5%.	102
Tabela 30 – Valores de U e incremento percentual de resistência para a proporção 33%-34%-33%.....	104
Tabela 31 – Valores de U e incremento percentual de resistência para a proporção 25%-50%-25%.....	105

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Definição e características	8
2.1.2	Comparação com técnicas de ligação mecânicas	9
2.1.3	Esforços elementares	11
2.1.4	Modos de rotura	13
2.1.5	Configurações possíveis de junta	14
2.1.6	Aplicações estruturais das ligações adesivas	16
2.2	Previsão da resistência estática de juntas adesivas	18
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	18
2.2.1.1	Modelos analíticos	18
2.2.1.2	Modelos numéricos	19
2.2.1.3	Critérios de resistência	19
2.2.2	Mecânica da fratura	20
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	21
2.2.4	Mecânica do dano	22
2.2.5	Método de Elementos Finitos Estendido	22
2.2.6	Outros métodos	23
2.2.7	Estado-da-arte.....	24
2.3	Alterações geométricas em ligações adesivas	29

2.3.1	Filetes de adesivo	29
2.3.2	Chanfros dos aderentes.....	30
2.3.3	Entalhes nos aderentes	31
2.3.4	Outras alterações	32
2.3.5	Utilização de degraus	33
2.3.5.1	Conceito e vantagens da técnica	33
2.3.5.2	Distribuição de tensões	33
2.3.5.3	Geometrias comumente utilizadas.....	34
2.3.5.4	Estado-da-arte	36
3	DESENVOLVIMENTO	41
3.1	Trabalho experimental.....	41
3.1.1	Geometria da junta e conceito <i>dual adhesive</i>	41
3.1.2	Materiais	43
3.1.2.1	Aderentes.....	43
3.1.2.2	Adesivos.....	44
3.1.3	Procedimento experimental.....	46
3.1.3.1	Preparação dos aderentes	46
3.1.3.2	Fabrico da junta	49
3.1.3.3	Ensaio das juntas	51
3.1.4	Resultados	53
3.1.4.1	Análise dos modos de rotura	53
3.1.4.2	Resistência das juntas	59
3.2	Trabalho numérico.....	62
3.2.1	Construção dos modelos numéricos	62
3.2.2	Modelo de dano para o adesivo.....	67
3.2.2.1	Modelo coesivo triangular	67
3.2.2.2	Definição das leis coesivas	70
3.2.2.2.1	Araldite® AV138	70
3.2.2.2.2	Araldite® 2015.....	71

3.2.2.2.3	Sikaforce® 7752.....	71
3.2.3	Resultados obtidos	72
3.2.3.1	Modos de rotura	72
3.2.3.2	Análise de tensões	76
3.2.3.2.1	Tensões de arrancamento.....	76
3.2.3.2.2	Tensões de corte	85
3.2.3.3	Validação do modelo numérico	94
3.2.3.4	Resistência das juntas	97
3.2.3.5	Energia dissipada	101
3.2.3.6	Análise comparativa com JSS	106
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	111
4.1	Conclusões	111
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	113
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	117

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Com os avanços tecnológicos, cada vez mais a indústria se afasta dos métodos convencionais de fixação e união de materiais. Nos últimos tempos a utilização de juntas adesivas nas diferentes áreas da indústria tem proliferado. Este método de fixação tem vindo a ganhar terreno pois demonstra grande versatilidade sobre os demais.

Quando se comparam juntas adesivas com juntas soldadas ou aparafusadas/rebitadas, estas têm como principais vantagens a facilidade com que unem materiais dissimilares, a excelente resistência à fadiga pois permitem uma distribuição mais uniforme de tensões ao longo da junta, a facilidade de produção deste tipo de juntas, entre outras. Por outro lado, existem também desvantagens na sua utilização, uma vez que as juntas adesivas sofrem de fraca resistência a esforços de arrancamento e clivagem, denotam perda de propriedades mecânicas em ambientes quimicamente agressivos e a altas temperaturas assim como não permitem uma fácil desmontagem.

A resistência global de uma ligação adesiva não é apenas influenciada pelos materiais e ambiente onde esta se encontra inserida. As características mecânicas e geométricas do adesivo e aderentes detêm grande influência neste campo. No que diz respeito aos aderentes a sua espessura, comprimento de sobreposição ou material podem influenciar a capacidade de carga da união, enquanto no campo dos adesivos as suas características *bulk* ditam a que solicitação a junta se poderá melhor adequar.

Aliado à adoção das juntas adesivas têm sido também desenvolvidas novas e melhores ferramentas que permitam o dimensionamento e previsão de comportamento deste método de união, como é o caso do método de elementos finitos (EF) aliado a modelos de dano específicos a cada solicitação.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como propósito o estudo experimental e numérico da utilização da técnica de dois adesivos no fabrico de juntas adesivas de degrau, considerando três adesivos com propriedades distintas (Araldite® AV138, Araldite® 2015, Sikaforce® 7752). Para esta finalidade, foram primeiramente efetuados ensaios experimentais, nomeadamente ensaios de tração, de forma a obter dados relativos à

resistência de uma combinação predefinida de juntas adesivas. Posteriormente foram realizados os estudos numéricos por modelo de dano coesivo (MDC) de juntas adesivas em degrau, em função da alteração de parâmetros geométricos (L_0). Para este fim foi utilizada a ferramenta de EF ABAQUS® aliado a um MDC de forma triangular. Por fim, foi realizada uma comparação com juntas adesivas de geometria corrente.

1.3 Organização da dissertação

De forma a melhor organizar a temática do trabalho desenvolvido, esta dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos distintos.

O 1º capítulo contextualiza e enquadra o tema abordado bem como enumera os objetivos deliberados aquando da definição do tema. É também feito um comentário sobre a organização estrutural do trabalho

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica do tema em estudo. É feita uma introdução às ligações adesivas sob forma de apresentação das suas características, enumeração de esforços e modos de rotura, assim como os tipos de junta existentes e suas aplicações em cenários estruturais. É também abordado o tema da previsão da resistência de juntas adesivas tanto através de métodos numéricos como analíticos e feita a apresentação das alterações geométricas possíveis em juntas adesivas.

No capítulo 3 é relatado todo o trabalho experimental e numérico realizado. Referente ao trabalho experimental é feita uma apresentação tanto dos aderentes como dos adesivos em estudo, seguido da descrição de todo o procedimento experimental. No fim são comentados os resultados obtidos. No que ao trabalho numérico diz respeito, é detalhada a construção dos modelos numéricos em *software* ABAQUS®, é aprofundado o modelo de dano utilizado em EF e finalmente comentados os resultados obtidos.

No 4º e último capítulo são apresentadas as conclusões da presente dissertação, bem como sugerida a realização de possíveis trabalhos futuros de forma a complementar o tema.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Previsão da resistência estática de juntas adesivas
- 2.3 Alterações geométricas em ligações adesivas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

De uma forma sucinta, um adesivo trata-se de uma substância que, quando aplicada a duas ou mais superfícies, é capaz de as unir e oferecer resistência permanente à sua separação [1]. Apesar de haver recentemente um interesse crescente na utilização deste método de ligação, a existência de adesivos antecede largamente a intervenção humana, estes encontram-se presentes em larga escala na natureza. Para alguns seres vivos o fenómeno de adesão é inerente à sua existência, sendo de um modo geral uma interação à escala molecular e capaz de ser reversível de forma a conciliar as diferentes necessidades a que estes organismos estão sujeitos no ambiente [2].

Exemplos destas ocorrências orgânicas podem-se verificar nos membros de alguns répteis como as osgas (Figura 1) e na família dos crustáceos pelos perceves e mexilhão, que são capazes de formar ligações fortes com uma grande variedade de superfícies mesmo nas adversas condições marítimas. Por sua vez, é possível observar-se também a presença de ligações adesivas em materiais inorgânicos, como é o caso de certas rochas e minerais como o calcário ou arenito. Outro exemplo diz respeito às carapaças de crustáceos, que consistem geralmente num conjunto de materiais inorgânicos frágeis unidos por meio de agentes aglutinantes orgânicos, o que resulta em estruturas extremamente resistentes [2, 3].



Figura 1 – Detalhe pata de osga [4]

Existem também inúmeros testemunhos arqueológicos que suportam que a utilização de adesivos muito antes do ser humano moderno, através da descoberta de ferramentas que evidenciavam resíduos de betume e resina de bétula no seu processo de fabrico, datadas de há 80 mil anos atrás. As primeiras evidências do uso de adesivos por parte do ser humano moderno remontam a 8 mil anos aquando da descoberta de artefactos em cemitérios que apresentavam, na sua conceção e restauro, vestígios de colas de origem animal, piche e resinas vegetais. Apesar de apenas no início do século XVIII se ter dado a industrialização do processo da manufatura de adesivos, estes mantiveram-se praticamente inalterados na sua origem até ao começo do século XIX,

quando se deu a transição dos adesivos de origem animal e vegetal para os adesivos baseados em polímeros sintéticos. Esta fase coincidia com a era moderna dos adesivos [5].

2.1.1 Definição e características

A adesão corresponde ao estado de equilíbrio mecânico em que duas ou mais superfícies, vulgarmente denominados por substratos ou aderentes, se encontram unidas através de contacto interfacial, de forma que as forças mecânicas e o trabalho possam ser transferidas através da camada limite. As forças envolvidas em manter as duas superfícies unidas advêm geralmente de ligações químicas primárias, forças de van der Waals ou ligações de hidrogénio. No entanto, estes tipos de forças são apenas responsáveis por uma parte da resistência mecânica do sistema, que também é influenciada pelas propriedades mecânicas da zona interfacial e pelas propriedades *bulk* tanto do aderente como do adesivo [6].

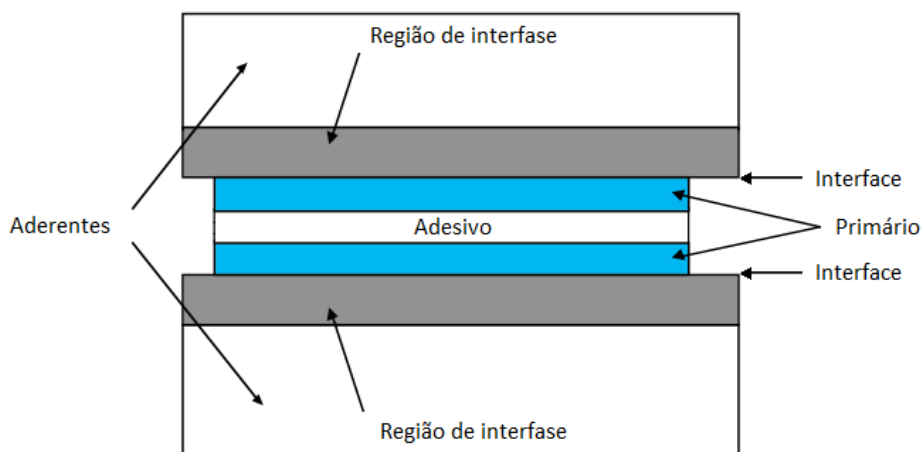


Figura 2 – Diferentes regiões de uma junta adesiva (adaptado de [6])

Com o intuito de auxiliar a idealizar a conceção de uma junta adesiva, na Figura 2 encontram-se ilustradas as diferentes regiões constituintes deste tipo de ligação:

- Aderentes: também conhecidos como substratos, correspondem ao conjunto de materiais a unir por meio de junta adesiva. Estes podem ser do mesmo material ou de materiais dissimilares;
- Adesivo: substância comumente polimérica capaz de unir duas ou mais superfícies de forma permanente e resistir à sua separação;
- Região de interfase: correspondem a zonas cujo processo de solidificação do adesivo polimérico provoca alterações das propriedades físicas, químicas e mecânicas tanto do próprio adesivo como do aderente. Esta região é também

influenciada pela humidade e temperatura ambiente. Após a cura total do adesivo, esta recém-criada região portadora de propriedades únicas passa a fazer parte integrante da junta adesiva, influenciando a sua resposta a solicitações mecânicas;

- Interface: trata-se da zona de fronteira entre duas ou mais superfícies de materiais distintos. Exemplo disso é o plano de contacto entre o adesivo e o aderente. A interface é também conhecida como camada limite;
- Primário: substância habitualmente aplicada à superfície do aderente sob a forma de promotor de adesão. O seu objetivo é modificar a energia superficial do aderente, servir de catalisador à reação química do adesivo, o impedir a formação de nova camada superficial de corrosão no aderente, entre outros. É um tipo de pós-tratamento superficial e, como tal, nem sempre está presente numa junta adesiva [7, 8].

2.1.2 Comparação com técnicas de ligação mecânicas

A escolha do método de união de duas superfícies nem sempre é um processo expedito. Se em alguns casos a junta adesiva é o melhor, e por vezes até único, método de união possível, noutros casos a sua utilização é impossível. A escolha do processo adequado irá sempre envolver compromissos no desempenho, capacidade de produção, custo e fiabilidade. Neste capítulo são analisadas as principais vantagens e desvantagens que as ligações adesivas apresentam sobre os métodos de ligação clássicos como o parafuso/rebite e a soldadura:

- Redução de peso: a existência de adesivos estruturais permite a conceção de estruturas *sandwich* capazes de ser usadas em detrimento de um tipo de construção de maior densidade. Outra vantagem é a capacidade em unir chapas de menor espessura, algo que através de ligações soldadas e/ou aparafusadas se torna exponencialmente mais difícil, quando mais fino for o material a unir [9];
- Excelente resistência à fadiga: a capacidade de fabrico de uma junta contínua ao longo de grandes distâncias, promove uma distribuição de tensões uniforme ao longo da largura da junta o que, aliado à tenacidade inerente dos adesivos, confere uma ligação mecânica com resistência superior à fadiga. Por comparação, ligações aparafusadas/rebitadas são suscetíveis à criação de concentrações de tensões elevadas na zona de furação [9];
- Juntas com superior apresentação estética e de construção simples: a não necessidade de efetuar as furações consecutivas ao longo de uma junta dimensionada por meio de ligação aparafusada e ou rebitada, representa uma

vantagem tanto a nível de simplificação de processo de fabrico, como de aspeto final da junta. Quando comparada com uma junta soldada, esta prescinde da utilização de equipamentos complexos e dispendiosos para fabrico, assim como apresenta um teto de perícia inferior para a realização de um acabamento final elegante. A superfície livre dos ressaltos inerentes à utilização de rebites é também vantajosa do ponto de vista aerodinâmico, caso esse seja um dos requisitos de funcionalidade do conjunto final [7, 9];

- Capacidade de união de materiais dissimilares: através de juntas adesivas, é possível a ligação de uma grande variedade de materiais sólidos independentemente da sua forma, espessura, coeficiente de expansão térmica ou módulo de elasticidade. Muitas ligas metálicas, como é o exemplo do alumínio, o titânio e o magnésio, para além de padecerem de uma dificuldade acrescida na sua soldadura, estão também sujeitas ao fenómeno de corrosão galvânica, que pode ser mitigado através da utilização de adesivos, que agem como uma barreira física de isolamento dielétrico entre os dois materiais [7, 10].

Uma vez analisadas as vantagens das ligações adesivas, serão de seguida enumeradas, sucintamente, as desvantagens deste meio de ligação:

- Durabilidade da junta é afetada pelo ambiente circundante: as juntas adesivas perdem propriedades mecânicas quando expostas a condições ambientais agressivas, como é o exemplo das altas temperaturas, elevada exposição à humidade e agentes químicos. O efeito da humidade na resistência das juntas adesiva é significativo, devido à deterioração da camada adesiva e da interface. Relativamente à ação da temperatura, a maioria dos adesivos comerciais demonstra instabilidade a temperaturas superiores a 180°C [7];
- Fraca resistência a esforços de arrancamento e clivagem: de um modo geral, os adesivos oferecem fraca resistência quando sujeitos a tensões de arrancamento e clivagem, o que implica um maior cuidado no dimensionamento da junta de forma a dar preferência a esforços de corte [7, 8];
- Necessária preparação superficial: nas ligações adesivas, existe a necessidade de preparação superficial na maioria das vezes. Alguns adesivos são bastante sensíveis à presença de gorduras ou humidade nas superfícies a unir, enquanto outros necessitam de alterações físicas à superfície do substrato de forma a garantir uma satisfatória molhagem do adesivo [8];

- Tempos de cura elevados: Alguns tipos de adesivos necessitam de bastante tempo até desenvolverem resistência suficiente para permitir o manuseamento da junta, o que pode implicar a utilização de gabaritos de fixação, o que torna o processo de fabrico mais moroso e dispendioso [7, 8];
- Dificuldade em inspecionar ligação final: os métodos numéricos existentes para análise da integridade de uma junta adesiva ainda não se encontram maturados o suficiente para que este tipo de procedimento seja viável em larga escala. Os tradicionais métodos destrutivos continuam a ser os mais eficazes na caracterização da resistência da junta, embora nem sempre sejam possíveis [7];
- Tempo de armazenamento limitado: planeamento produtivo deve ser cuidadosamente estudado de forma a fatorizar o tempo de armazenamento, por vezes bastante curto, dos diferentes adesivos capazes de serem usados em ambiente industrial. Tendencialmente, os adesivos, após expostos ao ambiente, começam a ver degradadas as suas características [7];
- Dificuldade na desmontagem: ao contrário das ligações aparafusadas e rebitadas, a ligação adesiva é tipicamente permanente, o que dificulta a desmontagem, caso haja necessidade de redimensionamento ou correção de erros no processo produtivo [7].

2.1.3 Esforços elementares

Em todos os tipos de ligações mecânicas existem diferentes modos de carregamento a solicitar o material de união da junta em estudo. De forma a proceder ao correto dimensionamento de uma junta adesiva, é fundamental compreender os tipos de carregamentos elementares a que um adesivo está sujeito durante a vida útil de uma ligação deste tipo:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;
- Clivagem;
- Arrancamento.

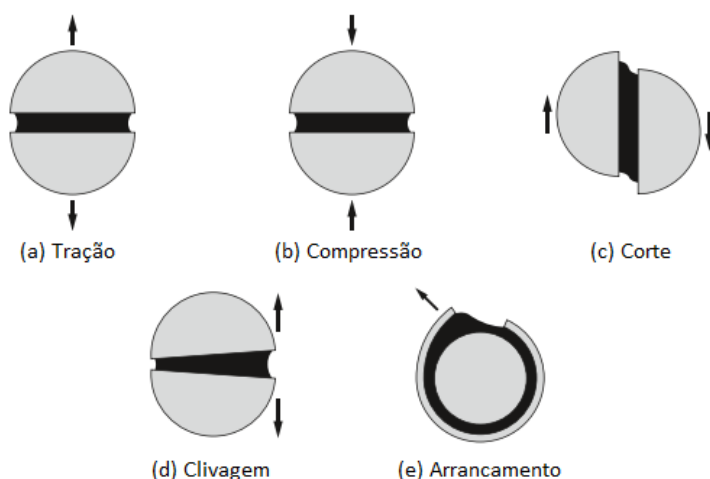


Figura 3 – Modos de carregamento presentes em juntas adesiva (adaptado de[11])

Tração

Os esforços de tração, representados na Figura 3 (a), desenvolvem-se quando existe perpendicularidade entre os substratos e as forças aplicadas a uma junta ao longo de todo o comprimento de colagem, com o intuito de provocar a separação dos dois aderentes. Embora teoricamente este seja um conceito simples, na prática, raramente os esforços de tração são perfeitamente perpendiculares ao plano da junta, o que provoca uma distribuição de tensões irregular e consequentemente induz esforços não ideais de clivagem e arrancamento [12, 13].

Compressão

Tal como os esforços de tração, os esforços de compressão, representados na Figura 3 (b), exigem que as forças aplicadas na junta sejam perfeitamente perpendiculares e, por sua vez, tendem a provocar a compressão dos dois aderentes. Teoricamente uma junta solicitada à compressão não necessitaria de qualquer meio de ligação, uma vez que é improvável que um adesivo carregado à compressão sofra falha de integridade [7].

Corte

Estes tipos de esforços ocorrem quando as forças aplicadas na junta são coincidentes com o plano desta, o que provoca o escorregamento e eventual separação dos dois aderentes, através do aparecimento de tensões de corte (Figura 3 (c)). Este é o modo de carregamento preferencial para juntas adesivas, pois toda a área de colagem contribui para a resistência da junta. Contudo, verifica-se que as zonas de maior concentração de tensões são as extremidades da junta sobreposta. Este facto deve-se ao efeito de deformação diferencial de ambos os aderentes, que se deformam longitudinalmente e de forma crescente, desde a extremidade livre da junta até à

extremidade oposta. As concentrações de tensões são diretamente proporcionais ao comprimento de sobreposição da junta [7, 14].

Clivagem e arrancamento

Como conceito, as tensões de clivagem (Figura 3 (d)) e de arrancamento (Figura 3 (e)) são bastante similares, e ocorrem quando forças aplicadas numa das extremidades da junta, agem com o intuito de separar os aderentes. Estes tipos de carregamentos são os mais danosos para juntas adesivas pois as tensões são concentradas apenas numa pequena zona da junta, enquanto o remanescente da área colada apresenta pouca ou nenhuma influência na sua resistência [12, 13]. Tensões de clivagem ocorrem quando é aplicada uma força na extremidade da junta de forma a precipitar a separação dos substratos rígidos. Por outro lado as tensões de arrancamento, embora similares às de clivagem, pressupõem a utilização de aderentes flexíveis, o que provoca um ângulo de arrancamento muito superior [8].

2.1.4 Modos de rotura

As ligações adesivas são suscetíveis a grandes variações no seu desempenho de serviço, uma vez que a sua conceção depende de uma quantidade considerável de fatores por vezes difíceis de controlar. Com o objetivo de mitigar tais variações, é importante compreender os modos de falha a que este tipo de juntas está sujeito, de forma a ser evitada a utilização de processos de ligações adesivas não ideais ou na realização de testes inadequados na seleção de materiais. De acordo com a norma ASTM D 5573 -99, podem-se enumerar os seguintes modos de falha principais (Figura 4) [15, 16]:

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

Rotura adesiva

A rotura adesiva ocorre quando a separação entre os dois aderentes se dá na interface adesivo-aderente. Após a rotura, é possível constatar que o adesivo se encontra unido apenas a um dos substratos, encontrando-se o outro livre de resíduos. Este tipo de rotura nem sempre é corretamente identificada, devido à dificuldade que por vezes existe em identificar a fina camada de adesivo na superfície do aderente que se pensava limpo. O modo de rotura adesiva, de um modo geral, deve-se a fraca limpeza das superfícies a unir e pode ser observado esquematicamente na Figura 4 (a) [14].

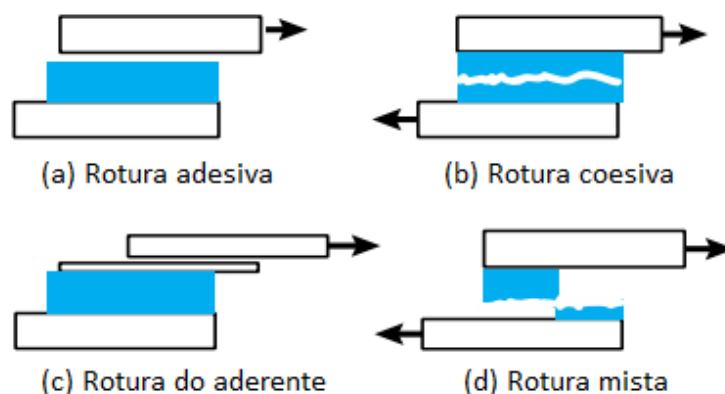


Figura 4 – Modos de ruptura de juntas adesivas (adaptado de [17])

Rotura coesiva

A ruptura coesiva, representada na Figura 4 (b), acontece sempre que a falência da junta adesiva se dá no seio do próprio adesivo. Quando este modo de falha ocorre pode-se verificar que ambos os substratos se encontram cobertos de adesivo, pelo que foi utilizada a totalidade da resistência interna o adesivo. Este modo de ruptura é por isso considerado como sendo preferencial [7, 14].

Rotura do aderente

Mais comum de ocorrer na união de materiais compósitos do que nos metálicos, este tipo de falha ocorre quando a ruptura acontece no próprio aderente e não no adesivo. Este modo de falha é sinonimo de uma junta bem dimensionada, uma vez que a resistência do aderente é superior à da junta. A ruptura do aderente representada na Figura 4 (c) é também um dos modos de ruptura preferenciais [14].

Rotura mista

Por fim, a ruptura mista (Figura 4 (d)) surge quando simultaneamente ocorrem os modos de ruptura adesiva e coesiva em diferentes zonas da mesma junta. Tal como na ruptura adesiva, geralmente significa que houve uma deficiente preparação superficial [14].

2.1.5 Configurações possíveis de junta

A configuração de uma junta adesiva está intimamente relacionada com a capacidade que esta tem em resistir aos esforços aplicados. Idealmente uma junta adesiva deverá ser dimensionada de forma a ser solicitada à compressão e ao corte, em detrimento de ao arrancamento e clivagem, de modo a oferecer ao adesivo a melhor chance possível de sucesso [7]. Na prática, nem sempre o tipo de junta que oferece melhores resultados teóricos poderá ser a escolhida. Seja por não ser a solução mais prática para

o meio em que será inserida, por razões de custo de fabrico ou por simplesmente ser de difícil construção, deverão sempre ser feitos compromissos durante o processo de dimensionamento de uma junta [7]. Posto isto, serão analisados os principais tipos de juntas utilizadas na indústria, que podem ser agrupados por tipo de construção:

- Juntas de topo;
- Juntas de sobreposição;
- Junta de reforço;
- Juntas cilíndricas.

Juntas de topo

De construção mais simples, a junta topo a topo representada na Figura 5 (a) não oferece, no entanto, grande eficácia devido à grande concentração de tensões de corte e arrancamento instaladas na interface da ligação. Outro ponto negativo é a incapacidade que esta junta tem em ser solicitada a flexão, uma vez que este carregamento induz tensões de clivagem. Em aderentes de maior espessura, é possível a utilização de juntas de chanfro interior (JCI) de forma uniformizar a distribuição de tensões geradas, ao longo da junta, conforme representado na Figura 5 (b) [14, 18].

Juntas de sobreposição

A junta de sobreposição simples (JSS), representada Figura 5 (c), é o tipo de junta mais comumente utilizada pois é a mais simples de fabricar e o adesivo é solicitado maioritariamente ao corte, que é o modo de carregamento ideal nos adesivos. No entanto, a carga aplicada não é colinear com ambos os substratos, o que provoca a flexão do conjunto e, conseqüentemente, a indução de forças de arrancamento. Este tipo de solicitação pode ser reduzida, ao tornar a área de colagem mais flexível, o que pode ser conseguido através da maquinagem de um chanfro na aresta exterior do substrato, o que cria assim uma junta de chanfro exterior (JCE), conforme representado na Figura 5 (e) [7, 18]. De forma a mitigar este problema, é possível dimensionar uma junta do tipo sobreposição dupla, conforme Figura 5 (d), que diminui consideravelmente o momento fletor gerado. No entanto, a sua construção é mais complexa e nem sempre a sua utilização é possível por constrangimentos de espaço [14, 18]. A junta de degrau, representada na Figura 5 (f), permite o alinhamento da carga com os substratos. No entanto, exige um processo de maquinagem mais complexo. Nem sempre é possível de dimensionar em substratos compósitos, pois pode danificar as fibras [14]. Por fim, a solução que oferece melhor compromisso entre processo de fabrico e desempenho é a junta de ressalto da Figura 5 (g). Esta junta permite o alinhamento dos substratos sem a necessidade de maquinagem. No

entanto, pode oferecer dificuldades acrescidas em substratos compósitos e de alta resistência [7, 14].

Juntas de reforço

A junta do tipo cobre-junta, representada na Figura 5 (h), é geralmente usada quando as juntas de sobreposição oferecem constrangimentos dimensionais. No entanto, este pode também sofrer de problemas de flexão do conjunto. Para combater este problema podem ser utilizadas as juntas do tipo cobre-junta dupla, representado na Figura 5 (i), sob prejuízo de ter uma construção mais complexa [18].

Juntas cilíndricas

A junta tubular da Figura 5 (j) é usada para a união de elementos cilíndricos que podem ser solicitados à torção, à tração ou ambos. Embora os substratos sejam de natureza tubular, o comportamento deste tipo de junta é similar às juntas de sobreposição. Em solicitações torsionais verifica-se a deformação diferencial do adesivo, quando submetidas a carregamentos axiais, a maior concentração de tensões é possível verificar-se nas extremidades da sobreposição da junta [19].

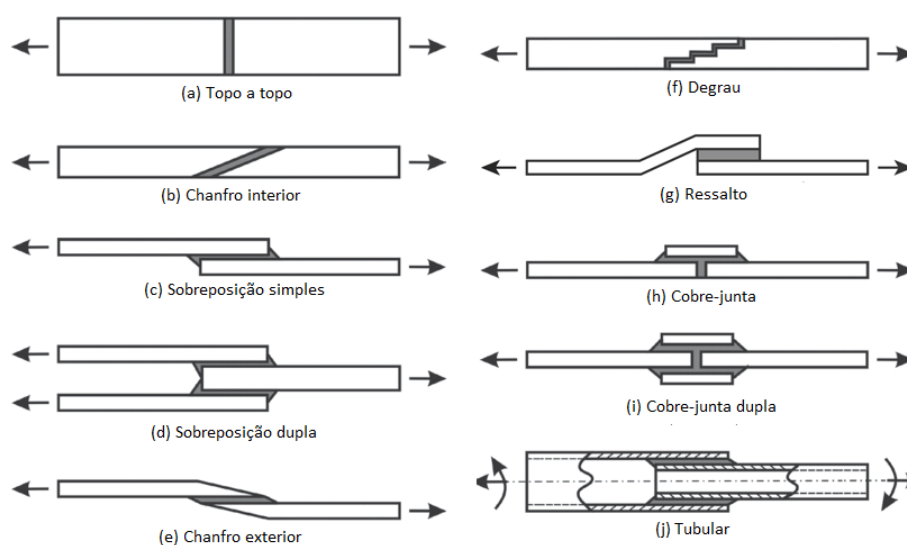


Figura 5 – Configurações possíveis de juntas adesivas (adaptado de [8])

2.1.6 Aplicações estruturais das ligações adesivas

Os adesivos estruturais são, de uma forma geral, definidos como o tipo de adesivo usado em aplicações sujeitas a elevadas solicitações de carga, onde existe a necessidade de ligações permanentes. Pode-se, portanto, dizer que os adesivos estruturais fazem parte da estrutura do conjunto onde se encontram inseridos, onde devem ser capazes de transmitir as tensões instaladas, sem perda de integridade, sob condições de serviço relativamente severas [20]. Objetivamente, a linha que define o

que é considerado adesivo estrutural ou não estrutural, é ténue, uma vez que esta não depende apenas das características mecânicas do adesivo, mas também, da sua aplicação. Academicamente, aceita-se que a resistência ao corte de uma ligação estrutural deverá ser superior a 6,9 MPa [14, 21]. A Tabela 1 condensa os tipos mais comuns de adesivos estruturais, características e respetivo campo de aplicação.

Tabela 1 – Síntese das características dos tipos mais comuns de adesivos estruturais (adaptado de [22]).

Tipo de adesivo	Características	Aplicação
Acrílicos	Adere a grande variedade de substratos	Construção
	Resistente à água	Têxteis
	Flexível*	Embalagens
	Boas propriedades a baixa temperatura	Automóvel
	Excelentes propriedades óticas	Eletrónica
	Baixa toxicidade	Mobiliário
Anaeróbicos	Cura a temperatura ambiente	Automóvel Eletrónica
	Quimicamente estável	
	Baixo contração	
	Não contém solventes	
Cianoacrilatos	Adesivo em excesso de fácil remoção	Embalagens Automóvel Eletrónica
	Adere a grande variedade de substratos	
	Adesivos de um componente	
	Cura a temperatura ambiente	
	Cura virtualmente instantânea	
Epóxidos	Adere a grande variedade de substratos	Construção
	Gama abrangente de propriedades mecânicas*	Eletrónica
	Gama abrangente de características de cura*	Mobiliário
	Baixa contração	Aeroespacial
Bismaleimidas	Resiste a altas temperaturas (200°C a 230°C)	Aeroespacial
	Excelentes propriedades elétricas	
	Não emite compostos voláteis durante a cura	
	Baixa resistência ao arrancamento	
Poliimidas	Resiste a altas temperaturas (até 300°C)	Aeroespacial
	Excelentes propriedades elétricas	
	Emite compostos voláteis durante a cura	
Fenólicos	Alta resistência mecânica	Construção
	Boa resistência a solventes e água	Madeira
	Alta estabilidade térmica	Aeroespacial
	Retardador de chama	
Poliuretanos	Adere a grande variedade de substratos	Construção
	Quimicamente estável	Embalagens
	Produce juntas com alguma flexibilidade	Automóvel
		Mobiliário

* varia conforme formulação

2.2 Previsão da resistência estática de juntas adesivas

Com o uso generalizado das ligações adesivas na indústria, muitas vezes em contextos estruturais, aumenta a necessidade de criar métodos de análise que sejam capazes de prever, com precisão, a capacidade de carga de uma ligação adesiva, de forma a auxiliar o seu correto dimensionamento. Estes métodos dividem-se em dois modelos de análise distintos: os modelos analíticos e os numéricos. Neste capítulo serão abordados os seguintes métodos de previsão [23]:

- Mecânica dos meios contínuos;
- Mecânica de fratura;
- Modelos de dano coesivo;
- Mecânica de dano;
- Método de elementos finitos estendido (MEFE);
- Outros métodos.

2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A previsão da resistência de uma junta adesiva pela técnica da mecânica de meios contínuos (MMC) é geralmente efetuada por um de dois métodos; através de modulação analítica ou numérica. Para este fim, utilizando um destes dois métodos, são estimadas as deformações e tensões instaladas na junta em estudo e, posteriormente, comparadas com os valores máximos admissíveis de cada um dos materiais que constituem a junta adesiva [24].

No entanto, ambos estes métodos podem apresentar imprecisões. A utilização de métodos analíticos implica a inclusão de pressupostos de forma a obter uma solução, uma vez que é difícil contabilizar as tensões induzidas por possíveis alterações geométricas dos substratos [25]. Por outro lado, a utilização de métodos numéricos, habitualmente métodos de EF, embora consigam contemplar carga arbitrária na junta, estão altamente dependentes do refinamento da malha criada, podendo necessitar elevados recursos computacionais e consequentemente um extenso tempo de processamento para a obtenção de resultados fiáveis [24].

2.2.1.1 Modelos analíticos

Os modelos analíticos de previsão de resistência de uma junta adesiva foram os primeiros passos a serem dados para a melhor compreensão de uma junta adesiva, do

ponto de vista teórico, sem recorrer a métodos destrutivos. Volkersen [26] e Goland e Reissner [27] foram os pioneiros a desenvolver modelos teóricos que, através da simplificação das geometrias, carregamentos e condições fronteira dos conjuntos em estudo, permitem obter o estado de deformação e tensão da junta de forma célere [28].

Estes métodos ajudavam a obter uma primeira aproximação sobre o que esperar de uma junta adesiva, no entanto revelavam-se falíveis, uma vez que eram apoiados em vários pressupostos simplificativos. Volkersen assumia no seu modelo que os aderentes se comportavam de forma unidimensional e o adesivo apenas era solicitado ao corte, enquanto o modelo de Goland e Reissner já admitia a existência de um momento fletor nas extremidades da junta [28]. Mais tarde, Hart-Smith [29] desenvolveu as teorias existentes de forma a fatorizar o comportamento plástico do adesivo [28].

2.2.1.2 Modelos numéricos

Com os avanços tecnológicos e o aumento da capacidade computacional, os métodos clássicos de previsão de resistência estão a ser substituídos pelos modelos numéricos de análise. A complexidade de uma junta está intimamente relacionada com o tipo de substrato usado, o tipo de deformação esperada do adesivo e até pelas suas alterações geométricas. Para conjuntos de grande complexidade, é comum obterem-se séries de equações não lineares de difícil resolução pelos métodos tradicionais. Seria então na década de 70, por Wooley e Carver [30], que as primeiras análises pelo método de EF a juntas adesivas de sobreposição simples se realizaram [25, 31].

Anos mais tarde, em 1974, seria uma análise de EF realizada por Adams e Peppiatt [32] uma das pioneiras a contemplar o efeito do filete no adesivo. Em 1984, Harris e Adams [25] efetuavam uma das mais complexas análises numéricas até à data, considerando em simultâneo alterações geométricas, rotação da junta e a plasticidade do adesivo e aderentes num só estudo [8, 31].

2.2.1.3 Critérios de resistência

São vários os critérios de resistência passíveis de utilização na previsão da resistência de juntas adesivas. Os critérios usados variam consoante o autor e consoante a finalidade da análise em questão. A Tabela 2 apresenta um resumo dos métodos analíticos, tanto lineares como não lineares, de análise a duas dimensões. Estes critérios de rotura são usados em contexto de MMC [33].

Tabela 2 – Critérios de rotura utilizados por autor (adaptado de [33]).

Autores	Critérios de rotura				
	$\tau > \tau_r$	$\sigma > \sigma_r$	$\gamma > \gamma_p$	GY	$\varepsilon_e > \varepsilon_r$
Volkersen [26]					
• Análise elástica	×				
Goland e Reissner [27]					
• Análise elástica	×	×			
Hart-Smith [29]					
• Análise linear	×	×			
• Análise não linear			×	×	
Bigwood e Crocombe [34, 35]					
• Análise linear	×	×			
• Análise não linear				×	×
Frostig et al. [36]					
• Análise linear	×	×			
Wang et al. [37]					
• Análise não linear				×	×
Adams e Mallick [38]					
• Análise linear	×	×			
• Análise não linear				×	×

2.2.2 Mecânica da fratura

Contrariamente ao que sucede na MMC, a mecânica de fratura parte do pressuposto que os constituintes de uma junta adesiva não são isentos de sofrerem de defeitos inerentes à sua utilização ou no decorrer do seu processo de fabrico. Este método permite analisar se a propagação da fratura ocorre a um ritmo controlado durante a vida útil da estrutura, ou se pode levar à sua rotura catastrófica, seja devido a cargas de impacto, fadiga, temperatura ou deformações dependentes do tempo [31]. Em 1959, Williams [39], através da análise de tensões singulares num entalhe, teorizou

que existe singularidade de tensão sempre que o ângulo de fenda é inferior a 180° , e que o mesmo acontece em materiais ligados com canto reentrante.

A grande maioria dos estudos realizados em juntas adesivas, como os levados a cabo por Fernlund e Spelt [40], assumem a utilização de valores de taxa de libertação de energia, G , e o seu valor de resistência à fratura, G_c , em detrimento de fatores de intensidade de tensão. A principal justificação para esta escolha reside na dificuldade de obtenção destes valores quando a fenda se propaga perto da interface. De um modo geral, a fratura de uma junta adesiva tende a ocorrer em modo misto, devido à diferença de propriedades tanto dos adesivos como dos aderentes que a compõem. Para este tipo de fratura, os critérios de rotura podem tomar uma forma semelhante aos critérios de rotura tradicionais, embora seja necessário a introdução do conceito de superfície de forma a lidar com uma combinação de carregamentos.

2.2.3 Modelos de dano coesivo

Uma vez que a mecânica de fratura foi desenvolvida para estudar apenas a propagação da fenda e não a sua formação, foi necessário o desenvolvimento de um novo método complementar para prever a iniciação e crescimento de uma fenda. O método de modelo de dano coesivo (MDC) começou a ser estudado por Barenblatt [41] e Dugdale [42], e implica a introdução do conceito de zona coesiva com a finalidade de descrever o dano infligido sob condições estáticas de carregamento, o que permite modelar o início e propagação de uma fenda. Este método é capaz de analisar a fenda tanto na interface de materiais como na delaminação de compósitos, e pode também ser implementado em elementos de mola [43].

Para se utilizar o MDC em contexto de análise por EF, é primeiramente necessário estabelecer leis coesivas com vista a modelar interfaces ou região finita que engloba o percurso da fenda. A Figura 6 resume as duas aproximações possíveis na utilização deste método, nomeadamente a aproximação local (a), segundo a qual, com base nas leis coesivas, os nós dos elementos sólidos são sobrepostos de forma a simular uma interface de espessura nula [44]; e a aproximação contínua (b), que considera uma linha de elementos coesivos de forma a simular uma camada fina de material entre os aderentes [45].

Em suma, o modelo de dano coesivo serve-se das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós dispostos na zona de fenda para analisar macroscopicamente o dano existente numa junta adesiva. A utilização deste modelo permite simular a perda de propriedades dos materiais em estudo, através da previsão da evolução da tensão em regime elástico e plástico até à rotura completa. De forma a obter uma previsão precisa do comportamento dos materiais, é comum aplicarem-se as leis de tração-separação nas diferentes fases de carregamento [46].

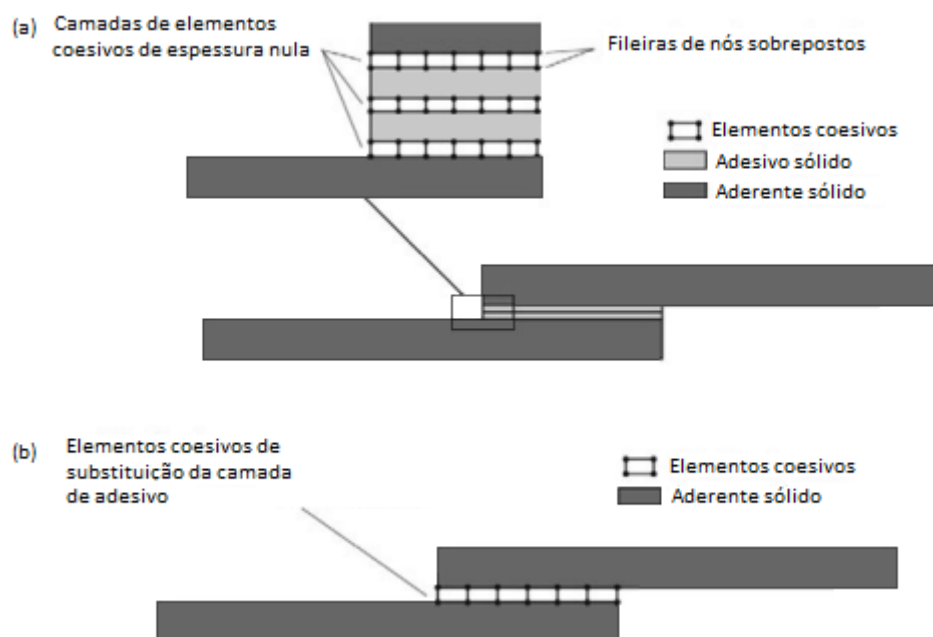


Figura 6 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura nula: aproximação local (a) e aproximação contínua (b)) (adaptado de [47])

2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresenta-se como uma alternativa ao MDC. Para este efeito, é estabelecido um parâmetro de dano, de forma a modificar o comportamento do material através da redução da sua resistência ou rigidez, o que permite a simulação gradual do dano infligido dentro de uma região finita [43]. A mecânica do dano é tendencialmente utilizada quando se desconhece o caminho de propagação de fenda, uma vez que esta informação é necessária para aplicar o modelo de dano coesivo [48].

Tendo como base estudos realizados por Voyiadjis e Kattan [49], é possível classificar estas variáveis de dano em duas categorias distintas. Na primeira categoria encontram-se as variáveis que induzem o dano na junta através da alteração das propriedades intrínsecas dos materiais, e que é independente do mecanismo de dano. A segunda categoria contém as variáveis que estão relacionadas com um particular tipo de dano, como por exemplo a presença de porosidades ou microfissuras superficiais [50]. Para análises estáticas [51], o crescimento do dano é extrapolado em função da carga aplicada, enquanto para análises à fadiga este obtém-se através do número de ciclos de carga [52, 53].

2.2.5 Método de Elementos Finitos Estendido

Com o intuito de modelar o crescimento do dano em juntas adesivas onde à priori não se conhece o percurso da fenda, foi desenvolvido o MEFE. Este método, que pode ser

considerado uma evolução do tradicional método de EF, difere do modelo de dano coesivo pois se baseia na resistência intrínseca dos materiais para a previsão da iniciação de dano e em deformações para propagação do dano. O facto de a fenda se poder propagar livremente no interior da junta traz como vantagem deixar de ser necessário refazer a malha na zona da fenda à medida que esta se propaga, tornando a análise mais expedita [54].

Os pioneiros neste método de previsão foram Belytschko e Black [55], que em 1999 apresentaram o conceito de partição de unidade. Quando aplicado ao método de EF, este conceito permite simular a separação das faces da fenda através de funções de enriquecimento local [56]. O MEFE faz uso de nós reais e virtuais de elementos sujeitos à fratura para simular a rotura de uma junta. Quanto à iniciação de dano, as suas principais causas podem depender, de um modo geral, das tensões principais máximas como das deformações principais máximas.

2.2.6 Outros métodos

De forma a colmatar algumas lacunas inerentes ao método de EF tradicional, tem-se desenvolvido nos últimos tempos, métodos de previsão que não recorrem ao uso de malha. Este tipo de análise é vantajosa em situações onde existem grandes deformações, o que pelos métodos tradicionais resultaria em constantes reajustes da malha. Os métodos de previsão sem malha já têm uma ampla aplicação nas mais variadas áreas da engenharia, no entanto, relativamente às ligações adesivas, ainda se encontra a dar os primeiros passos [57].

Para a aplicação deste método é necessário, primeiramente, definir o domínio sólido e o contorno do objeto a estudar baseado na sua geometria, e posteriormente estabelecer as condições naturais e essenciais limítrofes. Após este passo, faz-se a definição das condições fronteira com o auxílio de nós, os quais, ao contrário dos métodos tradicionais, não formam uma malha, pois apenas são definidos pela sua localização espacial [58].

Como acontece nos demais métodos de previsão de características, podem ser utilizados vários modelos, sendo os mais comuns:

- *Smoothed Particle Hydrodynamics* [59, 60];
- *Element-Free Galerkin* [61];
- *Reproducing Kernel Particle* [62, 63];
- *Radial Point Interpolation Method* [64];

- *Point Interpolation Method* [65];
- *Point Assembly Method* [66].

O fato de não ser necessário qualquer tipo de conhecimento prévio relativo à relação entre cada um dos nós, demonstra ser uma grande vantagem sobre problemas de mecânica de fratura e de dano, uma vez que deixa de ser necessário o reajuste constante da malha sempre que se verifica evolução de dano [67]. Um dos pontos negativos deste método pode ser a elevada capacidade de processamento computacional necessária para estudos complexos, no entanto, este é capaz de devolver resultados mais precisos do que o método de EF tradicional [68].

2.2.7 Estado-da-arte

Neste capítulo serão abordados os mais recentes desenvolvimentos na aplicação dos métodos de previsão de características anteriormente descritos. A Tabela 3 resume algumas das propostas mais relevantes da última década, tendo como base o MMC.

Tabela 3 – Síntese do estado-da-arte da previsão de resistência, baseado em análise MMC (adaptado de [23]).

Autor	Proposta
Ayatollahi e Akhavan-Safar [69]	Através da utilização do critério da Tensão Longitudinal Crítica (TLC) em conjunto com uma análise de EF elásticos lineares numa JSS, os autores sugerem que a fratura ocorre quando o parâmetro de falha ao longo do plano médio do adesivo atinge um valor crítico a uma distância crítica. Experimentalmente, observou-se que, aquando da utilização de adesivos frágeis, a sua resistência diminui com o aumento de t_A . No entanto, quando a relação L_0/t_A é reduzida, este método de previsão revelou-se pouco preciso.
Karachalios et al. [70, 71]	Com base nos campos de tensão facultado por uma análise de EF contínua, foram efetuados ensaios com substratos de aço rápido e aço com elevada ductilidade em JSS, deduzindo-se que no caso dos aços rápidos, quanto maior for L_0 , maior são as tensões de corte instaladas. No caso dos substratos dúcteis, a falha da junta ocorre devido a concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição. A elevada deformação do aderente confere um comportamento plástico à junta, provocando instabilidade e finalmente a sua falha. Confirmou-se a precisão dos resultados quando utilizados adesivos dúcteis, mas não para os adesivos frágeis.

Zhao et al. [72]	Zhao et al., baseando-se nos seus estudos sobre a influência do arredondamento das arestas dos substratos em JSS, propõe dois novos critérios. Para adesivos frágeis é assumida a média das tensões ao longo do comprimento da junta, enquanto nos adesivos mais dúcteis é considerada a média da energia plástica. Nos dois tipos de adesivos obtiveram-se resultados com um nível aceitável de precisão.
Campilho et al. [73]	Numa tentativa de minorar os esforços de clivagem e arrancamento, os autores propõem um tipo de JSS modificada, que consiste na utilização de substratos dobrados na sua zona da junta, obtendo uma melhoria de desempenho na junta com adesivos frágeis. Através dos critérios de von Mises e de tensão de corte máxima foi possível obter um nível de precisão aceitável na previsão de resistência.

Seguidamente são sintetizadas na Tabela 4 as propostas referentes à análise por mecânica de fratura.

Tabela 4 – Síntese do estado-da-arte da previsão de resistência, baseado na análise pela mecânica de fratura (adaptado de [23]).

Autor	Proposta
Chen et al. [74]	Chen et al., tendo como base um critério de tensão energética específica, propuseram um método capaz de prever a iniciação e propagação de fratura em JSS com tanto para adesivos frágeis como dúcteis. O critério de falha é aplicado localmente, na chamada zona de processamento. Uma vez atingida a condição de falha, o material falhará dentro da zona de processo, de tal forma que este já não é capaz de transferir qualquer carga. São usados aderentes de alumínio e aço e filetes no adesivo. Foi concluído que juntas com adesivos frágeis são mais resistentes se usados aderentes rígidos. No caso de adesivos dúcteis, o desempenho da junta aumenta com a utilização de aderentes com alto valor de tensão de cedência. A previsão de modo de falha e propagação de fratura encontram-se em concordância com os resultados obtidos experimentalmente.
Afendi et al. [75]	Os autores estudaram a influência da utilização de diferentes ângulos de chanfro (45°, 60° e 75°) na resistência das JCI. Neste estudo foram utilizadas juntas com aderentes de aço inoxidável e alumínio ligado e também diferentes t_A . Após avaliar a singularidade de tensões na interface através do critério de dureza de canto, foi concluído que esta apenas é influenciada pela variação do ângulo de chanfro. Obtiveram-se resultados mais precisos para as juntas com adesivos frágeis.

Leguillon [76]	Leguillon, com a proposta do critério de Mecânica de Fratura Finita, lançou a base para o desenvolvimento de vários estudos sobre a previsão de iniciação de fratura sem que esta esteja previamente presente na junta. Para a fratura acontecer é necessário que tanto o critério energético como o critério de tensão se verifiquem. No critério energético, assume-se o estado inicial de uma estrutura carregada como sendo elasto-estático. De seguida, é comparada a variação de energias cinética e potencial entre o estado inicial e após o aparecimento de fratura. Por sua vez o critério de resistência verifica-se quando são comparadas as tensões instaladas na junta com o seu valor de tensão crítica. Para JSS de adesivos frágeis concluiu-se que a resistência de junta aumenta com a diminuição de t_A e diminui com o aumento de L_0 [77, 78]. Mais tarde, foi possível prever a resistência de juntas de sobreposição dupla (JSD) e juntas topo a topo (JTT) também com um nível de precisão aceitável [79].
----------------	---

Visto que o MDC será o método de previsão usado na fase experimental do presente trabalho académico, é possível consultar na Tabela 5 uma compilação mais aprofundada das inovações atuais acerca deste método.

Tabela 5 – Síntese do estado-da-arte da previsão de resistência, baseado na análise de MDC (adaptado de [23]).

Autor	Proposta
O'Mahoney et al. [80]	Baseando-se num modelo de EF em que foi usado um modelo de dano coesivo para representar a interface adesivo-compósito e um MDC para a camada de adesivo, foi estudada a influência das forças de adesão na interface e a resistência do próprio adesivo no desempenho de uma JSS. Tendo como base a aproximação local, concluiu-se que os fatores que mais influenciam a resistência de uma junta são a energia interfacial de fratura e as propriedades mecânicas do adesivo.
Geleta et al. [81]	Os autores analisam o efeito que possíveis defeitos de fabrico poderão ter na resistência de um tipo de JSS modificada com aderentes compósitos em plano inclinado. Foram realizados testes de tração a duas inclinações (45° e 90°) e comparados com modelação de EF, cuja iniciação e propagação de fratura foram simulados com base em MDC descrito pela lei de tração-separação bilinear. Os resultados numéricos revelaram-se consistentes com os ensaios experimentais.

Anyfantis e Tsouvalis [82]	Um novo modelo coesivo é proposto pelos autores baseado no MDC, cuja fase crescente do carregamento é descrita por uma função exponencial seguida de um amaciamento linear, assim que o dano se inicia. A previsão de iniciação de dano é conseguida através do critério de tensão nominal quadrática, enquanto a propagação de dano é extrapolada pelo critério energético linear. Obteve-se grande precisão de resultados nas JSS e JSD com aderentes em aço.
Li et al. [83]	Li e seus pares efetuaram um estudo sobre JCI de aderentes compósitos, tendo para isso usado um modelo de EF baseado em MDC. Após a validação com sucesso dos resultados experimentais e numéricos, foi possível concluir que um aumento do ângulo de chanfro beneficia a resistência da junta, embora seja visível uma pequena redução da resistência da junta com o aumento de t_A .
Banea et al. [84]	Novamente baseado em MDC integrado em análise EF, os autores consideram comportamento elástico linear inicial seguido de uma evolução linear de dano para análise de JSS de substratos dissimilares. Concluiu-se que, para JSS com L_0 reduzido, a geometria e/ou material dos aderentes pouco influencia a resistência da junta. Por outro lado, para valores de L_0 superiores, a junta beneficia em usar aderentes de geometria similar, pois verifica-se uma maior uniformização do campo de tensões induzido. Para adesivos dúcteis verificou-se uma subvalorização dos resultados numéricos relativamente aos experimentais.
Avgoulas e Sutcliffe [85]	Incidindo ainda nas juntas de substratos dissimilares, de forma a criar um gradiente de rigidez, os autores uniram aderentes compósitos a aderentes em aço perfurado, por meio de junta macho-fêmea (<i>tongue-and-groove</i>). Análises numéricas foram capazes de prever com sucesso um aumento de 175% na resistência global da junta. A camada adesiva foi modulada tendo como formulação de degradação uma zona coesiva triangular, quanto à iniciação de dano, esta foi baseada no critério da tensão nominal quadrática.

Na Tabela 6 são abordados estudos recentes relevantes relativos à mecânica de dano.

Tabela 6 – Síntese do estado-da-arte da previsão de características, baseado na análise pela mecânica do dano (adaptado de [23]).

Autor	Proposta
Chousal e de Moura [86]	Os autores propuseram um novo modelo de dano baseado em elementos contínuos com o objetivo de simular a iniciação e propagação do dano. O dano inicia-se quando a resistência limite local é atingida e a sua propagação é ditada pela sua respetiva energia de fratura. Este modelo é capaz de simular a degradação gradual da junta durante o seu carregamento até à falha. Testes <i>Double-cantilever beam</i> (DCB) e <i>End-notched flexure</i> (ENF) validaram a previsão analítica do percurso de fenda e da zona de processamento de fratura.
Belnoue et al. [87, 88]	Um novo modelo apelidado de modelo de difusão de fenda é criado com base no critério de Drucker-Prager para simular a plasticidade e leis de amaciamento lineares para simular dano. Através de testes ENF, foi possível validar a zona de processamento de fratura em relação ao valor de t_A da junta. Com este novo modelo de dano proposto, foram também estudadas JSD com aderentes metálicos e compósitos, tendo-se obtido resultados precisos. Este critério foi também capaz de prever dano adesivo e coesivo em simultâneo.
Zhang et al. [89]	Neste trabalho, através da adaptação de um modelo de dano contínuo baseado na evolução exponencial de dano de acordo com o critério de Benzeggagh-Kenane, foi possível simular diferentes percursos de propagação de fratura e assim determina a zona de processamento de fratura. Ensaios em JSS com aderentes metálicos e compósitos revelaram-se fiéis aos resultados numéricos.

Na Tabela 7 podem ser consultados trabalhos relevantes de investigação acerca do método de previsão numérico mais recente dos cinco anteriormente abordados, o MEFE.

Tabela 7 – Síntese do estado-da-arte da previsão de características, baseado na análise pelo MEFE (adaptado de [23]).

Autor	Proposta
Campilho et al. [90]	Num dos primeiros estudos sobre MEFE, os autores pretenderam avaliar a viabilidade deste método na previsão do comportamento da fratura de uma fina camada de adesivo em aderentes de aço de ferramenta e compósitos. Para esse fim, foram utilizadas leis de dano baseadas em valores de G_{IC} obtidos por ensaio de tração a provete DCB. Este estudo revelou-se preciso para adesivos frágeis, tendo subestimado a resistência da junta no caso de um adesivo dúctil.

Machado et al. [91]	Com o mesmo objetivo do estudo anterior, foi desta vez objeto de análise MEFE juntas em degrau com variação de L_0 . Para a análise de tensão, a camada adesiva foi modulada através de elementos contínuos com propriedades elásticas, enquanto na análise de resistência, foi usada uma formulação enriquecida de MEFE. Foi então possível concluir que as juntas de degrau têm um desempenho superior às JSS, mas inferior às JSD. Este estudo concluiu também que a resistência da junta aumenta com o aumento de L_0 , independentemente o tipo de junta. As margens de erro deste estudo foram inferiores a 10%.
Mubashar et al. [92]	Os autores propõem uma abordagem híbrida para análise de JSS com aderentes de alumínio e filetes no adesivo. Neste tipo de abordagem são usadas MDC para modelação da interface e o MEFE para o remanescente da junta. Concluiu-se que este método é eficaz a prever a iniciação e propagação de fratura sem que seja pré-definido o seu percurso. No entanto, existe a possibilidade de este tipo de análise devolver uma descontinuidade na fenda aquando da mudança do domínio MDC para o MEFE.

2.3 Alterações geométricas em ligações adesivas

A principal vantagem da utilização de uma junta adesiva, ao invés dos meios mais tradicionais de ligação, é a sua capacidade em promover uma distribuição de tensões mais uniforme na ligação. Contudo, conforme já referido anteriormente, juntas sujeitas a esforços de clivagem e arrancamento tendem a falhar de forma prematura devido ao aparecimento de elevadas concentrações de tensão em zonas pontuais da junta.

Neste capítulo, são abordados os métodos utilizados para aumentar o desempenho da junta solicitada em condições adversas, tanto a nível da alteração geométrica do substrato como da própria junta.

2.3.1 Filetes de adesivo

De uma forma geral, um filete numa junta adesiva consiste na utilização de adesivo adicional nas das extremidades da ligação. Desde cedo, vários autores comprovaram que a adição desta modificação ao adesivo permite reduzir as concentrações de tensões tanto no adesivo como no aderente. Adams e Peppiatt [32] concluíram que um filete triangular a 45° é capaz de reduzir em 40% as tensões principais máximas de uma junta. Na Figura 7 é possível ver um esquema comparativo da transmissão de esforços numa junta com e sem filete no adesivo.

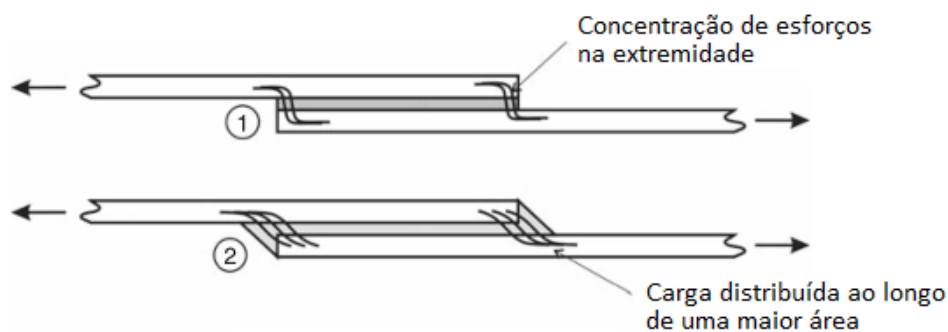


Figura 7 – Comparativo entre junta com filete e junta sem filete (adaptado de [18])

Quando comparada com os restantes tipos de alterações geométricas, esta é talvez a que revela ter melhor relação entre complexidade de conceção e efeito desejado, enquanto confere uma melhor apresentação estética à junta em questão. Contudo, a inclusão de um filete nem sempre é benéfica, pois juntas com este tipo de alteração têm geralmente um comportamento a altas temperaturas inferior às juntas com extremidade quadrada, conforme concluíram da Silva e Adams [93].

2.3.2 Chanfros dos aderentes

A inclusão de chanfros nos aderentes tem como principal objetivo uniformizar a distribuição de tensões ao longo da junta. Esta alteração geométrica detém um maior nível de complexidade, quando comparada com a anteriormente estudada, pois implica retrabalho no caso de aderentes metálicos ou, no caso de aderentes compósitos, um maior cuidado na sua conceção, pois o chanfro deverá ser criado durante o empilhamento das camadas de material compósito [8].

O biselamento das arestas dos substratos nas extremidades da junta permite uma diminuição gradual da espessura do substrato, o que lhe confere uma maior flexibilidade. Consequentemente este é capaz de fletir em carga e melhor distribuir as tensões instaladas pela área de colagem [7].

Relativamente à implementação deste tipo de alteração geométrica, as juntas mais comuns são as JCI e as JCE. As JCI revelam ter um desempenho ligeiramente superior às JTT devido ao aumento da área de colagem que o chanfro induz, contudo, este tipo de junta continua a revelar-se ineficaz quando solicitada à flexão. Por sua vez, nas JCE, o aumento de desempenho é significativo quando comparadas às JSS, conforme pode ser observado na Figura 8.

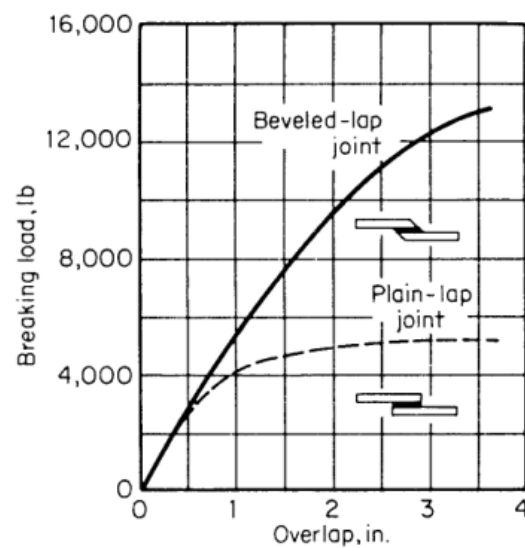


Figura 8 – Comparativo entre JCE e JSS [7]

2.3.3 Entalhes nos aderentes

A técnica de entalhar os aderentes em contexto de melhoria de desempenho de junta consiste na redução da espessura do aderente em zonas específicas, geralmente imediatamente após a área de colagem, com o intuito de reduzir as tensões instaladas nas imediações da aresta do adesivo. Outra vantagem desta redução de secção pode ser verificada através do aumento da deformação plástica do aderente, o que provoca a alteração do comportamento da junta quando solicitada axialmente. Esta deformação plástica pode ser uma fonte adicional de dissipação de energia e consequentemente melhorará as distribuições de tensão de corte e arrancamento [94].

Em 2019, Bahrami et al. [95], através de análise EF linear elástica, estudaram a influencia dos entalhes na distribuição de tensão na camada adesiva das JSS. Foram considerados parâmetros como o ângulo, largura e profundidade do entalhe, bem como a sua distância ao comprimento de sobreposição, a fim de otimizar os parâmetros geométricos da junta. Foi possível concluir que um entalhe de $\alpha=90^\circ$ aliado a uma relação de entalhe r de 20% é capaz de melhorar o desempenho de uma JSS em 55%. Na Figura 9 é possível observar os parâmetros geométricos da JSS considerados neste estudo.

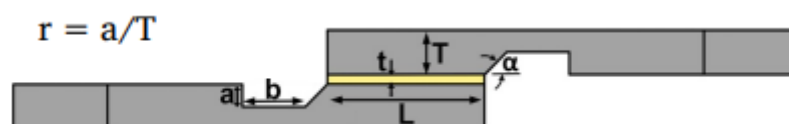


Figura 9 – Parâmetros geométricos de uma JSS com entalhe (adaptado de [95])

2.3.4 Outras alterações

No presente subcapítulo serão abordados outros tipos de alterações geométricas menos generalizadas propostas em diversos trabalhos científicos.

Zhao et al. [96] estudaram o efeito do arredondamento das arestas dos substratos na resistência global da JSS. Para esse fim, foram considerados substratos de alumínio com diferentes raios e adesivos de características dúctil e frágil. A Figura 10 apresenta as geometrias consideradas neste estudo. Foi possível concluir que as juntas de adesivo frágil e raio elevado apresentaram um aumento de resistência de 40% quando comparadas com juntas de substratos com aresta viva. Contudo, nas juntas de adesivo dúctil verificou-se o oposto – as juntas de substratos com aresta viva demonstraram ser as mais resistentes das duas.

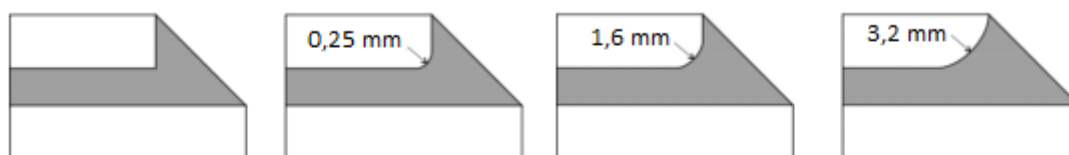


Figura 10 – Raios considerados no estudo de Zhao et al. (adaptado de [96])

Num estudo de 2013, Haghpanah et al. [97] analisaram o efeito de uma geometria de junta irregular. A Figura 11 apresenta o tipo de geometria utilizada neste estudo. Este tipo de junta é caracterizado pela sua interface simétrica, em ziguezague, cujo relevo dos substratos gera um efeito de encravamento. Seguidamente, os provetes em aço são solicitados à tração e comparados com uma JSS convencional. Os autores concluíram que, a nível da resistência global da junta, não existiram diferenças significativas, embora se tenha verificado um aumento do alongamento inelástico total na zona do substrato de menor espessura. Os autores acreditam que este efeito se deva à deformação do substrato, provocado pela redução de área de secção, efeito esse que poderia idealmente ser replicado em juntas de geometria mais simples dotadas de substratos entalhados.

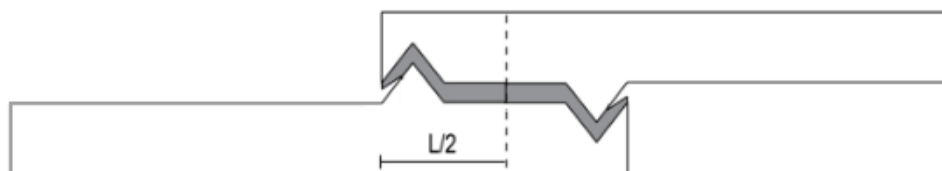


Figura 11 – Geometria estudada por Haghpanah et al. (adaptado de [97])

Baseando-se em juntas de interface não plana, Razavi et al. [98] compararam a resistência de juntas de sobreposição de substratos curvos com JSS convencional (Figura 12). Para esse fim foram maquinados substratos de alumínio de perfil sinusoidal com diferentes comprimentos de onda e amplitudes, e ligados por um

adesivo epóxico. Após ensaios de tração a todos os provetes, os autores concluíram que, para o caso mais favorável da junta sinusoidal de declive negativo, foi possível verificar-se um aumento de resistência na ordem dos 50% em comparação com a JSS. Este resultado pode ser explicado devido ao fato de, neste tipo de geometria, ambas as extremidades da área de colagem estarem sujeitas a solicitações de compressão, situação favorável numa junta adesiva. As juntas de declive positivo revelaram-se menos resistentes do que as JSS.

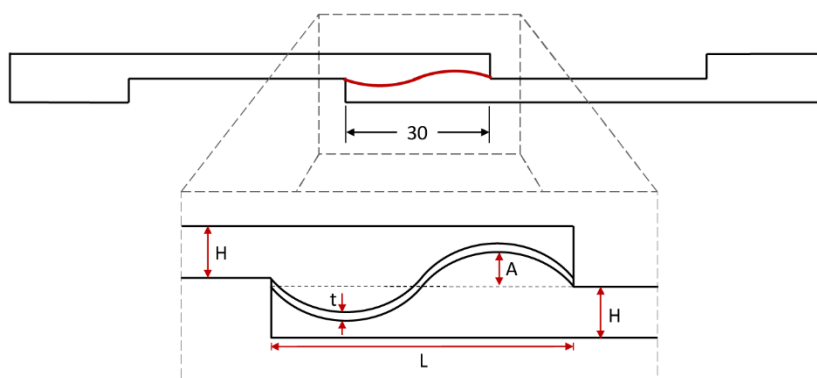


Figura 12 – Detalhe da junta de sobreposição sinusoidal (adaptado de [98])

2.3.5 Utilização de degraus

2.3.5.1 Conceito e vantagens da técnica

As juntas de degrau consistem na inclusão de um número finito de degraus na zona do substrato onde se dá a colagem. Este processo tem o intuito de distribuir as tensões instaladas pelas arestas de cada um desses degraus, em detrimento de as concentrar apenas nas bordas da área de colagem. Outra vantagem deste tipo de junta é o facto de a sua geometria permitir que exista colinearidade entre os substratos, o que reduz a excentricidade dos esforços aplicados e consequentemente reduz também as tensões de arrancamento na junta [99]. Por outro lado, uma desvantagem das juntas em degrau é o seu complexo processo de fabrico. No caso da utilização de substratos metálicos existe a necessidade de uma operação de maquinaria para a realização do degrau, enquanto nos substratos compósitos é comum a realização do degrau durante o seu empilhamento de forma a evitar a delaminação das fibras [7].

2.3.5.2 Distribuição de tensões

A fim de melhor compreender a distribuição de tensões nas juntas de degrau, é neste capítulo efetuada a comparação entre este tipo de junta e a junta que maior prevalência detém na indústria – a JSS.

No trabalho de Silva et al. [99] foi utilizada a análise EF para efetuar o comparativo entre JSS e juntas de degrau com aderentes de alumínio e adesivo dúctil. Nas duas juntas foi considerado $L_0=12,5$ mm.

Na Figura 13 a) é possível constatar que é a JSS a sofrer o maior pico de tensões σ_y , uma vez que apresenta valores de σ_y cerca de 4 vezes superiores aos da junta de degrau. Este fato deve-se ao momento torsor que o desalinhamento dos substratos inflige na junta, o que promove o arrancamento nas extremidades da área de colagem e esforços de compressão na restante região. Embora não tão perceptível como no gráfico adjacente, é também possível observar o efeito dos degraus na distribuição de tensão.

Por sua vez, a Figura 13 b) demonstra novamente que a JSS é a mais desfavorável das duas no que à distribuição τ_{xy} diz respeito. Neste gráfico são facilmente visíveis as fronteiras de cada um dos degraus da junta, pois a redução da espessura nas extremidades dos substratos permite uma distribuição mais eficiente do carregamento entre cada um dos degraus. O pico de τ_{xy} revelou ser 39,3% superior na JSS quando comparado com a junta de degrau.

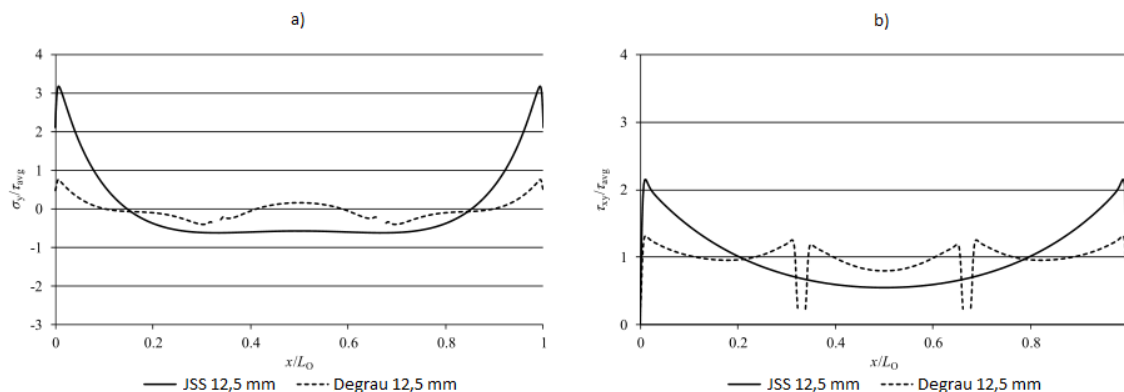


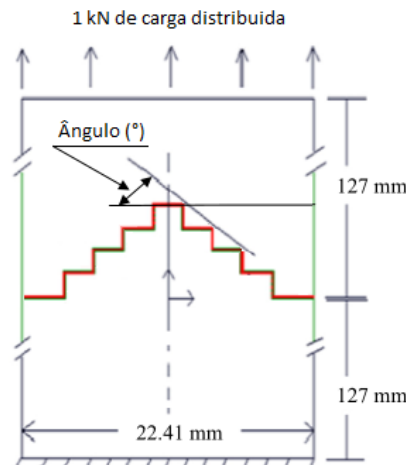
Figura 13 – σ_y (a) e τ_{xy} (b) presentes em JSS e juntas de degrau (adaptado de [99])

2.3.5.3 Geometrias comumente utilizadas

Considerando apenas as juntas de degrau, as geometrias mais comuns são sem dúvida as de um a três degraus, pois a quantidade de degraus possível de maquinar ou laminar num substrato está intimamente ligada à sua espessura. No entanto, com a necessidade de inovar, alguns autores propuseram soluções alternativas para a modificação da junta de degrau comum para geometrias menos convencionais.

Apresenta-se como exemplo o estudo de Sancaktar e Karmarkar [100], que considera uma geometria de múltiplo degrau duplo com substratos de elevada espessura. Os autores analisaram depois o efeito da variação de declive do degrau na resistência da junta. Na Figura 14 encontra-se o detalhe do tipo de junta mencionada. Os autores

concluíram que os valores de tensão instalada diminuem com o aumento do valor do



ângulo do degrau.

Figura 14 – Geometria da junta de múltiplo degrau duplo (adaptado de [100])

Num recente estudo de 2020, Bayramoglu et al. [101] propuseram uma junta de degrau interno com a geometria esquematizada na Figura 15. Foram considerados substratos de alumínio unidos por meio de adesivo estrutural epóxico de dois componentes. A geometria proposta foi comparada à tração com JSS convencionais. Os autores concluíram que no provete com um comprimento de degrau interno (L) de 9 mm foi possível obter um ganho na resistência global da junta de 60%.

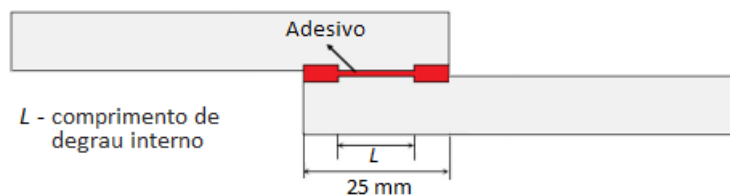


Figura 15 – Geometria da junta de degrau interno (adaptado de [101])

Com o intuito de melhor compreender o comportamento complexo de superfícies compósitas sujeitas a reparação, Li et al. [102] estudaram analiticamente a utilização de insertos em degrau, comumente utilizados em reparações na indústria aeronáutica, onde tipo de reparação tem a vantagem de ser estruturalmente eficiente, de baixo custo e de fácil implementação, e devolver um acabamento nivelado com o restante painel. Neste estudo foi utilizada uma análise tridimensional de EF semi-analítica, baseada num método de previsão sem malha. Na Figura 16 é possível consultar a geometria utilizada neste tipo de reparação.

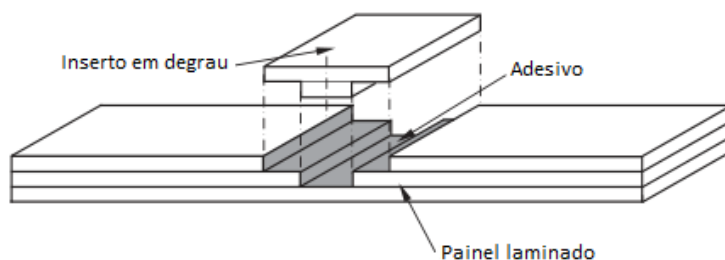


Figura 16 – Geometria considerada na reparação de painéis compósitos (adaptado de [102])

2.3.5.4 Estado-da-arte

No presente subcapítulo serão abordados os mais recentes desenvolvimentos relativos à utilização de degraus em juntas adesivas. Na Tabela 8 é possível consultar uma seleção de 7 trabalhos acadêmicos relevantes sobre o tema.

Tabela 8 – Tabela resumo do estado-da-arte da utilização de degraus em juntas adesivas.

Autor	Proposta
Sawa et al. [103]	Sawa et al. pretenderam estudar a distribuição de tensões em juntas de degrau com substratos dissimilares sujeitos à flexão. Neste estudo foram considerados substratos de alumínio e aço, aliados a um adesivo epóxico estrutural. Os resultados laboratoriais foram sustentados numericamente por modelação tridimensional de EF em regime elasto-plástico com sucesso. Foi concluído que existem concentrações de tensões na aresta da interface do substrato com maior E . Por sua vez, a diminuição da relação dos módulos de elasticidade dos dois aderentes, assim como de t_A , provoca a diminuição da tensão máxima, tal como o aumento do número de degraus. Juntas de substratos dissimilares apresentaram menor resistência do que juntas de substratos similares.
Kimiaefar et al. [104]	No presente estudo os autores propõem uma abordagem inovadora para a avaliação da fiabilidade e probabilidade de falha de juntas de degrau com substratos em compósito. O estudo é exclusivamente numérico e combina análise EF com uma distribuição de probabilidade assintótica, de forma a estimar a probabilidade de falha. Posteriormente os resultados estimados são comparados com valores obtidos através da metodologia de Monte Carlo, o que prova que este método poderá ser aplicado na calibração de fatores de segurança parciais na conceção de juntas adesivas.
Sancaktar et al. [100]	Com o auxílio de uma análise de EF, o presente estudo pretende comparar a influência que os defeitos de delaminação do adesivo e cobertura insuficiente infligem na resistência interfacial de uma junta com substratos de alumínio. Para o efeito foram comparadas

	juntas de degrau interior duplo sem defeito e com os defeitos acima descritos. Foi concluído que a tensão normal é a solicitação crítica deste tipo de junta e que a resistência da junta é influenciada não só pelo tamanho da falha do adesivo, mas também pela sua localização em L_0. A comparação entre os dois tipos de defeito permitiu constatar que as juntas sujeitas a delaminação do adesivo apresentaram maior resistência do que as juntas com cobertura insuficiente de adesivo. No entanto, não foi possível replicar este resultado na análise de EF.
Silva et al. [99]	Baseando-se numa análise MDC aliada ao método EF, Silva et al. estudam o comportamento de JSS e juntas de degrau à tração. Foram considerados substratos de alumínio e um adesivo dúctil para diferentes L_0. Embora análises preliminares tenham revelado picos de tensão superiores nas JSS, para L_0 reduzidos ambos os tipos de junta devolveram valores similares de resistência. Com o aumento de L_0 (50 mm) o adesivo perde a sua capacidade de absorção destes picos de tensão, o que resulta num ganho de resistência favorável às juntas de degrau de 13%. O método de análise numérica revelou resultados similares aos obtidos experimentalmente.
Bayramoglu et al. [101]	Os autores pretenderam comparar o comportamento de uma JSS com juntas de degrau interno de variadas dimensões, constituídas por substratos de alumínio e um adesivo epóxico estrutural dúctil. Na sua configuração ideal, foi constatado que a junta de degrau interior obteve um incremento de resistência de 60% em relação à JSS. Concluiu-se também que a força de tração máxima ocorre nas extremidades de L_0, enquanto no início do degrau interno o adesivo é solicitado à compressão. Os valores obtidos numericamente demonstraram-se coincidentes com os experimentais.
Durmuş et al. [105]	Os autores compararam o comportamento de uma JSS com juntas de degrau de variadas geometrias, solicitando-as para isso à tração. As juntas foram fabricadas com substratos de alumínio e um adesivo dúctil. Foram consideradas juntas com diferentes comprimentos de degrau. No entanto, L_0 manteve-se constante independentemente do tipo de junta. Foi possível concluir que a junta de um degrau é 9,5% mais resistente em relação à JSS. O comprimento do primeiro degrau é de fulcral importância na integridade da junta, aparentando ter como valor ideal 8 mm, uma vez que esta configuração demonstrou ser 95% mais resistente do que a JSS. A análise por MDC reproduziu com exatidão os valores experimentais.
Brito et al. [106]	O principal objetivo dos autores concentra-se na realização de um estudo comparativo entre dados obtidos numericamente e experimentalmente da influência de L_0 sobre a resistência de uma junta adesiva dúctil. Para esse fim, foi utilizado o MDC triangular

aliado a análise de EF com o intuito de estudar juntas de degrau com substratos de polímero reforçado com fibra de carbono. Os autores concluíram que existe linearidade entre o aumento de L_0 e a resistência da junta. Contudo, este aumento poderá precipitar a delaminação dos substratos. Quando comparadas com JSS, as juntas de degrau permitem uma diminuição das tensões instaladas ao longo de L_0 . Foi possível obter uma relação satisfatória entre os resultados experimentais e numéricos, todavia, a utilização de MDC de formulação trapezoidal traria uma maior precisão de resultados.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Neste capítulo será descrito todo o procedimento experimental, desde a concepção dos provetes à discussão de resultados obtidos. No subcapítulo 3.1.1 é abordada a geometria da junta em estudo e é aprofundada a temática do conceito *dual adhesive*. No ponto 3.1.2 são caracterizados os materiais que compõem a junta adesiva. De seguida, no subcapítulo 3.1.3, é detalhado o processo de preparação dos aderentes, seguido do fabrico das juntas e finalmente o ensaio destas. O subcapítulo 3.1.4 lista e discute os resultados obtidos.

3.1.1 Geometria da junta e conceito *dual adhesive*

O tipo de junta adesiva considerada no presente estudo é a junta de degrau, cujo conceito foi previamente abordado no subcapítulo 2.3.5.1. Na Figura 17 é possível consultar o esquema dimensional dos provetes utilizados.

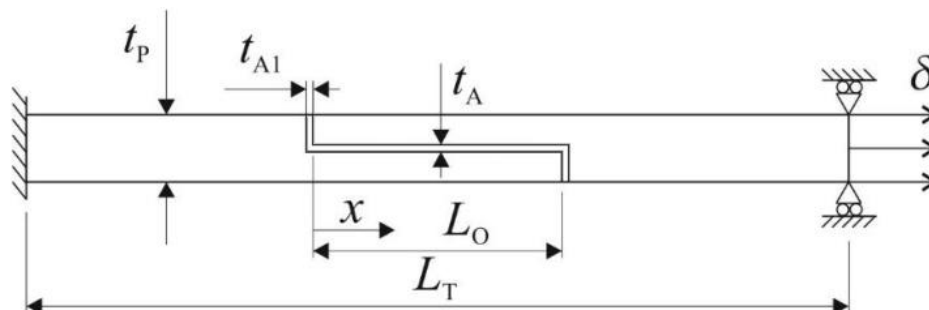


Figura 17 – Geometria considerada na concepção da junta em degrau.

Na Tabela 9 é feita a síntese dos parâmetros geométricos considerados na concepção da junta adesiva em degrau. A junta em estudo, como já referido, tem a geometria de degrau. Em conjunto com esta geometria é também estudado o conceito de junta de dois adesivos (*dual adhesive*). Este conceito consiste na utilização de dois adesivos na mesma junta com o intuito de reduzir as suas concentrações de tensão, uma vez que o adesivo de característica mais dúctil é geralmente aplicado nas extremidades de L_O [107]. No presente trabalho foram considerados 3 proporções de adesivos distintas, cada uma afeta a $4 L_O$.

Tabela 9 – Valores considerados na geometria da junta em degrau.

Parâmetro	Valor [mm]
Espessura do aderente (t_p)	3
Espessura de adesivo longitudinal ao carregamento (t_A)	0,2
Espessura de adesivo transversal ao carregamento (t_{A1})	0,2
Comprimento de sobreposição (L_0)	12,5 25 37,5 50
Comprimento total do provete (L_T)	180

A Figura 18 aliada à Tabela 10 esquematizam e resumem as dimensões consideradas para cada uma das 3 proporções de adesivo em estudo.

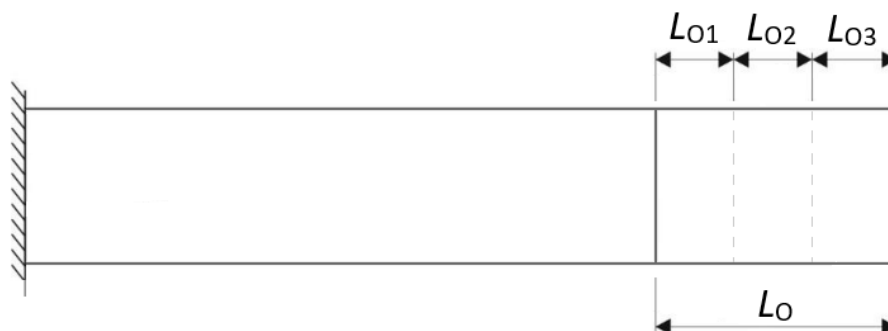


Figura 18 – Geometria considerada na área de ligação da junta.

Tabela 10 – Valores considerados na geometria da área de ligação da junta por proporção.

L_0 [mm]	Proporção								
	12,5%-75%-12,5%			25%-50%-25%			33%-34%-33%		
	L_{01}	L_{02}	L_{03}	L_{01}	L_{02}	L_{03}	L_{01}	L_{02}	L_{03}
	[mm]			[mm]			[mm]		
12,5	1,6	9,4	1,6	3,1	6,3	3,1	4,1	4,3	4,1
25	3,1	18,8	3,1	6,3	12,5	6,3	8,3	8,5	8,3
37,5	4,7	28,1	4,7	9,4	18,8	9,4	12,4	12,8	12,4
50	6,3	37,5	6,3	12,5	25,0	12,5	16,5	17,0	16,5

Uma vez que o elevado número de configurações de junta não permite o ensaio integral de todos os provetes, foram escolhidas as juntas simples de adesivo Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 e as juntas *dual adhesive* Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752 e Sikaforce® 7752-Araldite® AV138-Sikaforce® 7752 na proporção 25%-50%-25%. Estas configurações foram escolhidas após a análise dos resultados experimentais como sendo aquelas mais relevantes para o objetivo do aumento da resistência.

3.1.2 Materiais

Neste subcapítulo serão apresentados os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, assim como a liga de alumínio AW 6082-T651, materiais utilizados no fabrico das juntas em que o presente trabalho experimental se baseia.

3.1.2.1 Aderentes

O material de ambos os aderentes é a liga de alumínio estrutural AW 6082-T651. Esta liga da série 6000 é caracterizada pela sua excelente capacidade de extrusão e alta resistência à corrosão enquanto denota boas características de maquinagem [108]. Os seus principais elementos de liga são o magnésio e o silício. Na Tabela 11 é possível consultar a composição química desta liga.

Tabela 11 – Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [109].

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
Mín. (%)	0,70	0,60	0,40	0	0	0	0	0	Restante
Máx. (%)	1,30	1,20	1,00	0,50	0,25	0,20	0,10	0,05	Restante

Na Tabela 12 comparam-se as propriedades mecânicas da liga AW 6082-T651 facultadas pelo fabricante [109] e as propriedades obtidas através da caracterização experimental realizada por Campilho et al [73], segundo a norma ASTM-E8M-04 [110] (σ_e e σ_f representam a tensão de cedência e rotura à tração, respetivamente).

Tabela 12 – Comparativo entre as propriedades mecânicas facultadas pelo fabricante e obtidas experimentalmente.

	t [mm]	σ_f [MPa]	σ_e [MPa]	E [GPa]
Fabricante [109]	3	300	255	70
Campilho et al. [73]	3	$324 \pm 0,16$	$261,67 \pm 7,65$	$70,07 \pm 0,83$

A Figura 19 demonstra as curvas σ - ϵ referentes à liga de alumínio AW 6082-T651 e respectiva aproximação numérica [108].

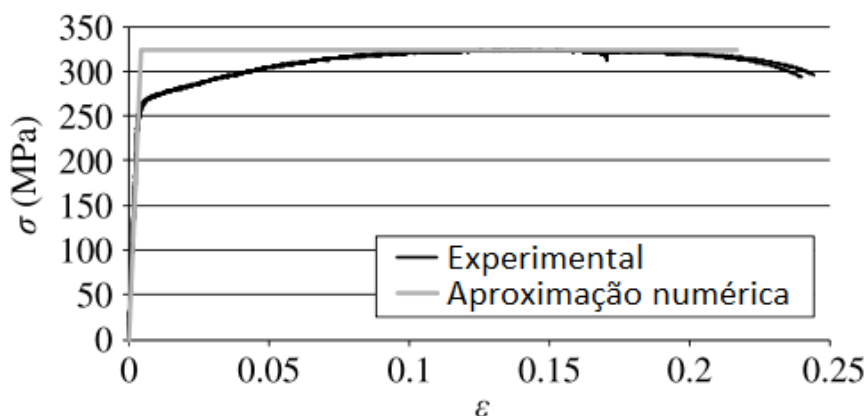


Figura 19 – Curvas σ - ϵ referentes à liga de alumínio AW 6082-T651 [111].

3.1.2.2 Adesivos

- Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 é um adesivo epóxico de dois componentes de alta resistência capaz de promover adesão em materiais metálicos, cerâmicos, plásticos, entre outros. De cor cinzenta após mistura, este adesivo tixotrópico e de cura à temperatura ambiente é caracterizado pela sua fragilidade e excelente desempenho a altas temperaturas (resistente até 120°C). Para um desempenho ideal, a sua proporção mássica entre resina e endurecedor é de 10 g/4 g.

Na Figura 20 é possível consultar as características mecânicas deste adesivo através da representação gráfica das curvas σ - ϵ obtidas por ensaio a provete *bulk*.

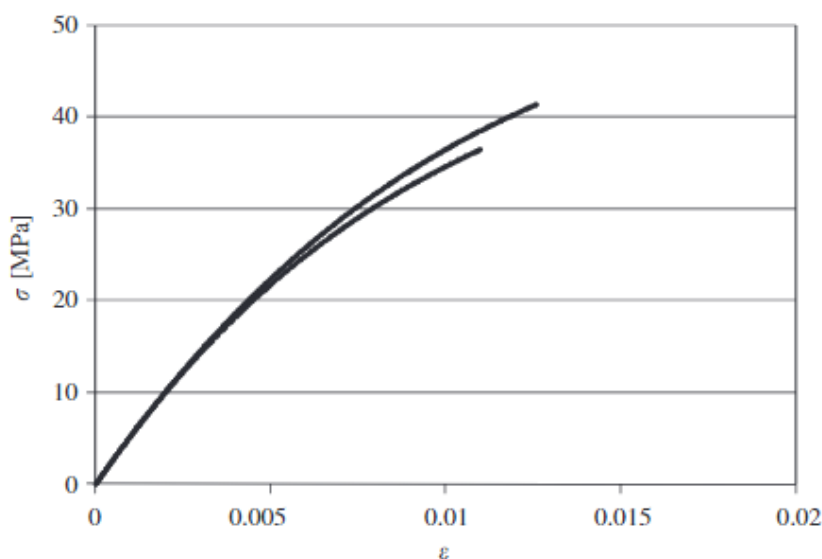


Figura 20 – Curvas σ - ϵ obtidas por ensaio a provetes *bulk* de adesivo Araldite® AV138 [108].

- Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 apresenta-se como sendo um adesivo estrutural tixotrópico de dois componentes, capaz de curar à temperatura ambiente. Este adesivo denota uma característica moderadamente dúctil, o que lhe confere uma alta resistência a carregamentos cíclicos. Ao contrário do adesivo previamente analisado, o Araldite® 2015 tem uma proporção mássica entre resina e endurecedor de 1 g/1 g e é fornecido em formato de cartucho. Este adesivo é de fácil aplicação pois a mistura dos dois componentes é efetuada durante a aplicação por meio de um bico aplicador.

Na Figura 21 podem ser consultadas as curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® 2015 obtidas por meio de ensaio a provete *bulk*.

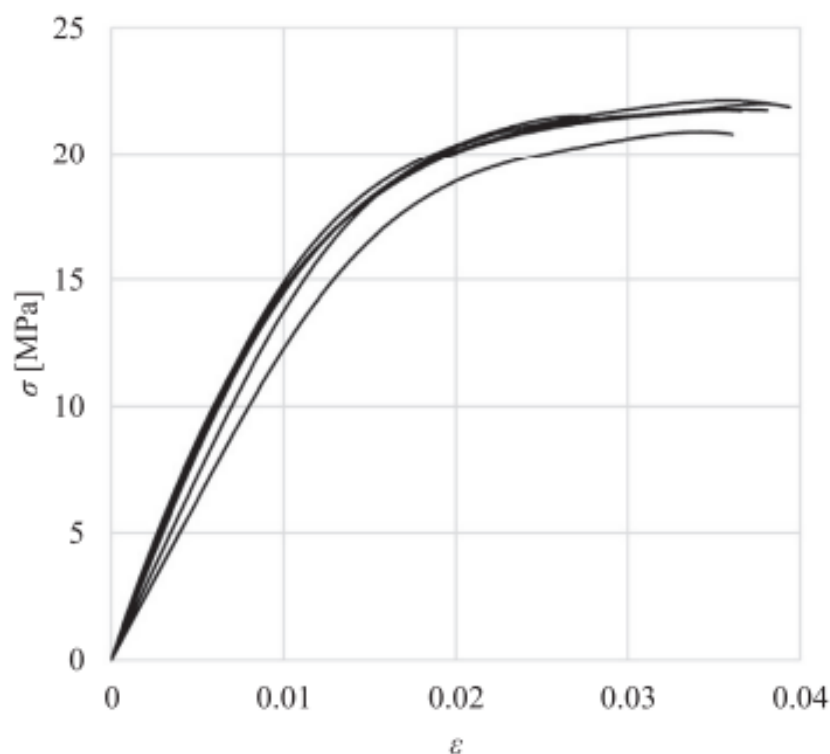


Figura 21 – Curvas σ - ϵ obtidas por ensaio a provetes *bulk* de adesivo Araldite® 2015 [111].

- Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é também ele um adesivo estrutural de dois componentes à base de poliuretano com a sua cura a ocorrer à temperatura ambiente. Este adesivo denota características dúcteis e consequentemente alta resistência ao impacto, e é tipicamente fornecido em tambor com o endurecedor num recipiente separado, onde a sua proporção mássica entre resina e endurecedor é de 10 g/2 g. Após a mistura, este adesivo apresenta cor bege e uma alta viscosidade, sendo comumente aplicado no fabrico de painéis *sandwich*. A Figura 22 apresenta as curvas σ - ϵ em *bulk* do adesivo Sikaforce® 7752.

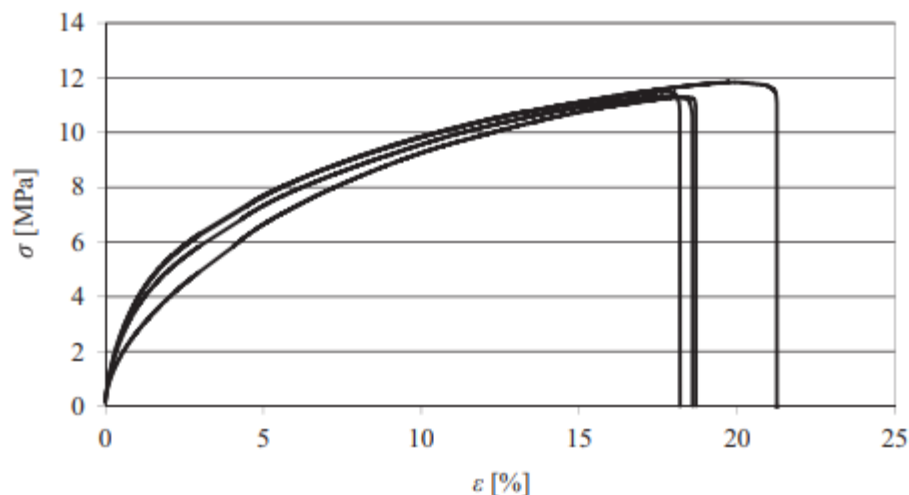


Figura 22 – Curvas σ - ϵ obtidas por ensaio a provetes *bulk* de adesivo Araldite® 7752 [112].

3.1.3 Procedimento experimental

Neste subcapítulo é descrito todo o processo de obtenção dos dados experimentais, incluindo a preparação dos aderentes para o fabrico das juntas, o fabrico das juntas em estudo e os ensaios laboratoriais.

3.1.3.1 Preparação dos aderentes

O primeiro passo do processo de preparação dos aderentes passou pelo corte de barras de alumínio AW 6082-T651 em secções retangulares de dimensão 180×25×3 mm. Uma vez que o alumínio foi fornecido em bruto em barras de 1000×25×3 mm, foi utilizada uma serra de banda para efetuar o corte de 14 dessas barras nos segmentos pretendidos.

Previu-se o teste de 3 provetes para cada uma das configurações consideradas, o que fez um total de 48 provetes, ou seja, 96 aderentes. Na Figura 23 é possível vislumbrar o processo de corte descrito.

Após o corte dos aderentes foi necessária a remoção da rebarba que esta operação gerou. Preferiu-se a remoção manual com o auxílio de uma grossa à utilização de esmeriladora, uma vez que a agressividade deste equipamento poderia danificar o tipo de material dos aderentes. Após esta operação, procedeu-se à limpeza dos aderentes de forma a remover contaminantes como gordura e o líquido refrigerante da serra de banda através da utilização de acetona. Na Figura 24 pode ser consultado o resultado final destas duas etapas.

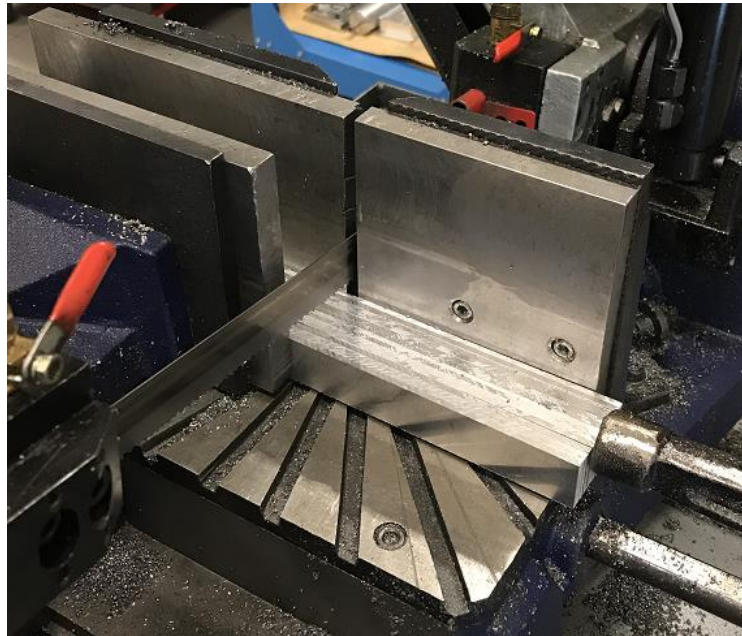


Figura 23 – Corte dos aderentes em serra de banda.



Figura 24 –Aderentes após remoção de rebarba e limpeza.

De seguida passou-se à maquinação do degrau numa das extremidades de cada um dos aderentes. Foram maquinados 4 rebaiços de 12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm através da utilização de uma fresadora Gambin. Para este efeito, os aderentes foram posicionados nos mordentes de um torno fixo, enquanto a fresa era movimentada até ao encontro deste com o auxílio do posicionador digital do equipamento. Os rebaiços de 37,5 mm e 50 mm foram realizados em 2 e 3 passagens, respetivamente, pois a flexão da secção mais fina do aderente estava a provocar imprecisões dimensionais. Na Figura 25 podem ser consultadas 3 diferentes fases do processo de maquinação descrito.

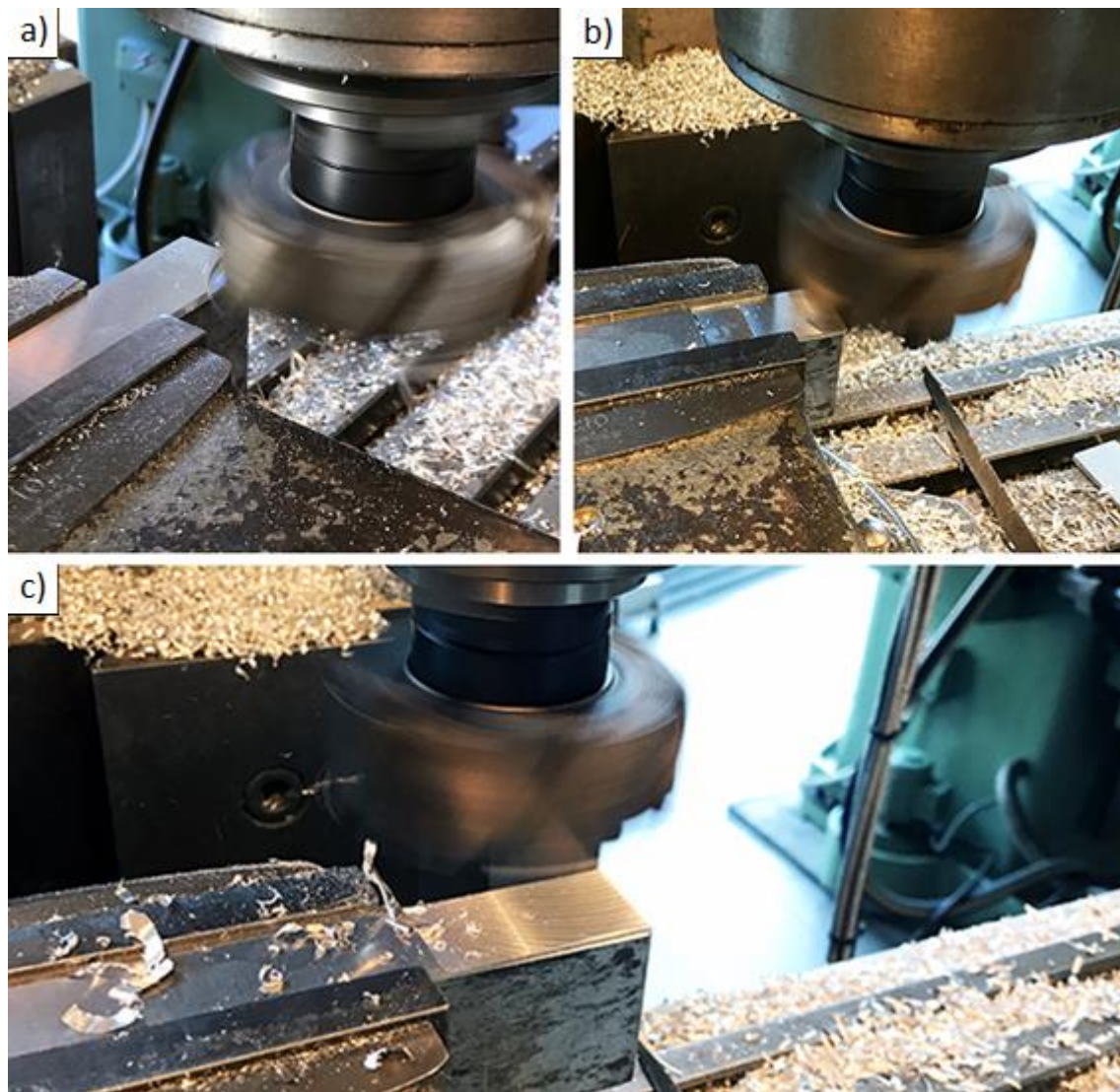


Figura 25 –Diferentes etapas do processo de maquinagem: a) início do ataque da fresa; b) primeira passagem da fresa e c) segunda passagem da fresa.

O passo seguinte passou pela lixagem das superfícies a colar, e posterior limpeza e desgorduramento das mesmas. O processo de lixagem passou pela utilização de lixa de grão 80 com o intuito de remover possível oxidação, induzir rugosidade na superfície do aderente e consequentemente proporcionar uma melhor molhagem por parte do adesivo. Novamente optou-se pelo processo manual em detrimento da projeção de areia pois este último processo é propício à criação de indesejáveis tensões superficiais na fina zona de ligação.

Por fim, terminada a operação de lixagem, procedeu-se novamente à limpeza manual dos substratos com acetona. Esta última limpeza foi realizada com mais afinco pois é de vital importância a remoção de todas as partículas sólidas geradas pelo processo de lixagem, para garantir uma ligação resistente com o adesivo.

3.1.3.2 Fabrico da junta

Para o fabrico da junta propriamente dita, o passo inicial consistiu em efetuar as marcações, por meio de marcador permanente, das zonas de fronteira das juntas de dois adesivos, conforme as medidas apresentadas na Tabela 10 do subcapítulo 3.1.1. Nas juntas simples não foi efetuada qualquer marcação. De seguida foram cortados 48 segmentos de fio de pesca de 0,2 mm de espessura com a finalidade de bitola para garantir a dimensão de t_{A1} .

Findas estas duas etapas de preparação, os aderentes foram colocados dois a dois na zona destinada à sua ligação. Um dos aderentes foi fixo por meio de um grampo à bancada de trabalho, enquanto a sua respetiva contraparte foi posicionada à frente deste para facilitar o processo de ligação. Por baixo da zona de ligação foi colocado um filme de Teflon® de cor verde, para o provete não aderir à base de suporte após cura do adesivo, conforme é possível constatar na Figura 26.



Figura 26 –Disposição dos aderentes a aguardar fabrico.

A etapa seguinte passa pela preparação dos adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, que detêm uma proporção para endurecedor de 10 g/4 g e 10 g/2 g, respetivamente. O adesivo Araldite® 2015 é de aplicação direta pois é fornecido em formato de cartucho com bico misturador, conforme já abordado no subcapítulo 3.1.2.2. Feita a mistura dos adesivos, é altura da sua aplicação nos substratos.

Começou-se pelo fabrico das juntas de adesivo simples, seguido do fabrico das juntas de dois adesivos. O adesivo foi aplicado no substrato livre por espátula para os adesivos sem aplicador. Na Figura 27 é observada a aplicação do adesivo na junta de proporção 25%-50%-25% de adesivos Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752, assim como o pormenor da marcação das zonas de fronteira de adesivo.

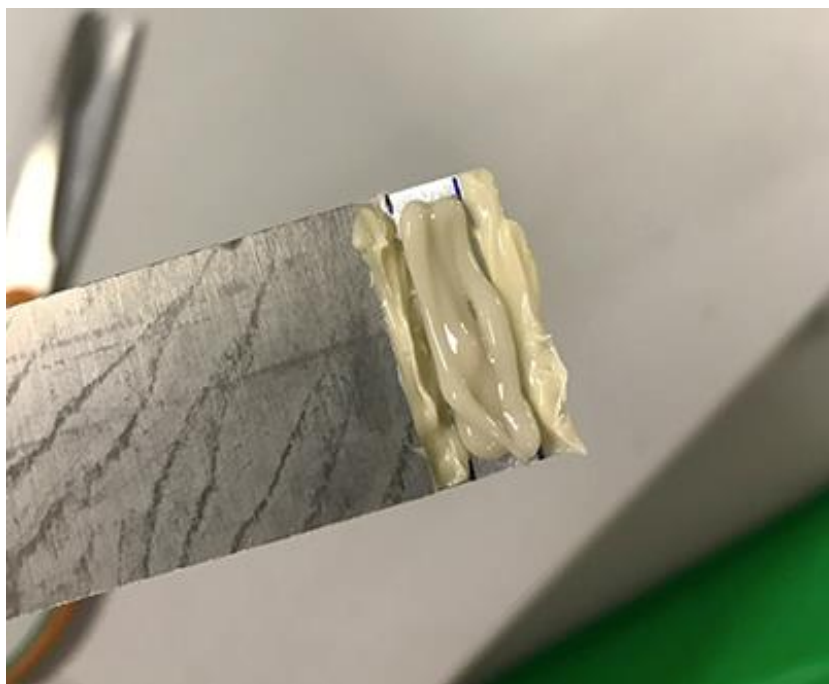


Figura 27 – Detalhe da aplicação de adesivo em junta Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752.

Após a aplicação dos adesivos nos substratos livres estes foram pressionados contra a contraparte fixa à bancada de trabalho, enquanto era aplicado um segmento de fio de pesca por extremidade de junta. Uma vez posicionados e alinhados de forma a garantir colinearidade longitudinal, os aderentes foram também eles fixos por meio de 2 grampos. Com os provetes na sua posição final de cura foram então removidos os fios de pesca e o excesso de adesivo da superfície superior da junta. Os provetes ficaram agora a curar durante uma semana até que os ensaios de tração pudessem ser realizados. A Figura 28 demonstra a última etapa do fabrico dos provetes a ensaiar.

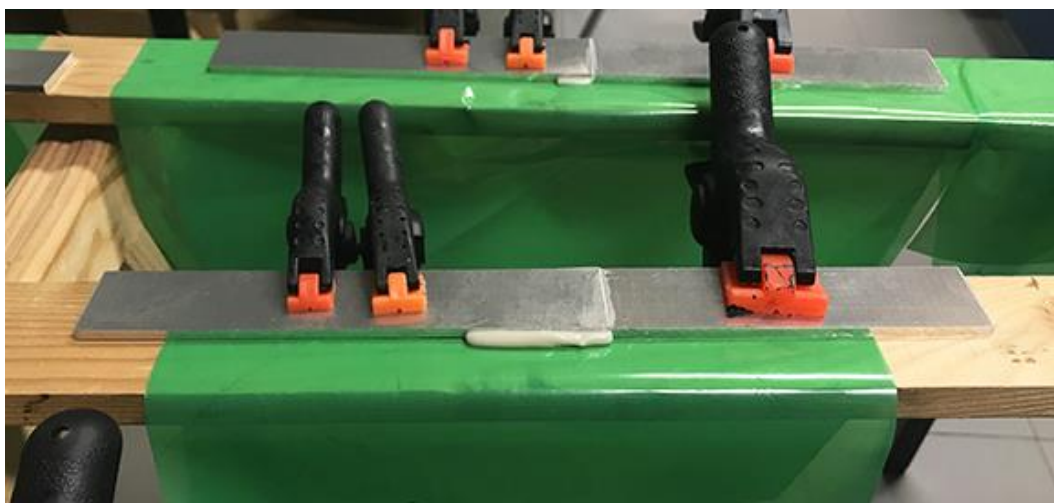


Figura 28 – Proвете na sua posição final de cura.

3.1.3.3 Ensaio das juntas

Concluída a semana de cura dos provetes é agora necessário realizar a preparação dos mesmos para os ensaios das juntas. O primeiro passo consistiu em marcar todos os 96 substratos com uma nomenclatura que identificasse o tipo de junta. De seguida foi feita a remoção do excesso de adesivo expelido da área de ligação aquando do emparelhamento dos dois substratos. A remoção deste excesso de material foi feita, numa primeira fase, com o recurso a um alicate, e seguidamente com a utilização de uma lâmina. A Figura 29 ilustra este processo bem como o exemplo da marcação usada para identificar os provetes.



Figura 29 – Operação de limpeza do excesso de adesivo e respetiva marcação do provete.

O último passo antes do ensaio foi efetuar a marcação a marcador permanente da distância entre amarras da máquina de ensaio de tração. Na Figura 30 pode ser consultado o aspeto final das juntas a ensaiar para cada um dos L_0 .

Por fim, foram realizados os ensaios de tração por meio da máquina de ensaios à tração Shimadzu® AG-X 100 existente no laboratório de ensaios tecnológicos do ISEP. Os provetes foram fixos nos mordentes da máquina e tracionados longitudinalmente a uma velocidade constante de 1 mm/min até à rotura do aderente ou do adesivo. Após cada ensaio, a própria máquina de tração gerou uma serie de dados em bruto relativo ao comportamento do provete que posteriormente serão tratados e discutidos. Na Figura 31 e Figura 32 é possível vislumbrar, respetivamente, um dos provetes em rotura no fim do seu ensaio e o aspeto detalhado da rotura e plastificação dos aderentes em 3 ensaios para $L_0=50$ mm.

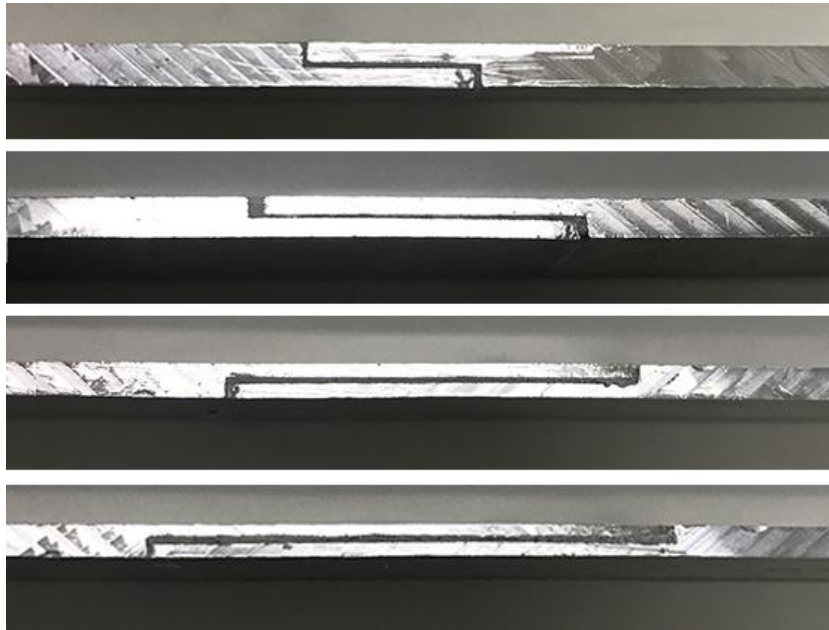


Figura 30 – Aspeto final das juntas após limpeza para os 4 L_0 em estudo.

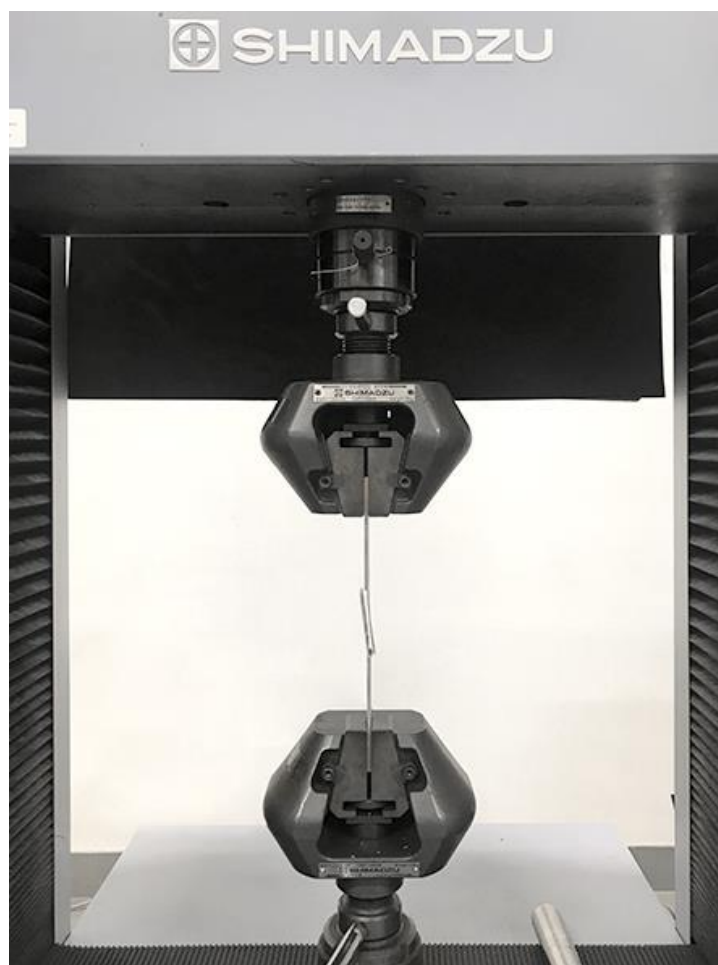


Figura 31 – Rotura do provete no fim do seu ensaio à tração na máquina de ensaios Shimadzu® AG-X 100.

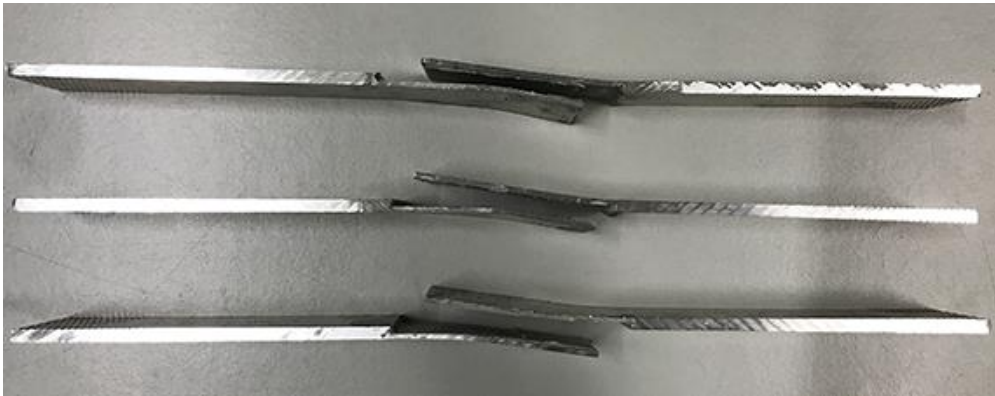


Figura 32 – Detalhe da rotura de 3 provetes de $L_0=50$ mm.

3.1.4 Resultados

No presente subcapítulo são analisados detalhadamente tanto os modos de rotura dos provetes ensaiados como a resistência global das juntas adesivas.

3.1.4.1 *Análise dos modos de rotura*

Os resultados obtidos da análise dos modos de rotura das juntas de adesivo simples Araldite® 2015 revelaram-se positivos, com a totalidade das juntas a serem consideradas como rotura coesiva ou mista. Como já anteriormente discutido, este modo de rotura é o preferencial pois é garantido que se fruíram todas as potencialidades mecânicas do adesivo. A Tabela 14 apresenta as considerações tomadas relativas aos modos de rotura das juntas de adesivo simples Araldite® 2015.

Tabela 13 – Modos de rotura das juntas de adesivo simples Araldite® 2015.

L_0 [mm]	Adesivo simples Araldite® 2015	Modo de rotura
12,5		Coesiva
		Coesiva
		Coesiva

25		Coesiva
		Coesiva
		Mista ^a
37,5		Coesiva
		Coesiva
		Mista ^a
50		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista

^a maioritariamente coesiva

Para as juntas simples de adesivo Sikaforce® 7752 foram obtidos também resultados positivos, com as juntas de $L_0=12,5$ mm e $L_0=50$ mm a evidenciarem rotura mista maioritariamente coesiva e as juntas de $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm a serem classificadas como rotura coesiva. Na Tabela 14 é possível observar um resumo visual de todos os modos de rotura considerados para cada um dos casos de estudo.

Tabela 14 – Modos de rotura das juntas de adesivo simples Sikaforce® 7752.

L_0 [mm]	Adesivo simples Sikaforce® 7752	Modo de rotura
12,5		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista ^a
25		Coesiva
		Coesiva
		Coesiva
37,5		Mista ^a
		Coesiva
		Coesiva

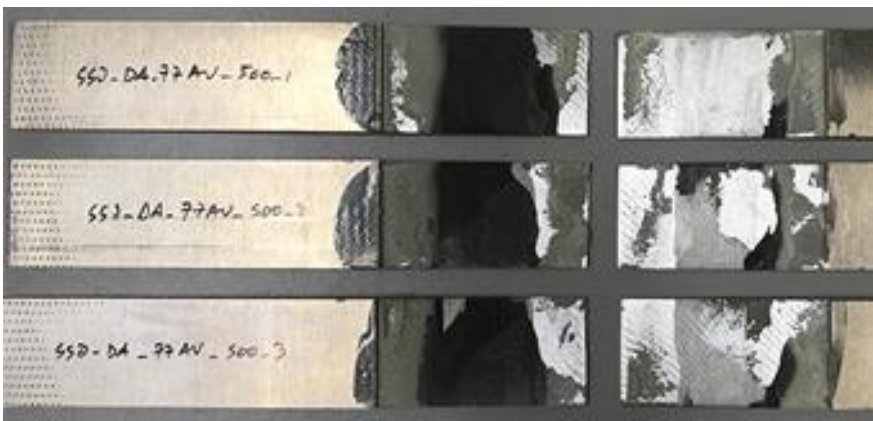
50		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista ^a

^a maioritariamente coesiva

Ao entrar no campo das juntas de dois adesivos, na configuração Sikaforce® 7752-Araldite® AV138-Sikaforce® 7752 todos os provetes evidenciaram rotura mista, com preponderância coesiva. A rotura acontece próxima da interface, o que induz a percepção de uma superfície limpa no substrato. A Tabela 15 providencia um resumo dos modos de rotura considerados nas juntas de dois adesivos na configuração Sikaforce® 7752-Araldite® AV138-Sikaforce® 7752.

Tabela 15 – Modos de rotura das juntas de dois adesivos na configuração Sikaforce® 7752-Araldite® AV138-Sikaforce® 7752.

L_0 [mm]	Dois adesivos Sikaforce® 7752-Araldite® AV138-Sikaforce® 7752	Modo de rotura
12,5		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista ^a

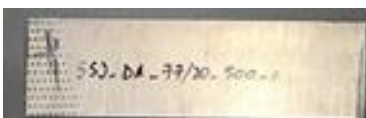
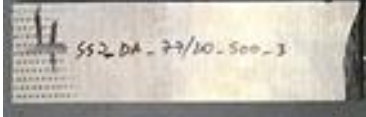
25		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista ^a
37,5		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista ^a
50		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista ^a

^a maioritariamente coesiva

Por fim, nas juntas com configuração Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752, observa-se novamente o tipo de rotura mista, mas maioritariamente coesiva a dominar os ensaios realizados. Na Tabela 16 é possível constatar o resumo dos modos de rotura considerados para juntas de configuração Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752.

Tabela 16 – Modos de rotura das juntas de dois adesivos na configuração Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752.

L_0 [mm]	Dois adesivos Sikaforce® 7752-Araldite® 2015-Sikaforce® 7752	Modo de rotura
12,5		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista ^a
25		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista ^a
37,5		Mista ^a
		Mista ^a
		Mista ^a

50				Mista ^a
				Mista ^a
				Mista ^a

^a maioritariamente coesiva

3.1.4.2 Resistência das juntas

No presente subcapítulo são comentados os resultados experimentais obtidos para as juntas adesivas contempladas a realizar ensaio de tração. Na Figura 33 é possível consultar a evolução dos valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos experimentalmente para juntas simples de Araldite® 2015. Para $L_0=12,5$ mm, verifica-se um valor médio de $P_{\text{máx.}}$ de 4460 N, que regista um aumento de 84% para $L_0=25$ mm. De $L_0=25$ mm para $L_0=37,5$ mm o incremento de carga reduz para 31% pois começa-se a verificar plastificação dos substratos, facto mais flagrante no incremento para o restante L_0 , cujo aumento de carga é de apenas 5%. O desvio padrão máximo do valor de $P_{\text{máx.}}$ foi de 7,5%, e ocorreu em $L_0=12,5$ mm. Já a média dos desvios padrão de todos os L_0 rondou os 4%.

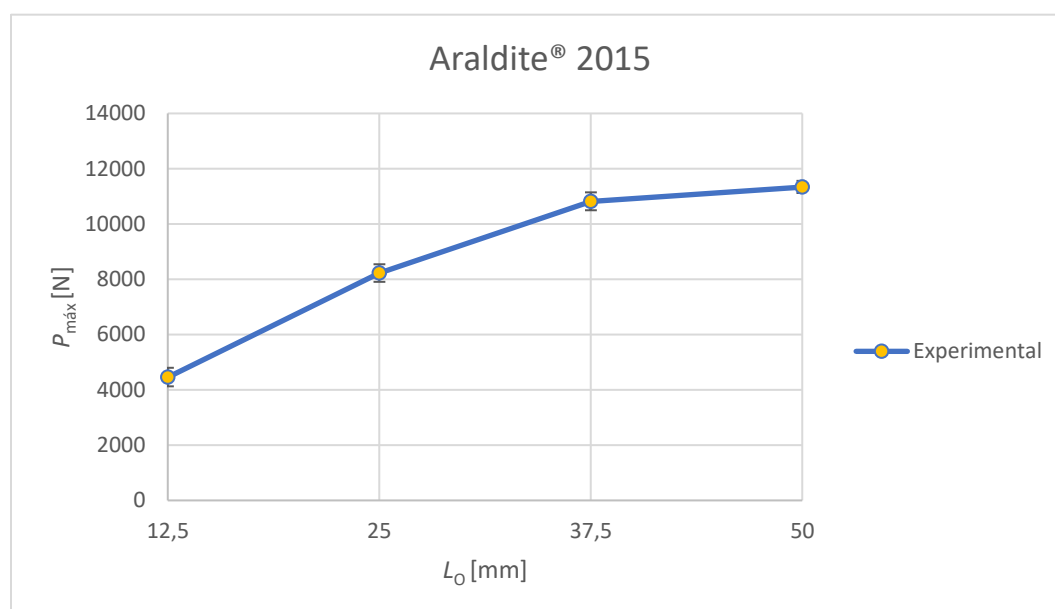


Figura 33 – Valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos experimentalmente para juntas simples de Araldite® 2015.

A Figura 34 demonstra os valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos experimentalmente para juntas simples de Sikaforce® 7752. Observa-se um valor de $P_{\text{máx.}}$ de 4110 N para $L_0=12,5$ mm, valor este que virtualmente dobra para $L_0=25$ mm (incremento de 97%). De $L_0=25$ mm para $L_0=37,5$ mm, embora graficamente não seja visível o fenómeno de plastificação dos substratos, o incremento de $P_{\text{máx.}}$ ficou-se pelos 37%. Para $L_0=50$ mm, geometria para a qual já se verifica plastificação dos substratos, o ganho de resistência foi de apenas 3%. Quanto aos desvios padrão, o seu valor máximo foi de 4,6% e evidenciado em $L_0=25$ mm enquanto o desvio padrão medio ficou-se pelos 3,3%, valor mais baixo de todo o ensaio.

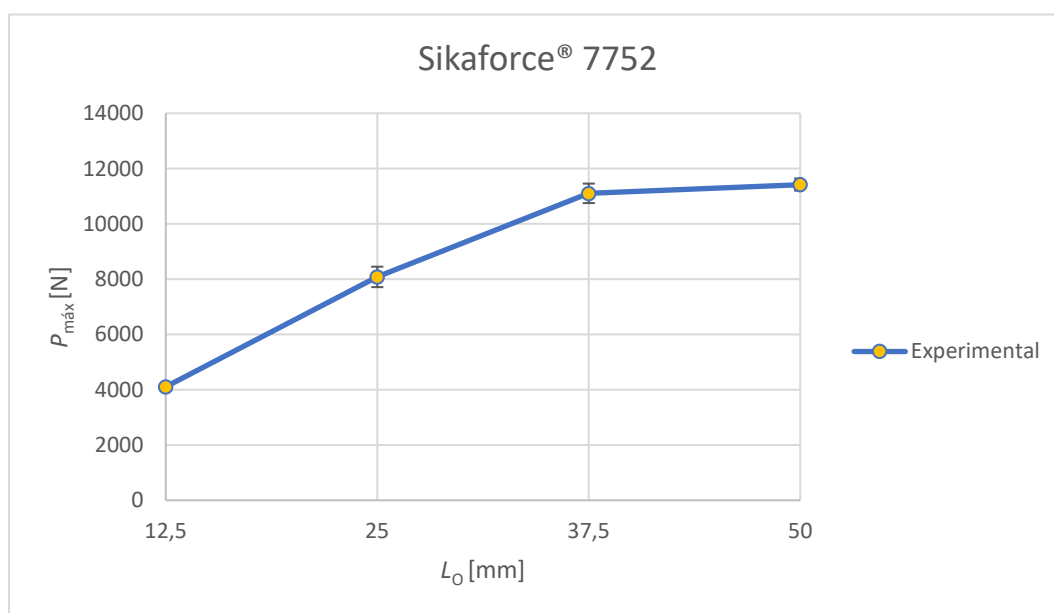


Figura 34 – Valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos experimentalmente para juntas simples de Sikaforce® 7752.

Na Figura 35 encontram-se representados graficamente os valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos experimentalmente para juntas de dois adesivos na configuração 7752-2015-7752. Para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm, observa-se um valor de $P_{\text{máx.}}$ de 4654 N e 8134 N, respetivamente, o que corresponde a um incremento de 75% entre L_0 consecutivos. Para $L_0=37,5$ mm este valor foi de 10792 N, o que perfaz um aumento de 33%. Em relação ao incremento para o último L_0 , este ficou-se pelos 1% devido ao fenómeno já referido de plastificação dos substratos. Nesta configuração, o valor máximo de desvio padrão observado ocorreu em $L_0=12,5$ mm com 6,2%, sendo a sua média de valores 3,8%.

Na Figura 36 é possível visualizar a evolução dos valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos experimentalmente para juntas de dois adesivos na configuração 7752-AV-7752. Estas juntas revelam um comportamento similar à configuração anteriormente comentada. Para $L_0=12,5$ mm o valor de $P_{\text{máx.}}$ foi de 4828 N, valor este que sofreu incrementos entre L_0 consecutivos de 72% e 31% para $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm, respetivamente. De $L_0=37,5$ mm para $L_0=50$ mm o valor de $P_{\text{máx.}}$ manteve-se praticamente inalterado,

com um incremento percentual inferior a 1% devido à plastificação dos substratos na zona da ligação. O desvio padrão máximo, tanto desta configuração como de todo o ensaio, ocorreu em $L_0=12,5$ mm com o valor de 10,3%. O valor de desvio padrão médio da configuração 7752-AV-7752 foi de 4,6%, também ele o resultado mais alto do ensaio.

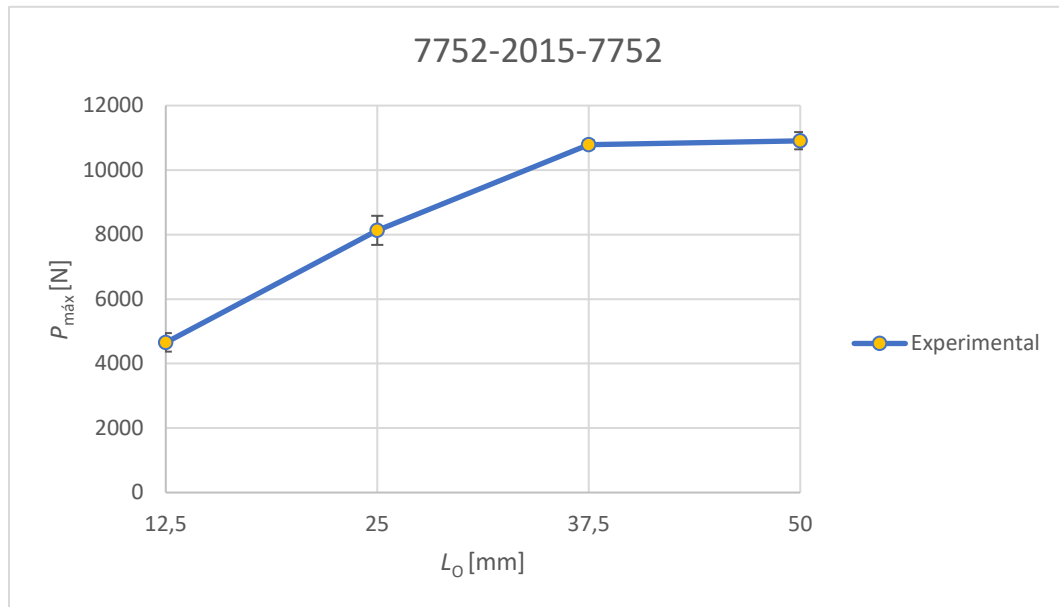


Figura 35 – Valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos experimentalmente para juntas de dois adesivos na configuração 7752-2015-7752.

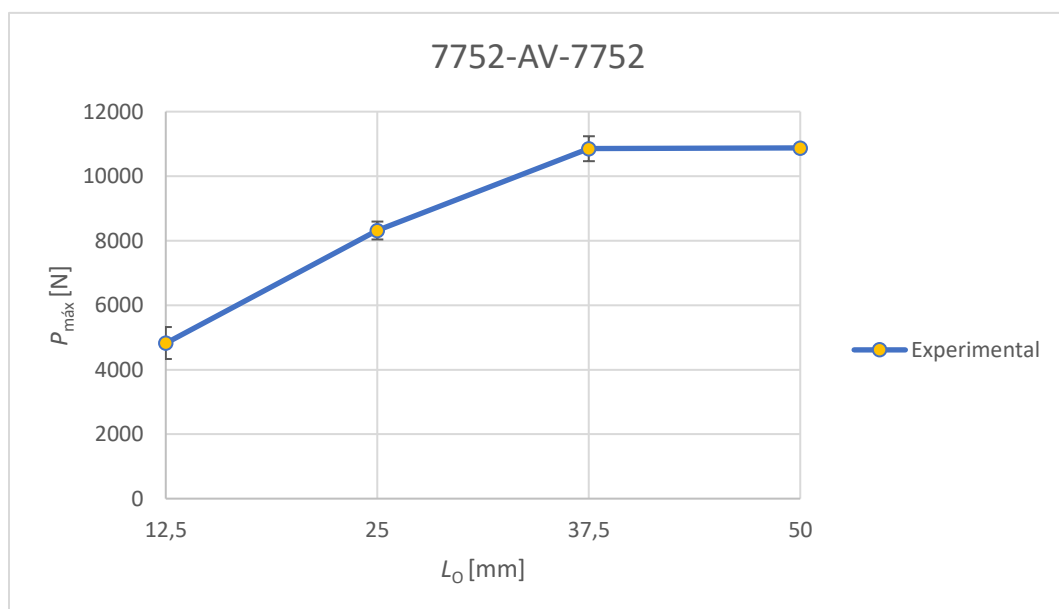


Figura 36 – Valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos experimentalmente para juntas de dois adesivos na configuração 7752-AV-7752.

3.2 Trabalho numérico

No presente capítulo apresentam-se os resultados da análise numérica das diferentes configurações de junta previamente definidas. Primeiramente é detalhada a construção dos modelos das juntas em *software* de simulação baseada no método de EF e posteriormente é aprofundado método de previsão de resistência utilizado nesta análise. Por fim são discutidos os resultados conducentes à validação do MDC e proposta de condições geométricas e materiais ideais para esta junta.

3.2.1 Construção dos modelos numéricos

Para a conceção dos modelos numéricos foi utilizado o *software* de simulação baseado no método de EF ABAQUS®/CAE 2021.HF5. Este *software* permite o desenho a duas dimensões da junta em estudo, a modelação dos diferentes materiais que a compõem e a simulação dos vários modos de carregamento a que a junta poderá estar sujeita. De seguida é aprofundado o processo de construção dos modelos de junta.

- Módulo *Part*

Este é o módulo onde, a duas dimensões, se desenvolve a geometria da junta. O recurso *Shell planar* permite o desenho do contorno exterior da junta, enquanto seguidamente é usado o recurso *Partition face* para a delineação das diferentes partições do objeto homogéneo previamente criado. É neste módulo que se fazem as alterações da geometria dos aderentes, em função de L_0 . Na Figura 37 pode ser observado um exemplo da utilização deste módulo numa das juntas de dois adesivos com $L_0=12,5$ mm.

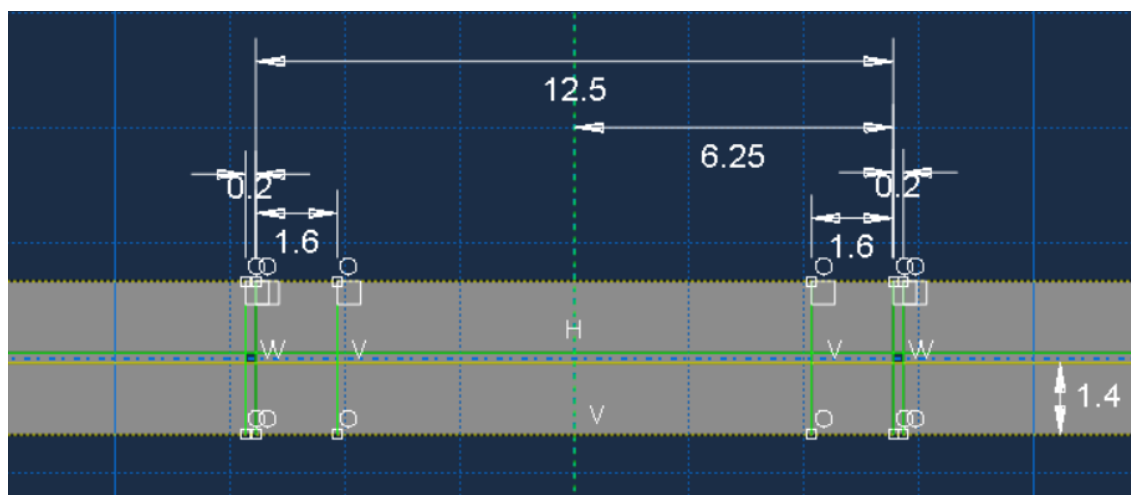


Figura 37 – Exemplo do particionamento de uma junta de dois adesivos com $L_0=12,5$ mm

- Módulo *Property*

Este módulo permite a criação dos materiais que compõem os provetes a serem testados e posteriormente a sua atribuição a cada uma das partições dos modelos presentes no ambiente ABAQUS®. Inicialmente são introduzidas as características físicas e mecânicas tanto dos substratos como dos adesivos. Na Figura 38 podem-se consultar os parâmetros considerados para definir o alumínio dos substratos. A Figura 39 descreve os parâmetros de iniciação de dano, comportamento elástico e tenacidade à fratura considerados para o adesivo Araldite® 2015.

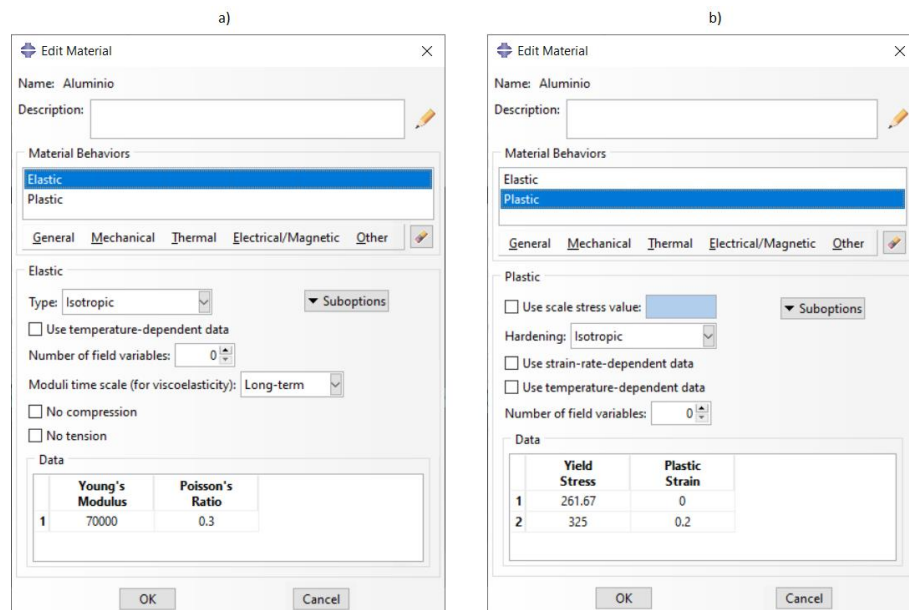


Figura 38 – Características consideradas o material alumínio para comportamento elástico (a)) e para comportamento plástico (b))

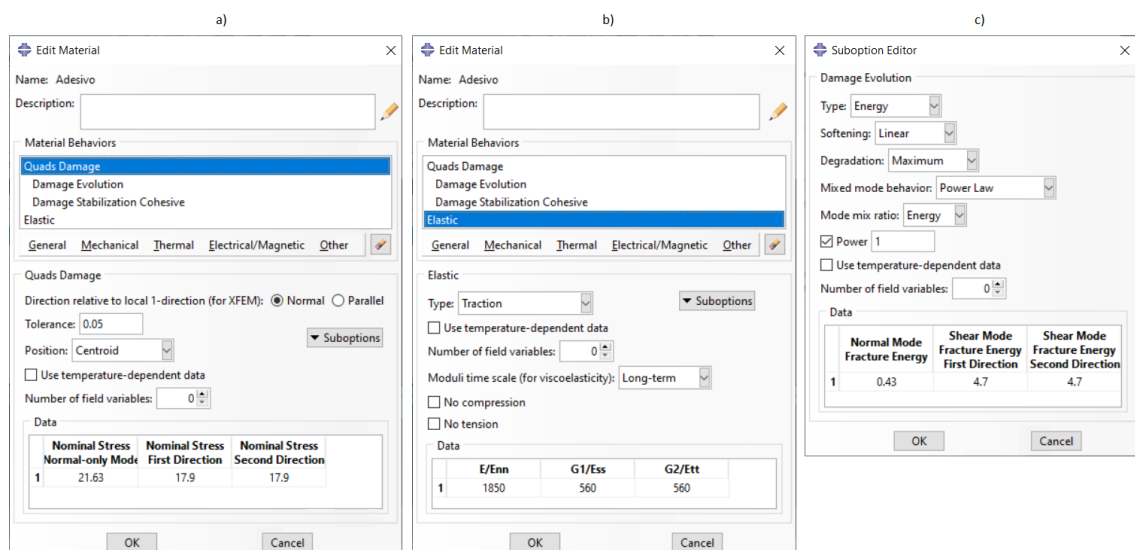


Figura 39 – Parâmetros de iniciação de dano (a)), comportamento elástico (b)) e tenacidade à fratura (c)) considerados para o adesivo Araldite® 2015

Foi também considerado um coeficiente de viscosidade de $5e-5$, que tem a finalidade de auxiliar a convergência do modelo, conferindo-lhe amortecimento, aquando do início da análise numérica.

De seguida são balizadas as fronteiras das áreas correspondentes a cada um dos diferentes materiais que compõem o modelo da junta para posterior atribuição das características anteriormente descritas. Na Figura 40 é possível consultar todas as secções criadas para a conceção deste estudo, e respetivos materiais.

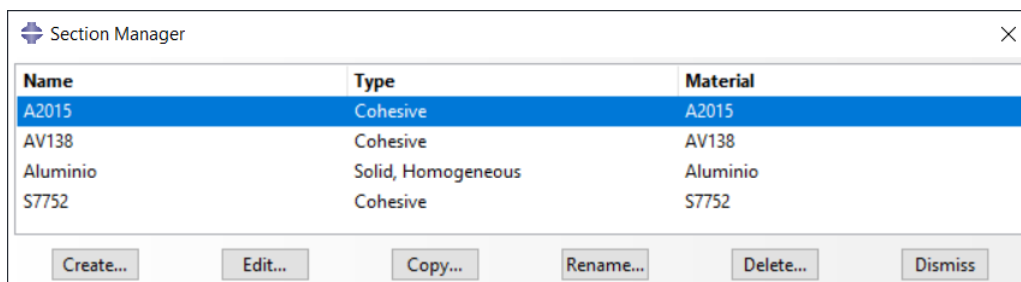


Figura 40 – Definição das diferentes secções criadas em ABAQUS®

Por fim, são atribuídos cada um dos materiais criados às áreas definidas no modelo de junta. A Figura 41 detalha a atribuição de cada um dos materiais criados a cada uma das suas respetivas áreas do modelo da junta.

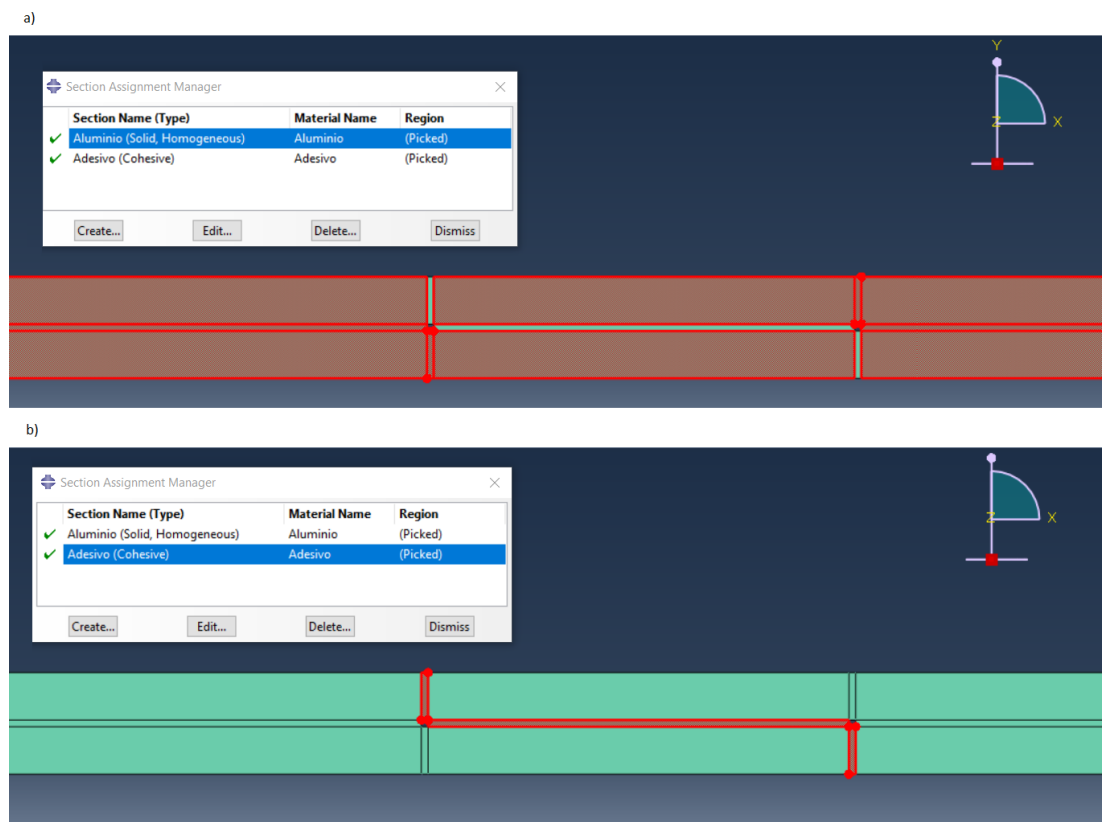


Figura 41 – Detalhe da atribuição de cada uma das secções criadas a cada uma das suas respetivas áreas

- Módulo *Assembly*

O objetivo principal deste módulo é agrupar as diferentes peças em análise na mesma área de trabalho. Uma vez que o modelo de junta adesiva é considerado como sendo uma peça única, neste módulo foi apenas carregada a *part* criada para a área de trabalho.

- Módulo *Step*

Neste módulo é definido o tipo de análise a realizar e balizado o número e tamanho dos incrementos a que o modelo será sujeito. Deve ser encontrado um equilíbrio no tamanho do incremento de forma a que o *software* não perca resolução no momento da propagação de dano e ao mesmo tempo evitar que análise estática termine prematuramente. É também nesta fase que se definem as variáveis a apresentar visualmente e os valores que serão devolvidos após o processamento do modelo. A Figura 42 apresenta os incrementos assumidos neste estudo bem como o tipo de análise escolhida (análise estática).

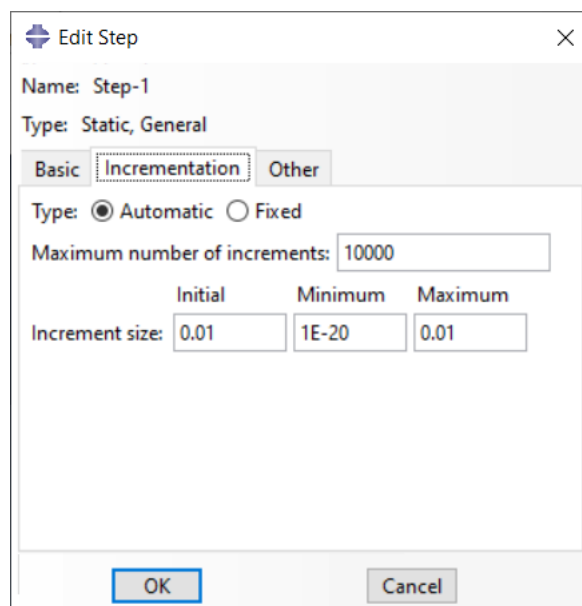


Figura 42 – Tipo de análise realizada e valores de incrementação considerados no modelo numérico

- Módulo *Load*

No módulo *Load* são definidas as condições fronteira do modelo de junta, isto é, o tipo de carregamento e restrições a que a junta está sujeita. Para a realização do presente trabalho foi considerado que a extremidade esquerda do provete se encontra encastrado enquanto a extremidade direita está sujeita a um deslocamento de tração, enquanto se encontra restringida na direção perpendicular. O deslocamento assumido varia de 1,5 mm a 3 mm conforme necessário para induzir rotura. Na Figura 43 é possível consultar os parâmetros assumidos neste módulo.

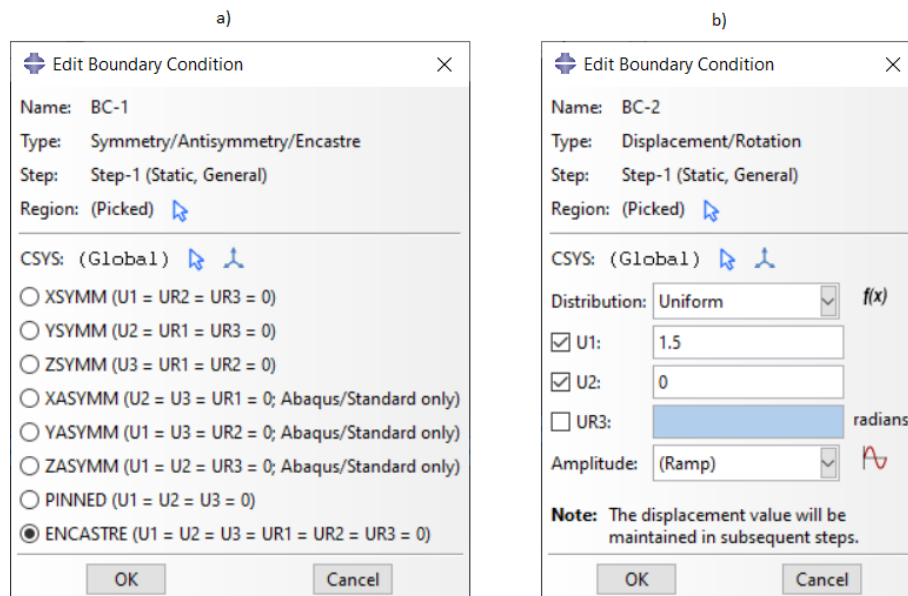


Figura 43 – Parâmetros considerados para a extremidade encastrada (a)) e para a extremidade livre (b))

- Módulo *Mesh*

No módulo *Mesh* é atribuída a malha ao modelo da junta. De referir que diferentes materiais têm diferentes parâmetros da malha e tipos de elemento. Para os aderentes foi considerada uma malha do tipo estruturada constituída por quadriláteros com formação de estado plano de deformação (elementos CPE4R do ABAQUS®). Por sua vez, o adesivo foi modelado por elementos coesivos do tipo COH2D4 do ABAQUS®, e foi também considerada uma malha à base de quadriláteros mas do tipo *sweep*.

Relativamente ao tamanho da malha esta foi configurada para ter uma característica dinâmica, isto é, próximo da área de ligação verifica-se uma malha mais refinada enquanto nas extremidades livres, esta apresenta-se mais grosseira. Para a análise MDC de propagação de dano foram assumidos elementos com uma variação de tamanho entre 0,2 mm a 0,5 mm, enquanto para a análise de tensões no adesivo, que obriga a um maior refinamento, foram considerados elementos com uma variação de tamanho de 0,02 mm a 0,05 mm. Para o adesivo foi considerado apenas um elemento de espessura. A Figura 21 demonstra o pormenor da malha na zona de colagem de um dos modelos de análise MDC.

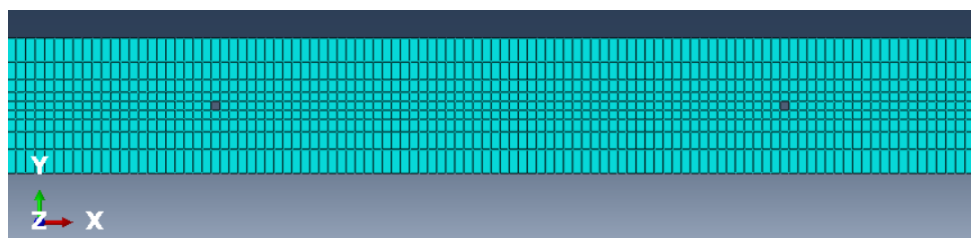


Figura 44 – Pormenor da malha na zona de ligação da junta (análise MDC)

- Módulo *Job*

Este é o módulo onde se dá a ordem para o início da análise numérica dos modelos de junta. Entre outras funcionalidades, é possível definir parâmetros como os recursos computacionais a atribuir a uma determinada análise e a consulta em tempo real do incremento do estudo. Na análise MDC de propagação de dano, esta é realizada até ao limite de deslocamento axial definido no módulo *Load*. Por outro lado, na análise de tensões apenas o primeiro incremento é considerado para extrair as tensões em regime elástico.

- Módulo *Visualization*

Por fim, o módulo *Visualization* permite a análise final dos resultados obtidos de uma forma mais visual e intuitiva. É possível, através do seletor de incrementos, acompanhar em grande detalhe o comportamento da junta adesiva até à sua rotura total, assim como perceber graficamente os valores das tensões instaladas nos diferentes materiais que a compõem. A Figura 45 exemplifica o ambiente gráfico devolvido por este módulo.

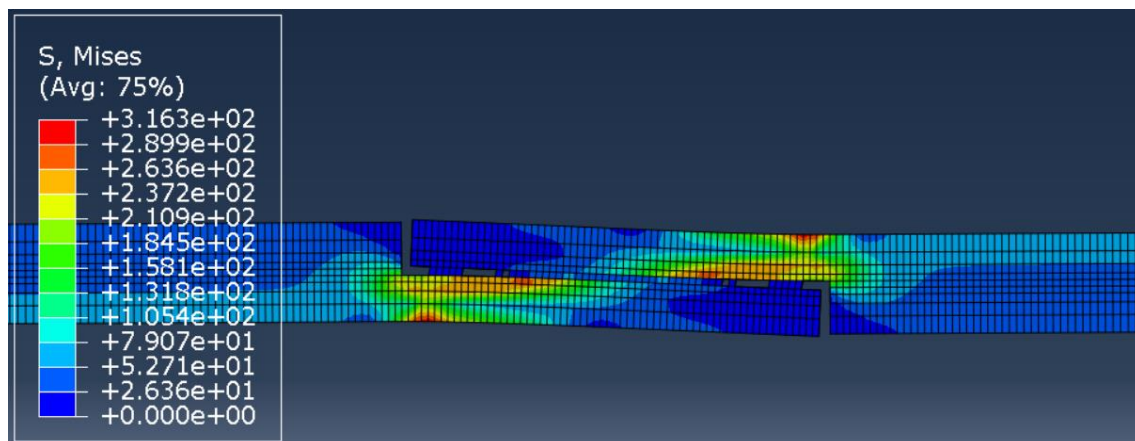


Figura 45 – Representação gráfica da rotura da junta adesiva em estudo

3.2.2 Modelo de dano para o adesivo

No presente subcapítulo é aprofundado o MDC triangular utilizado na análise numérica às juntas adesivas em estudo.

3.2.2.1 Modelo coesivo triangular

Como abordado anteriormente, no subcapítulo 2.2.3, existem diversos MDC disponíveis para aplicação em diferentes situações, consoante o comportamento dos materiais em questão, como por exemplo triangulares, trapezoidais, lineares parabólicas, exponenciais e polinomiais. Entre estes, os MDC triangulares são os usadas com maior frequência, resultado da sua simplicidade, bem como por serem

capazes de oferecer resultados igualmente precisos em grande parte dos casos e ao mesmo tempo exigirem um menor número de parâmetros a serem determinados [113].

Na Figura 46 é apresentada uma lei coesiva triangular. No ponto O, o material ainda não está sob carga e não há separação. Ao longo da linha OA, o material é carregado, mas não ocorre qualquer dano, já que este carregamento é reversível (domínio elástico). O declive desta reta corresponde à rigidez coesiva inicial do material (K). No ponto A (com separação δ_0) a tração coesiva atinge um valor máximo (resistência coesiva, $T_{\max}$). A partir do ponto A, ocorre dano no material e a rigidez coesiva diminui. Por exemplo, num ponto genérico B (com separação δ), localizado entre os pontos A e C, a trajetória do descarregamento ocorre e forma linear em direção ao ponto O. Deste modo, a rigidez coesiva desce do valor inicial K , para um valor K_δ e a tração admissível desce do valor inicial de $T_{\max}$ para o valor de T_δ [114].

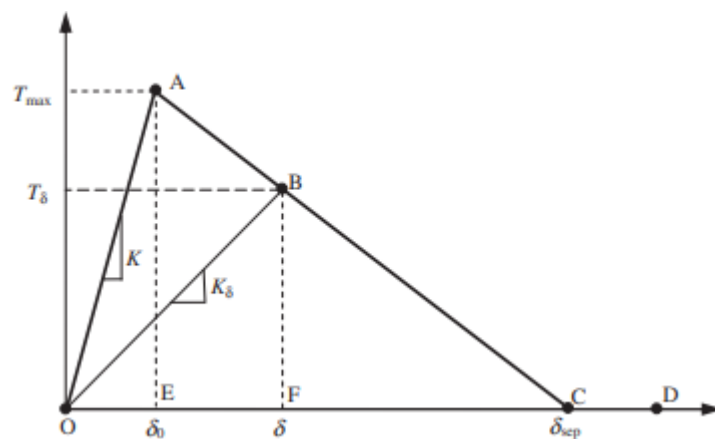


Figura 46 - Lei coesiva triangular [114].

Quando a tração admissível baixa até zero (ponto C, que corresponde à extremidade da fenda), a separação corresponde a δ_{sep} e ocorre a separação completa do material. Após esta ocorrência, uma nova fenda é nucleada (quando a fenda ainda não existe) ou a ponta de uma fenda existente avança. Qualquer ponto além do ponto C (por exemplo ponto D) está localizado fora da zona coesiva e pertence à superfície da fenda localizada atrás da ponta da mesma [114].

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

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

Assim, quaisquer dois dos três parâmetros podem ser escolhidos como os parâmetros de entrada par a lei coesiva triangular. Além dos parâmetros $T_{\max}$ e δ_{sep} , para descrever por completo a forma da lei triangular, deve ser definido um terceiro parâmetro. Este

parâmetro pode ser K ou δ_0 correspondente à tração máxima. A relação entre estes parâmetros é dada por:

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

As leis coesivas triangulares podem ser aplicadas em 2D ou 3D. Este modelo de dano está dividido em modo puro e modo misto. Como apresentado na Figura 47, o modo puro divide-se ainda em modo I (no qual a fenda é submetida a esforços de tração) e modo II (no qual a fenda é submetida a esforços de corte). O modo puro é caracterizado pela propagação do dano ocorrer num conjunto de nós homólogos quando os valores de tensões no modo respetivo são anulados na respetiva lei coesiva. Já no modo misto, os modos puros I e II ocorrem em simultâneo e são usados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tensão e de corte [115].

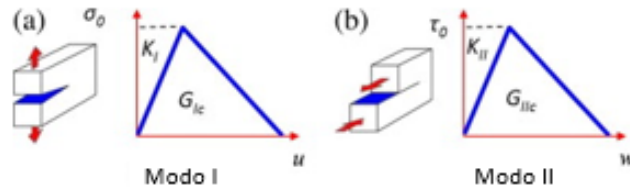


Figura 47 - Lei coesiva triangular modo I (a) e modo II (b) (adaptado de [116]).

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

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

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

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

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

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

Onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade ao corte. Desta forma, com a admissão destes parâmetros é possível produzir de forma fiável a deformação da camada de adesivo [118]. Em modo misto, a

iniciação de dano pode ser definida por vários critérios, como por exemplo o critério quadrático de tensões, através da seguinte equação:

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

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

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

3.2.2.2 Definição das leis coesivas

Para que seja possível o estudo das juntas, primeiro é necessário conhecer os valores dos parâmetros que simulam os adesivos. Alguns estudos publicados afirmam que os resultados obtidos através de ensaios de tração e de corte de provetes maciços de adesivo permitem uma aproximação razoável destes parâmetros [117, 119]. No entanto, as restrições às deformações na camada de adesivo, causadas pelos substratos, bem como a propagação da fenda, que ocorre tipicamente em modo misto, invalidam este facto [120, 121]. Desta forma, passa a existir uma diferença nas propriedades do adesivo como um material maciço ou como camada fina. Assim, é recomendado que os métodos usados na definição destes valores sejam capazes de simular de forma fiável as condições a que os adesivos vão estar sujeitos.

3.2.2.2.1 Araldite® AV138

As leis coesivas do adesivo Araldite® AV138 foram obtidas por um método inverso no trabalho desenvolvido por Campilho et al. [73]. Neste procedimento recorreu-se a ensaios com provetes maciços de adesivo e ensaios *Thick Adherend Shear Test* (TAST) para a definição dos valores de t_n^0 e t_s^0 , respetivamente. Estes valores foram utilizados na construção de leis coesivas aproximadas. Inicialmente, foram usados valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis para tração e corte obtidas foram assim utilizadas no modelo numérico para uma geometria testada (a JSS com L_0 de 20 mm). As leis do adesivo foram estimadas através do ajuste de curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais até que fossem obtidos valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzissem os resultados experimentais. Os valores obtidos foram aplicados a todas as configurações testadas, apresentando resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente através de ensaios com provetes de adesivo maciço e TAST, respetivamente. Os parâmetros obtidos foram testados no trabalho de Campilho et al. [73] e foi concluído que estes são capazes de reproduzir de forma fiável

o comportamento do adesivo Araldite® AV138. Na Tabela 17 são apresentados os parâmetros coesivos utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138.

Tabela 17 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Araldite® AV138 [73].

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

3.2.2.2.2 Araldite® 2015

As leis coesivas do adesivo Araldite® 2015 foram determinadas através de um método inverso num trabalho anterior realizado por Campilho et al. [73]. No entanto, o procedimento foi distinto do descrito anteriormente para o adesivo Araldite® AV138. Neste procedimento recorreu-se a ensaios DCB e ENF para determinar os valores de G_{IC} e G_{IIC} , respetivamente, usando métodos ou teóricas apropriadas. Estes valores foram então utilizados para a construção de uma lei coesiva no modo puro adequada ao material a simular. Inicialmente, foram usados valores aproximados de t_n^0 ou t_s^0 , baseados nas propriedades do adesivo. A lei coesiva resultante deste processo foi utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte) com as mesmas dimensões do modelo a simular. O valor de t_n^0 ou t_s^0 foi obtido utilizando um procedimento de aproximação de curvas P - δ numéricas e experimentais do respetivo teste de caracterização à fratura, para que a lei coesiva reproduza de forma fiel o comportamento observado da camada de adesivo. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente através de ensaios com provetes maciços de adesivos [122] e ensaios TAST [123], respetivamente. Na Tabela 18 são apresentados os parâmetros coesivos utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015.

Tabela 18 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Araldite® 2015 [73].

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

3.2.2.2.3 Sikaforce® 7752

As leis coesivas do adesivo Sikaforce® 7752 foram determinadas no trabalho desenvolvido por Faneco [124] e resultaram de um processo similar ao utilizado no adesivo Araldite® 2015. Para a determinação da lei coesiva ao corte foi usado um método inverso idêntico, ou seja, para a determinação do valor de G_{IIC} recorre-se ao ensaio ENF seguido do ajuste manual iterativo para a estimativa do valor de t_s^0 . Os valores utilizados correspondem a valores médios de G_{IIC} e t_s^0 e foram obtidos no trabalho desenvolvido por Azevedo [125]. Estes valores apresentam desvios padrão entre provetes reduzidos, o que mostra uma repetibilidade dos ensaios realizados.

Devido à inexistência de um processo inverso para a obtenção da lei coesiva em tração foi usado um processo diferente. O valor de G_{IC} foi obtido através do valor médio de uma série de ensaios de fratura DCB. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor de resistência médio à tração dos provetes maciços de adesivo. Como foi observado em trabalhos anteriores que, especificamente na solicitação à tração, os valores de t_n^0 não têm uma influência significativa para variações inferiores a 25% do valor obtido pelo método inverso, considerou-se que não seria necessário tal procedimento [124]. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente através de ensaios com provetes maciços de adesivo e TAST, respetivamente [124]. Na Tabela 19 são apresentados os parâmetros coesivos utilizados para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 19 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 [124].

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

3.2.3 Resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos no cálculo numérico realizado em análise EF. Com a finalidade de facilitar a leitura dos resultados, por vezes foram utilizadas abreviaturas para a designação comercial dos respetivos adesivos utilizados. Na Tabela 20 é possível consultar a correspondência entre a designação curta utilizada e a nomenclatura comercial do respetivo adesivo.

Tabela 20 – Correspondência da designação comercial dos adesivos em estudo e sua respetiva designação curta.

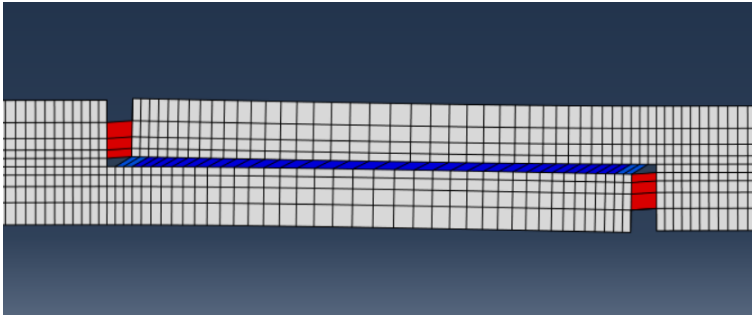
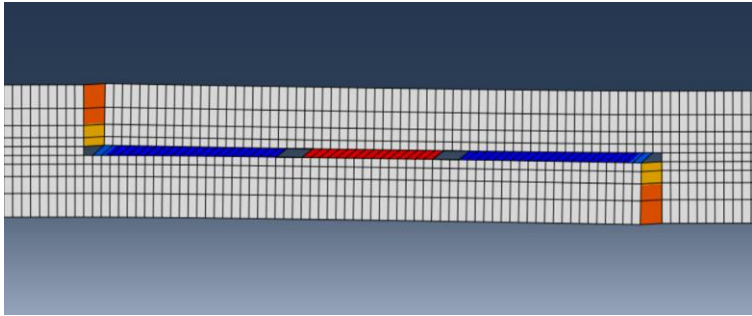
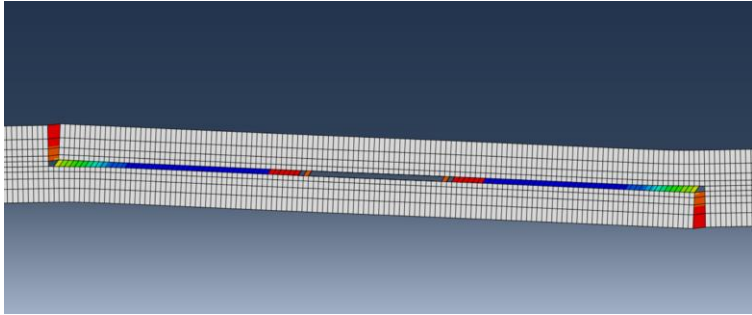
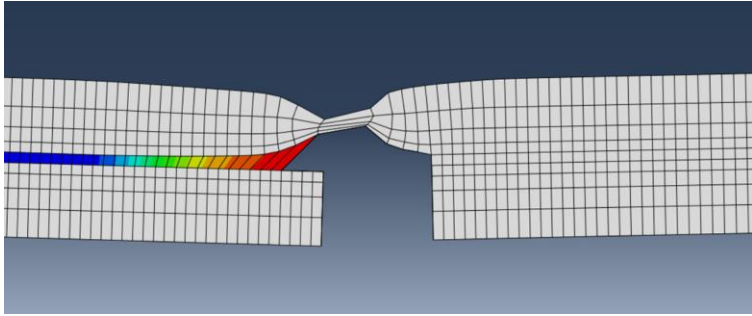
Designação curta	Adesivo
AV	Araldite® AV138
2015	Araldite® 2015
7752	Sikaforce® 7752

3.2.3.1 Modos de rotura

Ao contrário dos métodos experimentais, a análise numérica em ambiente de simulação ABAQUS® oferece a possibilidade do acompanhamento da propagação do dano infligido à junta durante todo o carregamento. Esta análise pode ser posta em prática através da utilização da variável SDEG, que permite visualizar a degradação do adesivo desde o início do carregamento até à sua completa rotura. No presente subcapítulo é feita a análise dos modos de rotura de todas as juntas em estudo. Na Tabela 21 são resumidos os tipos de rotura ocorridos nas simulações numéricas. Cada

um dos modos observados é então classificado com uma letra. Para cada configuração de junta é apresentada uma tabela resumo com a identificação do modo de rotura previamente descrito na Tabela 21.

Tabela 21 – Classificação dos modos de rotura observados na análise numérica.

Classe	Exemplo	Descrição
A		Rotura do adesivo na transição vertical entre aderentes
B		Rotura do adesivo na fronteira entre adesivos
C		Rotura do adesivo no centro da junta
D		Rotura do aderente

- Adesivo simples

Na Tabela 22 são apresentados os modos de rotura para as juntas de adesivo simples. O modo de rotura predominante nas juntas de adesivo simples foi a rotura do adesivo na transição vertical entre aderentes, excetuando a junta de Sikaforce® 7752 com $L_0=50$ mm, para a qual a rotura se deu no aderente. Este resultado deve-se à elevada carga obtida para este L_0 , que conduziu à transposição da resistência do substrato.

Tabela 22 – Modos de rotura observados nas juntas de adesivo simples.

Configuração	L_0 [mm]			
	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	A	A	A	A
Araldite® 2015	A	A	A	A
Sikaforce® 7752	A	A	A	D

- Dois adesivos, proporção 12,5%-75%-12,5%

Na Tabela 23 são apresentados os modos de rotura das juntas da configuração 12,5%-75%-12,5%. A configuração 2015-AV-2015 apresentou rotura do adesivo na transição vertical entre aderentes nas suas 4 variantes. A configuração 7752-2015-7752 revelou rotura do aderente em $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm e rotura do adesivo na transição vertical entre aderentes nas restantes. Tal como na configuração anterior, a configuração 7752-AV-7752 apresenta também rotura do aderente para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, e respetivamente rotura do adesivo na fronteira entre adesivos e rotura do adesivo no centro da junta para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm. Nas configurações 7752-2015-7752 e 7752-AV-7752 a rotura do substrato deu-se nos dois L_0 maiores devido a ter sido excedido o valor de carga resistente do substrato. Para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm da configuração 7752-AV-7752 a rotura deu-se no centro da zona adesiva devido à elevada rigidez do adesivo central quando comparado com o das extremidades.

Tabela 23 – Modos de rotura observados nas juntas de proporção 12,5%-75%-12,5%.

Configuração	L_0 [mm]			
	12,5	25	37,5	50
2015-AV-2015	A	A	A	A
7752-2015-7752	A	A	D	D
7752-AV-7752	B	C	D	D

- Dois adesivos, proporção 33%-34%-33%

Na Tabela 24 são apresentados os modos de rotura das juntas da configuração 33%-34%-33%. A configuração 2015-AV-2015 apresentou mais uma vez rotura do adesivo na transição vertical entre aderentes nas suas 4 variantes. Similarmente, na configuração 7752-2015-7752 foi observada também rotura do adesivo na transição vertical entre aderentes nas 3 sobreposições de menor dimensão tendo a rotura acontecido no aderente para $L_0=50$ mm. A configuração 7752-AV-7752 exibiu cada um dos 4 modos de rotura nas suas 4 variantes, conforme descrito na tabela.

Tabela 24 – Modos de rotura observados nas juntas de proporção 33%-34%-33%.

Configuração	L_0 [mm]			
	12,5	25	37,5	50
2015-AV-2015	A	A	A	A
7752-2015-7752	A	A	A	D
7752-AV-7752	B	C	A	D

- Dois adesivos, proporção 25%-50%-25%

Na Tabela 25 são apresentados os modos de rotura das juntas da configuração 25%-50%-25%. Tal como nas restantes proporções, a configuração 2015-AV-2015 apresenta rotura do adesivo na transição vertical entre aderentes em todas as sobreposições. A configuração 7752-2015-7752 manifesta rotura do adesivo na transição vertical entre aderentes para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm, e rotura no aderente nas restantes sobreposições. Por fim, na configuração 7752-AV-7752, as 2 primeiras sobreposições revelaram rotura do adesivo na fronteira entre adesivos. Para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm a rotura aconteceu, respetivamente, na transição vertical entre aderentes e no aderente.

Tabela 25 – Modos de rotura observados nas juntas de proporção 25%-50%-25%.

Configuração	L_0 [mm]			
	12,5	25	37,5	50
2015-AV-2015	A	A	A	A
7752-2015-7752	A	A	D	D
7752-AV-7752	B	B	A	D

3.2.3.2 Análise de tensões

No presente subcapítulo são apresentados os resultados da análise numérica em simulação ABAQUS® tanto para as tensões de arrancamento como para as tensões de corte.

Da Figura 48 à Figura 63 são apresentadas graficamente as distribuições de tensão σ_y obtidas através do estudo de $\sigma_y/\tau_{méd.}$ em função de X/L_0 ($0 < L_0 < 1$), para todas as proporções de adesivo e diferentes L_0 . As tensões de corte (τ_{xy}) são apresentadas da Figura 64 à Figura 79 numa análise feita tendo como base o estudo de $\tau_{xy}/\tau_{méd.}$ em função de X/L_0 ($0 < L_0 < 1$), também para todas as proporções de adesivo e L_0 .

Todos os valores foram obtidos no primeiro incremento da análise EF e em regime elástico de carregamento.

3.2.3.2.1 Tensões de arrancamento

- Adesivo simples

Da Figura 26 à Figura 29 é possível verificar-se os resultados da análise numérica da distribuição de tensões de arrancamento para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente.

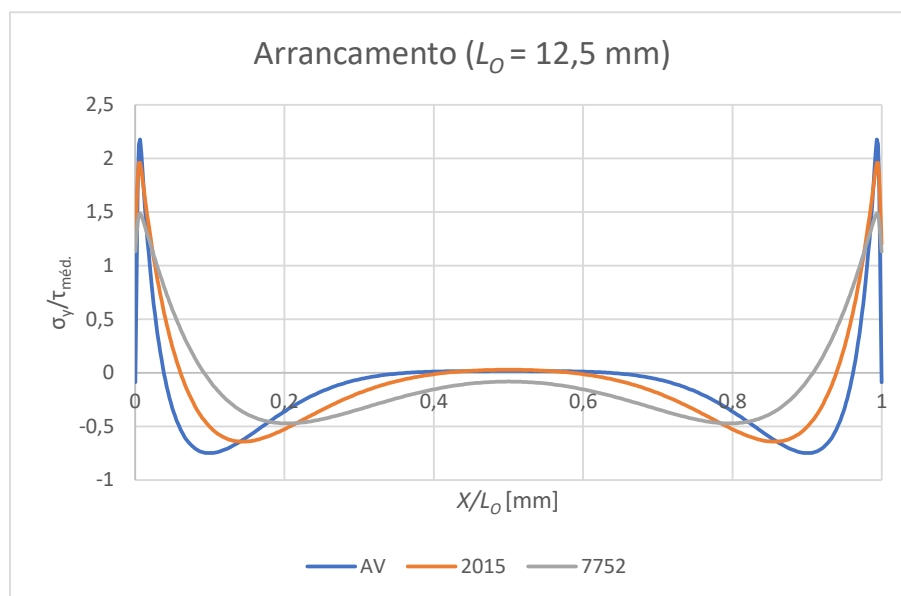


Figura 48 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=12,5$ mm em junta de adesivo simples.

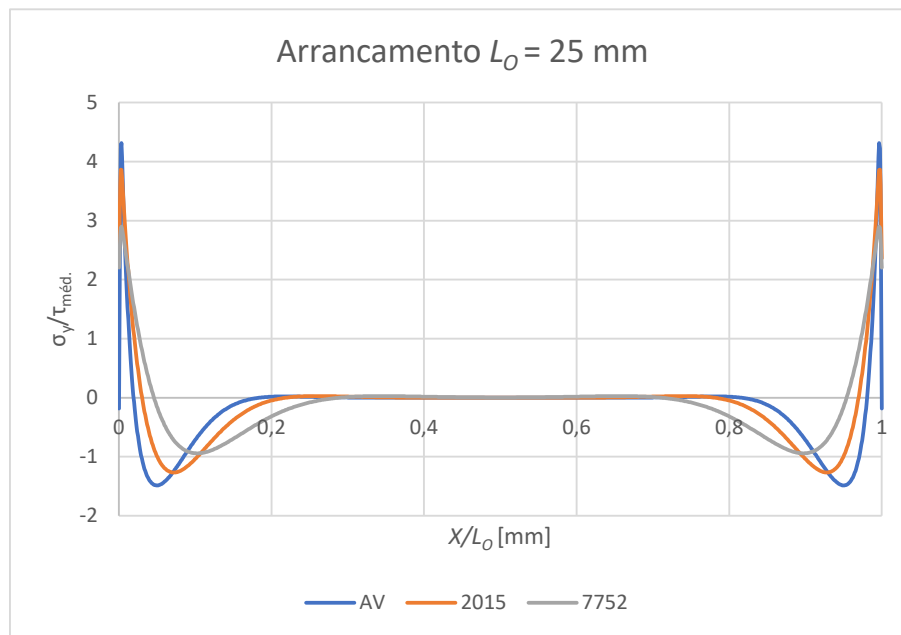


Figura 49 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=25$ mm em junta de adesivo simples.

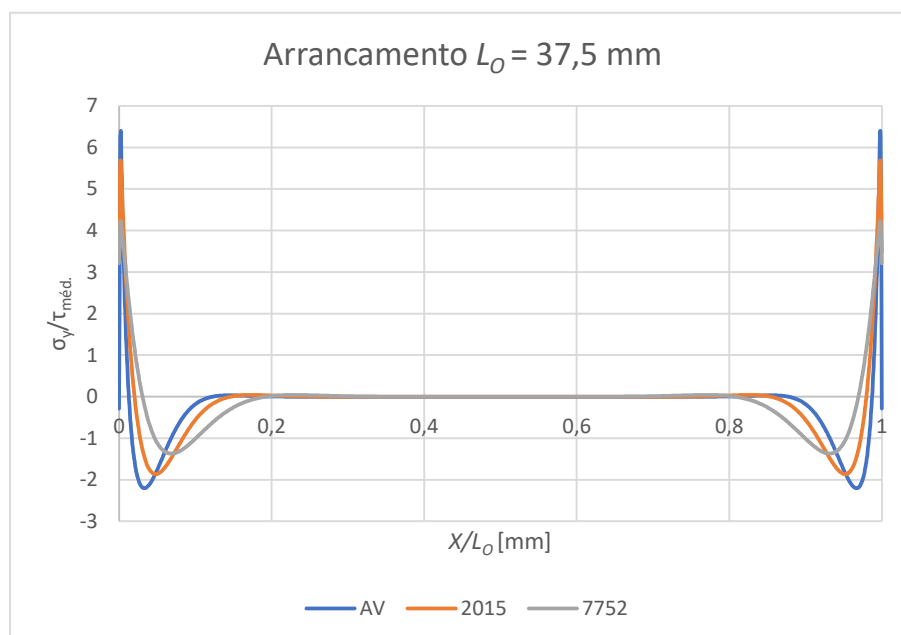


Figura 50 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=37,5$ mm em junta de adesivo simples.

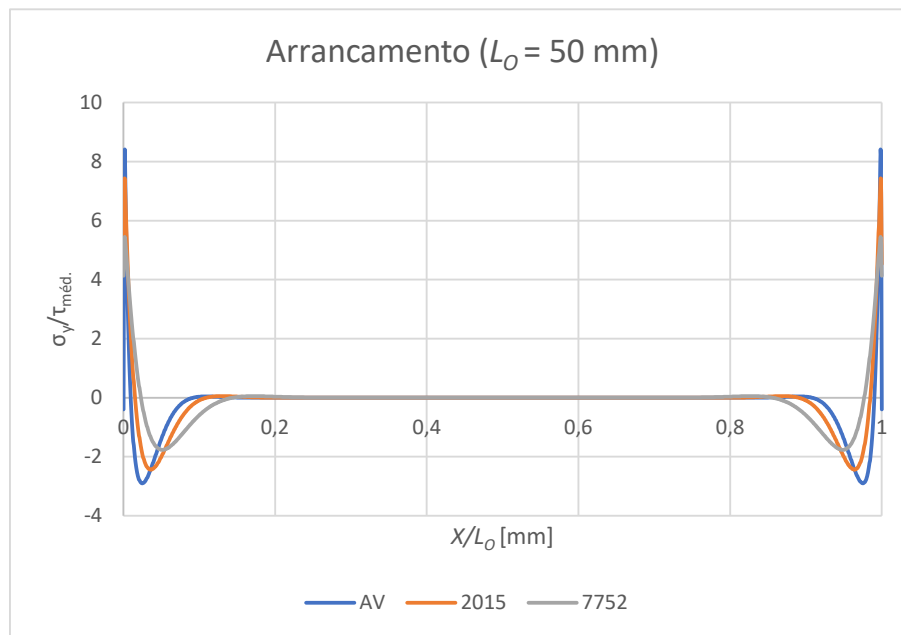


Figura 51 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=50$ mm em junta de adesivo simples.

Pode ser verificado que as curvas de tensão σ_y apresentam um aspeto simétrico e com picos em ambas as extremidades da junta ($x/L_0=0$ e $x/L_0=1$). Por sua vez é também possível observar picos de compressão perto das extremidades da junta ($x/L_0 \approx 0,1$ e $x/L_0 \approx 0,9$ para $L_0=12,5$ mm e $x/L_0 \approx 0,05$ e $x/L_0 \approx 0,95$ para $L_0 \approx 0,1$). Este fenómeno deve-se à flexão dos aderentes aquando do seu carregamento. Na zona central do gráfico constata-se que a distribuição de tensões é virtualmente zero, comprovando que a secção central do adesivo pouco contribui para a resistência global da junta [7].

Relativamente aos diferentes L_0 , os gráficos corroboram que quanto maior for o seu valor, maiores são ambos os picos de tensão, ao mesmo tempo que a posição dos picos de tensão compressivos se desloca para as extremidades da zona de ligação, devido à normalização da posição relativamente ao L_0 de cada junta. É o adesivo Araldite® AV138 que apresenta os picos de tensão mais elevados, devido ao facto de ser o adesivo com maior rigidez dos três em estudo, apresentando valores máximos de $\sigma_y/\tau_{méd.}$ de 4,31 e 8,42 para $L_0=12,5$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente. Por sua vez, o adesivo Sikaforce® 7752, sendo o mais flexível demonstra uma redução de 65% e 35%, com valores de 1,49 e 5,45 para $L_0=12,5$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente. A variação entre os adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 mantém-se na ordem dos 25% para as quatro sobreposições estudadas.

- Dois adesivos, proporção 12,5%-75%-12,5%

Na Figura 30 à Figura 37 pode-se consultar os valores da análise numérica da distribuição de tensões de arrancamento para respetivamente $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$

mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm nas juntas de dois adesivos com a proporção 12,5%-75%-12,5%.

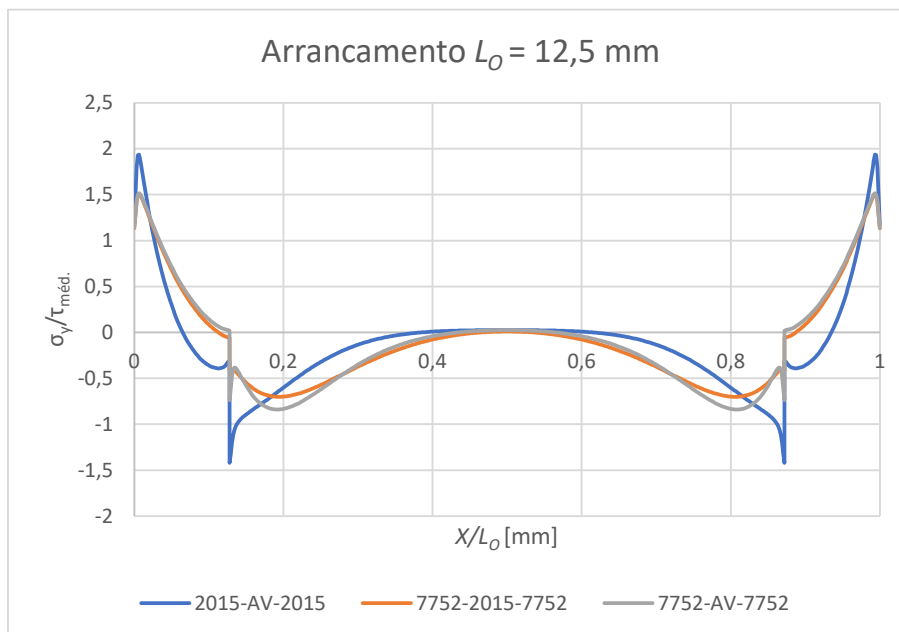


Figura 52 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=12,5$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.

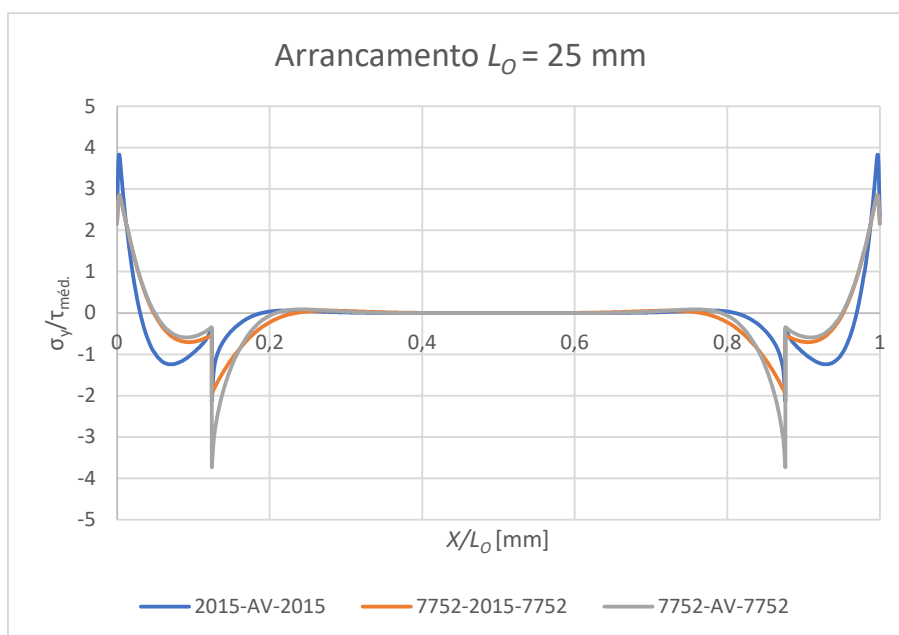


Figura 53 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=25$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.

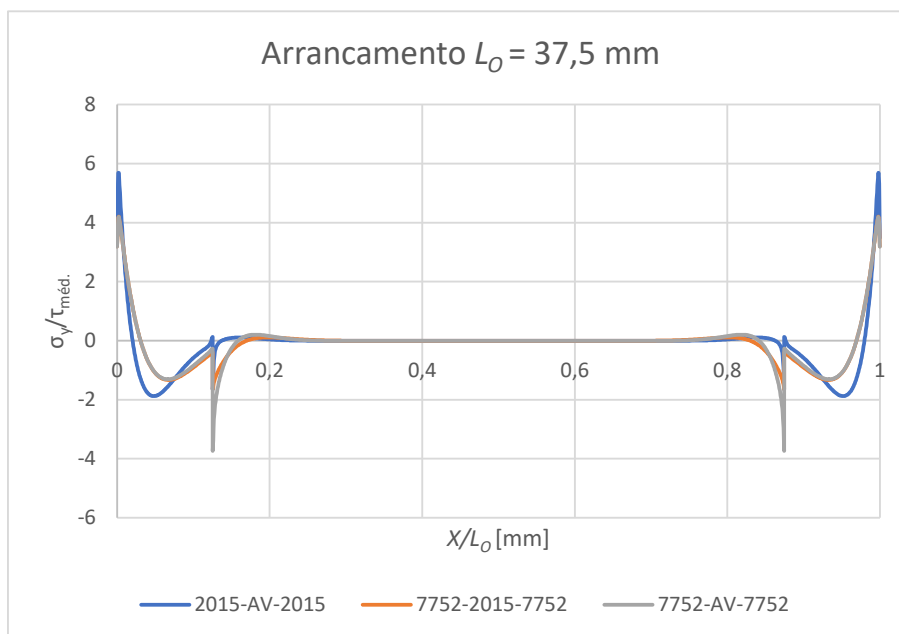


Figura 54 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=37,5$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.

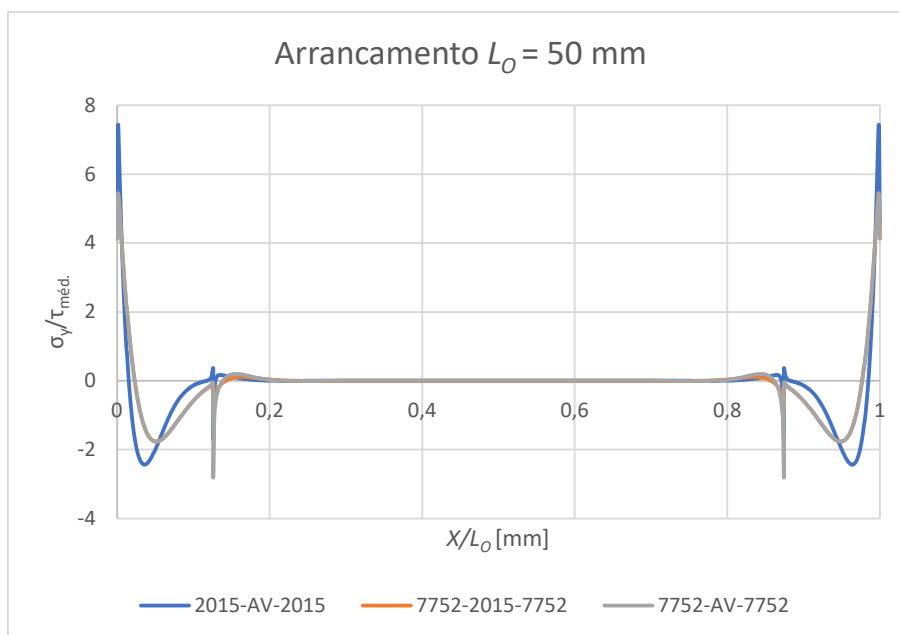


Figura 55 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=50$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.

Pode-se novamente constatar simetria nas curvas de tensão σ_y , assim como um pico de tensão compressiva nas zonas de transição entre adesivos ($x/L_0 \approx 0,1$ e $x/L_0 \approx 0,9$).

Para $L_0=12,5$ mm a junta com a configuração 2015-AV-2015 apresenta os picos de tração e compressão mais elevados. No entanto, para $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm apesar dos picos de tração mais elevados também se verificarem na configuração 2015-AV-2015, os picos de compressão máxima são verificados nas juntas do tipo 7752-AV-7752. Entre sobreposições, as tensões máximas tendem a aumentar quanto

maior for o valor de L_0 , sendo esse aumento consistente nas três configurações de adesivo. Relativamente aos adesivos, ao comparar os valores máximos de arrancamento, não existe virtualmente diferença entre as combinações 7752-2015-7752 e 7752-AV-7752 que denotam valores inferiores em cerca de 25% em relação à combinação 2015-AV-2015.

- Dois adesivos, proporção 33%-34%-33%

Da Figura 40 à Figura 44 são demonstrados os dados resultantes da análise numérica da distribuição de tensões de arrancamento para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente nas juntas de dois adesivos com a proporção 33%-34%-33%. Verifica-se um comportamento similar à proporção 12,5%-75%-12,5% com a configuração 2015-AV-2015 a devolver os valores mais elevados de pico de tensão. Constata-se também que os picos de compressão intermédios se moveram em X, consequência da diferente posição da fronteira de transição entre adesivos ($x/L_0 \approx 0,33$ e $x/L_0 \approx 0,66$). Independentemente de L_0 , a configuração 2015-AV-2015 apresenta valores superiores em 25% quando comparada à 7752-2015-7752, que por sua vez tem variações sempre inferiores a 0,5% em relação à configuração 7752-AV-7752. Nas três configurações de adesivo existe um aumento da tensão σ_y máxima de 97% de $L_0=12,5$ mm para $L_0=25$ mm; um aumento de 45% de $L_0=25$ mm para $L_0=37,5$ mm e um aumento de 30% de $L_0=37,5$ mm para $L_0=50$ mm.

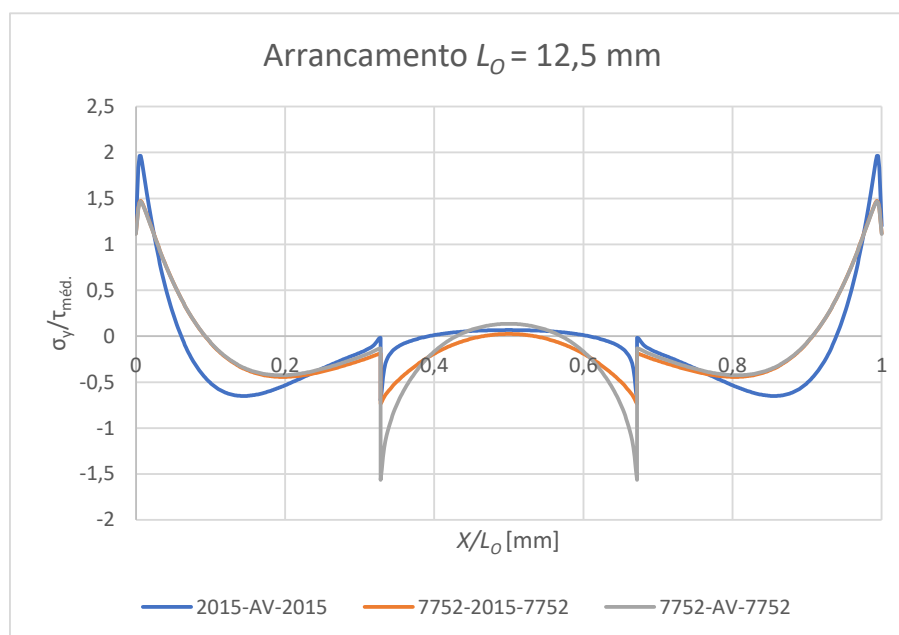


Figura 56 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=12,5$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.

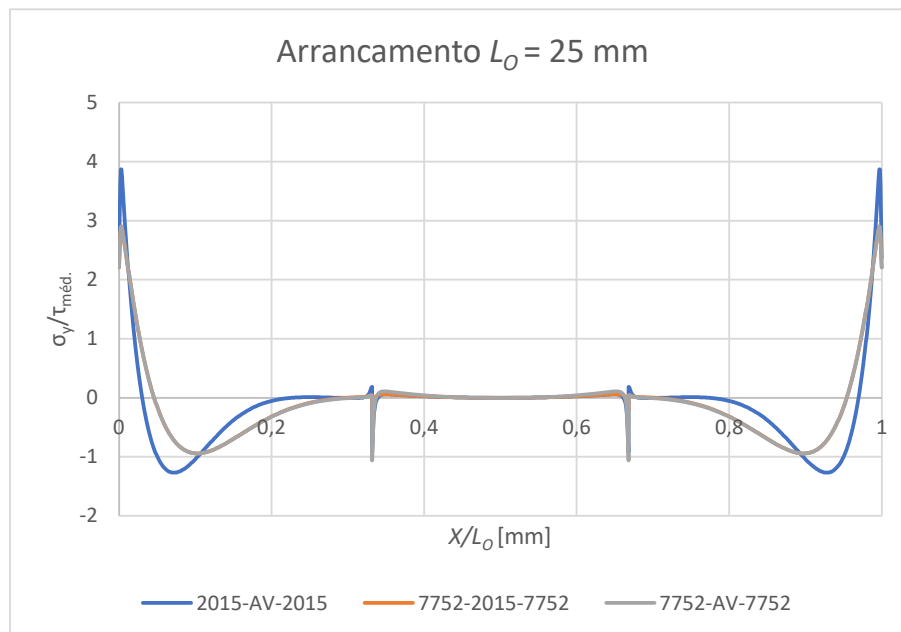


Figura 57 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=25$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.

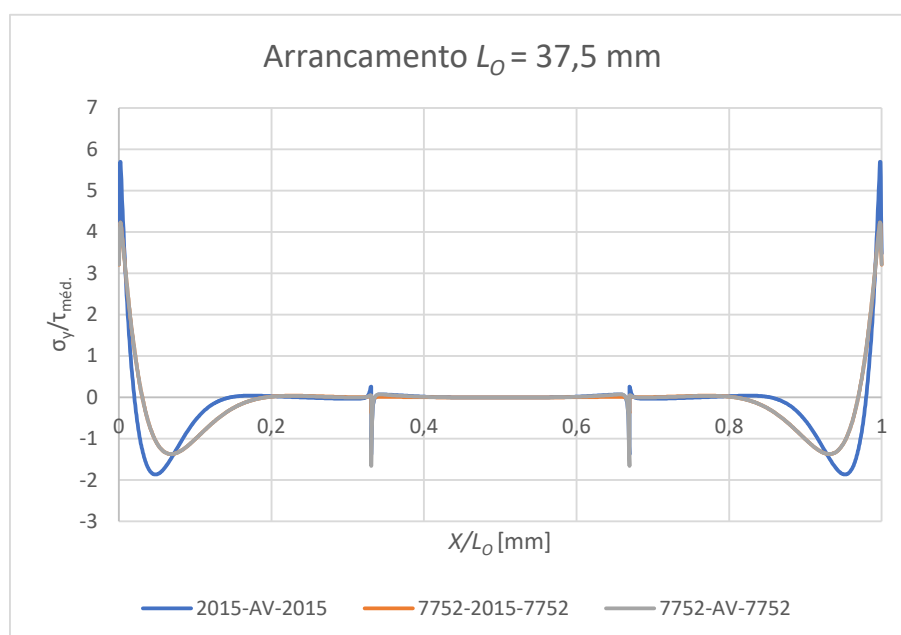


Figura 58 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=37,5$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.

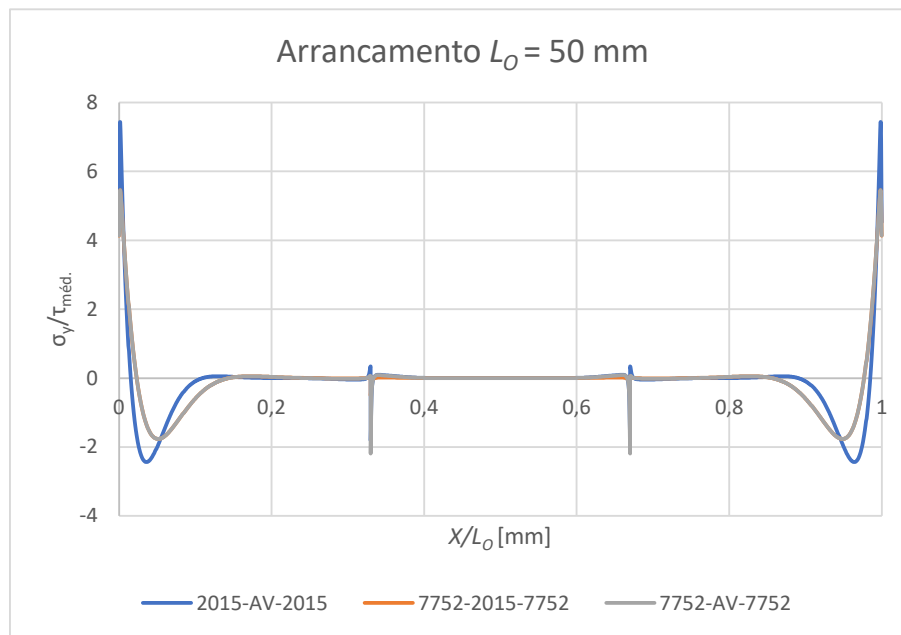


Figura 59 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=50$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.

- Dois adesivos, proporção 25%-50%-25%

Na Figura 45 à Figura 48 é possível constatar os valores relativos à análise numérica da distribuição de tensões σ_y para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente nas juntas de dois adesivos com a proporção 25%-50%-25%.

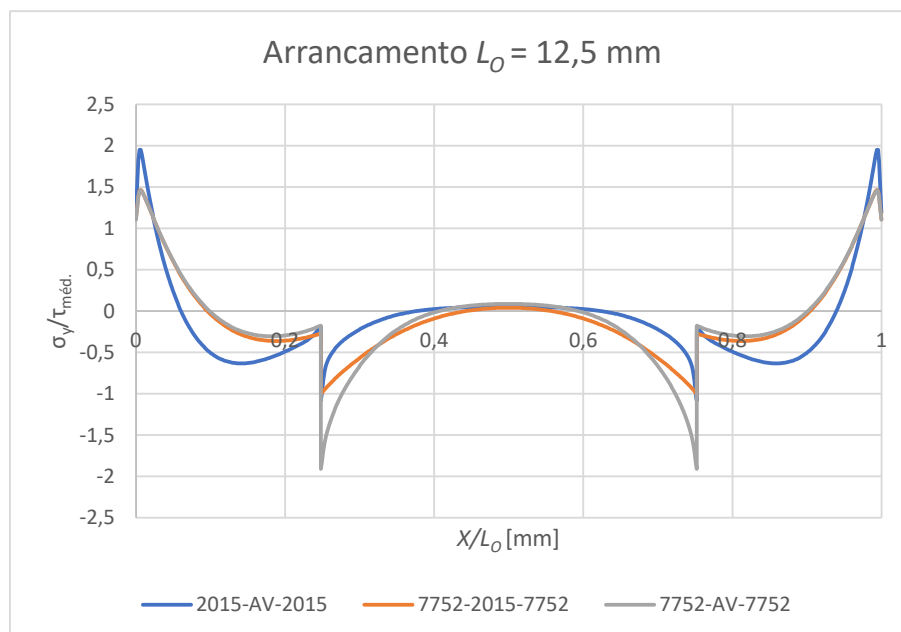


Figura 60 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=12,5$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.

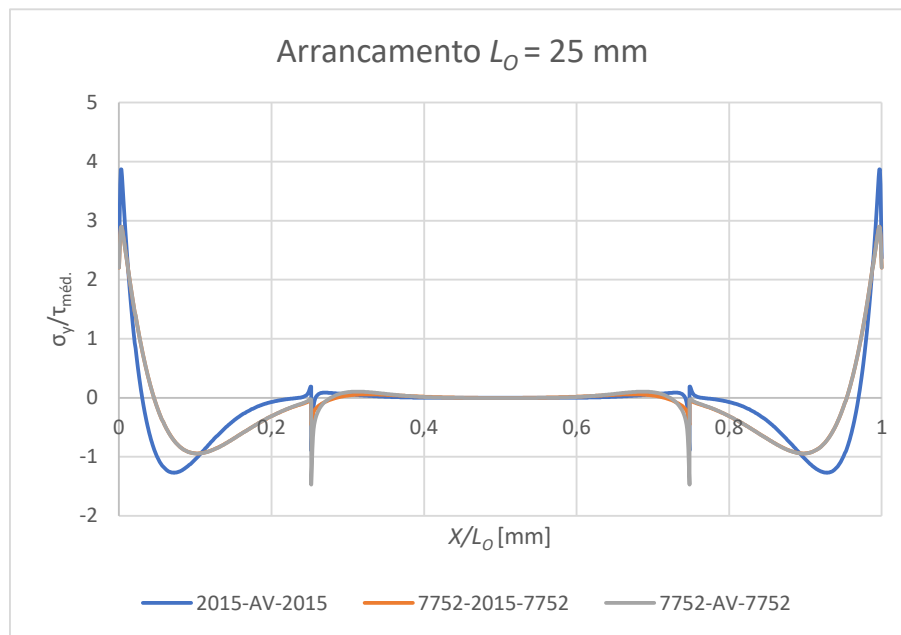


Figura 61 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=25$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.

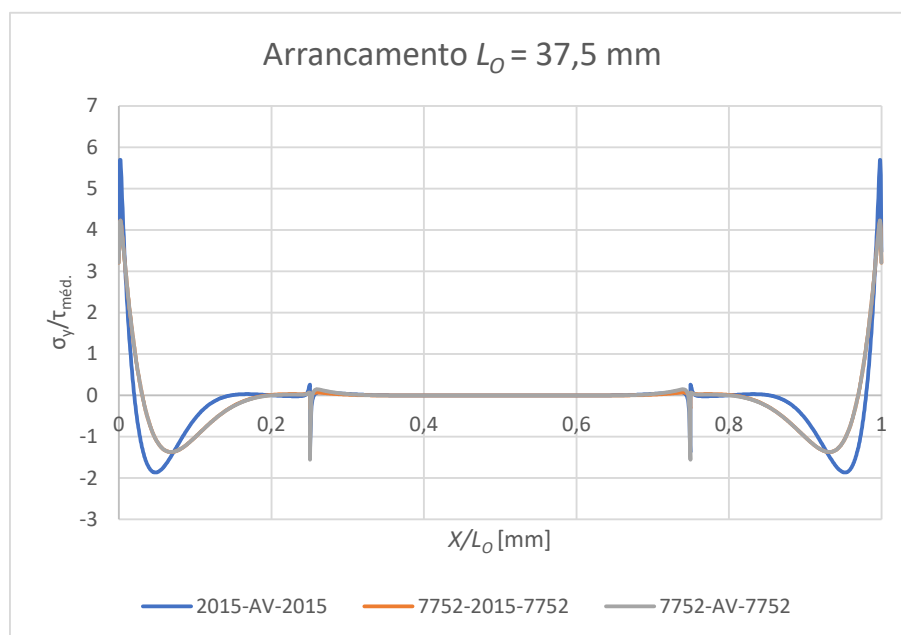


Figura 62 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=37,5$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.

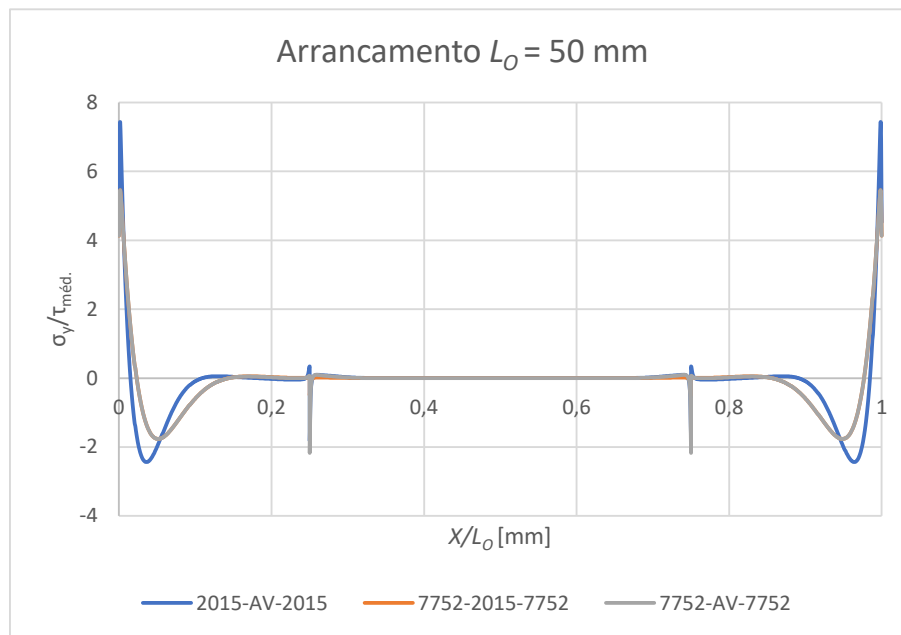


Figura 63 – Distribuição das tensões σ_y para $L_0=50$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.

Similarmente às proporções anteriormente comentadas, a configuração 2015-AV-2015 é a que demonstra os valores de pico mais elevados, enquanto ambas as configurações 7752-2015-7752 e 7752-AV-7752 apresentam uma redução de cerca de 25%. No que a L_0 diz respeito, constata-se também que as tensões σ_y aumentam conforme o aumento de L_0 , em proporção similar aos casos já comentados.

3.2.3.2.2 Tensões de corte

- Adesivo simples

Na Figura 49 à Figura 52 é possível verificar os resultados da análise numérica da distribuição de tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, respetivamente. É possível constatar novamente que existe simetria nas curvas de tensão τ_{xy} o que localiza os seus picos nas extremidades da junta ($x/L_0=0$ e $x/L_0=1$). É também visível que a distribuição de tensões na zona central da junta é muito próxima de zero. Este efeito é causado pelo fenómeno da deformação diferencial dos substratos, já que esta se apresenta nula na extremidade livre dos substratos e aumenta gradualmente até à extremidade contrária. Devido a este facto, observam-se picos de tensão τ_{xy} nas duas extremidades de sobreposição, enquanto este efeito é cancelado na zona intermédia da ligação. Semelhante aos resultados obtidos nas curvas de tensão σ_y , é no adesivo Araldite® AV138 onde se verificam as tensões de corte mais elevadas, com valores máximos de $\tau_{xy}/\tau_{méd.}$ de 4,65 para $L_0=12,5$ mm; 9,23 para $L_0=25$ mm; 13,72 para $L_0=37,5$ mm e 18,08 para $L_0=50$ mm. Os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 apresentaram valores inferiores em cerca de 44% e 61% respetivamente pois apresentam maior flexibilidade quando comparados com o

adesivo Araldite® AV138, mantendo-se esta redução consistente nas restantes sobreposições.

Comparando os diferentes L_0 , ambos os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 dobram os seus valores de tensão de corte ao incrementar de $L_0=12,5$ mm para $L_0=25$ mm, enquanto o adesivo Sikaforce® 7752 aumenta 86% na mesma situação. No incremento de $L_0=25$ mm para $L_0=37,5$ mm, e $L_0=37,5$ mm para $L_0=50$ mm, os três adesivos aumentam respetivamente os seus valores em aproximadamente 48% e 31%.

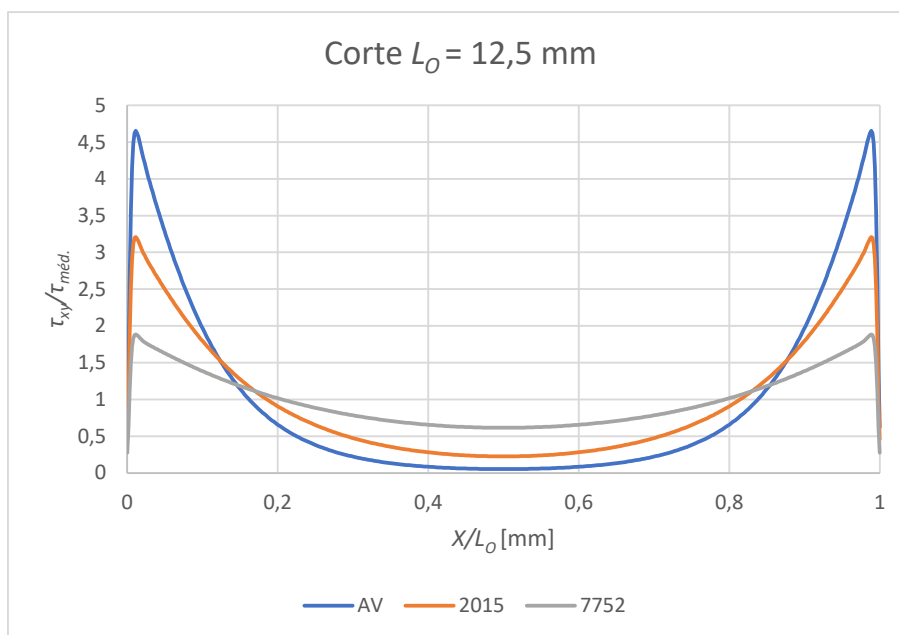


Figura 64 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm em junta de adesivo simples.

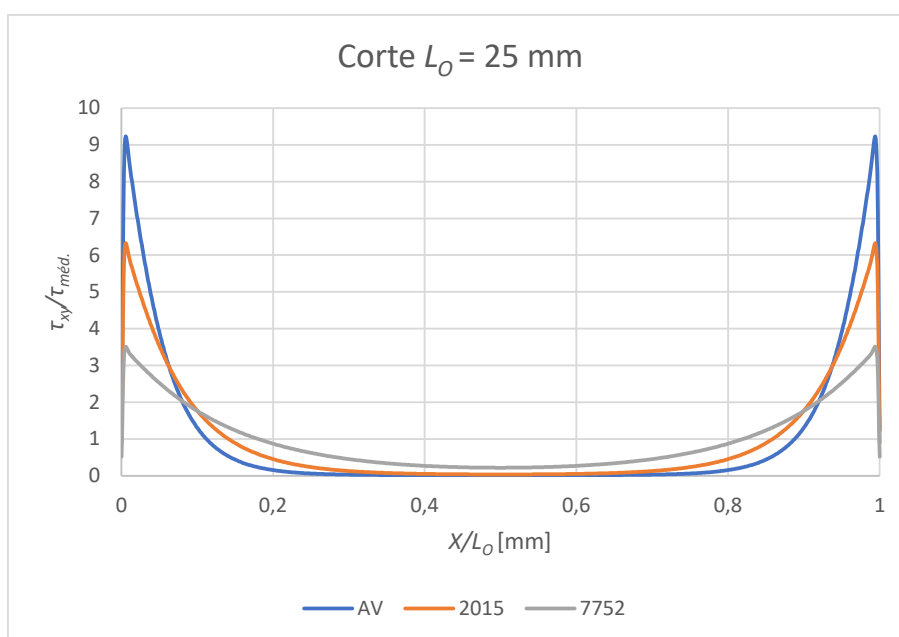


Figura 65 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=25$ mm em junta de adesivo simples.

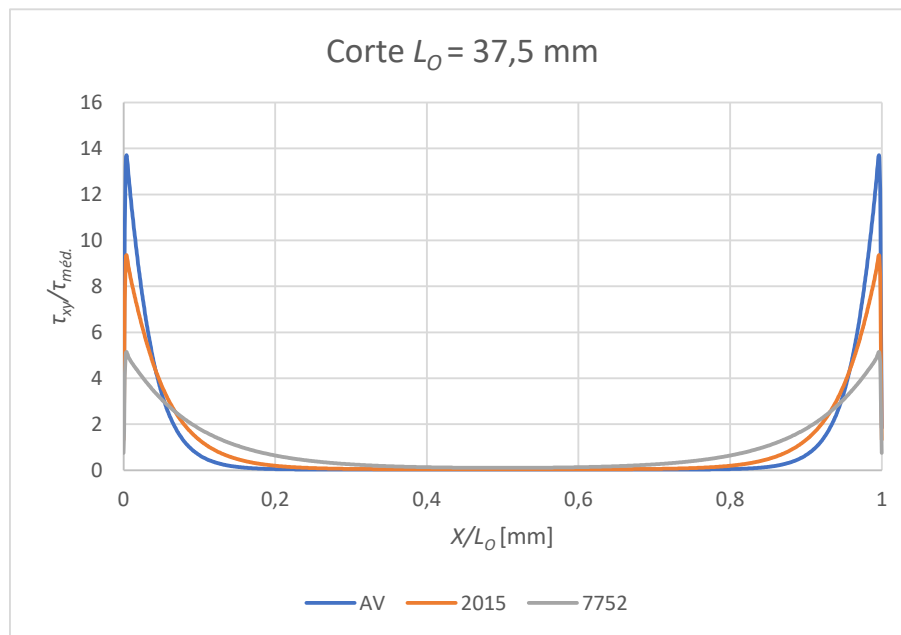


Figura 66 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=37,5$ mm em junta de adesivo simples.

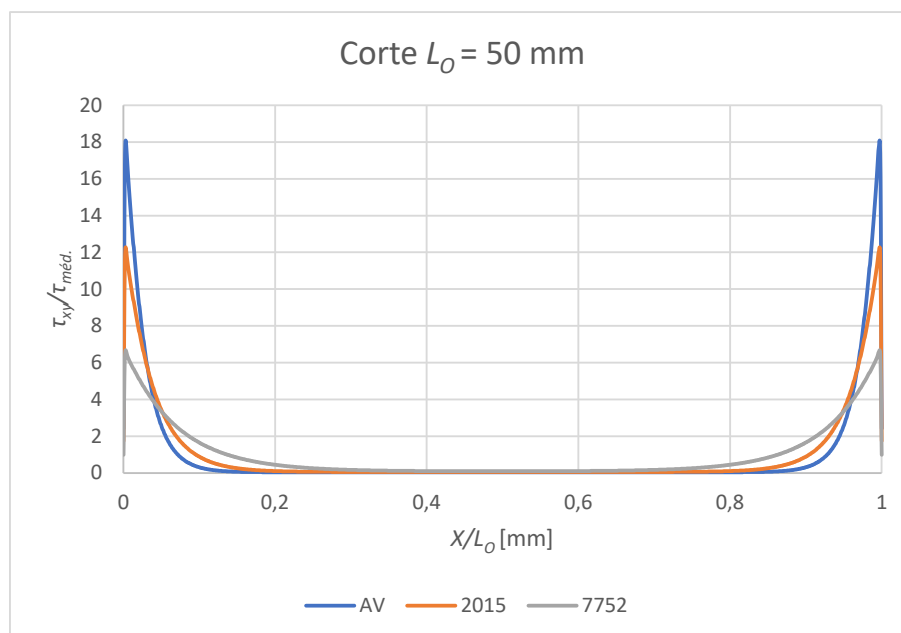


Figura 67 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=50$ mm em junta de adesivo simples.

- Dois adesivos, proporção 12,5%-75%-12,5%

Da Figura 53 à Figura 56 pode-se consultar os valores da análise numérica da distribuição de tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm nas juntas de dois adesivos com a proporção 12,5%-75%-12,5%, respectivamente.

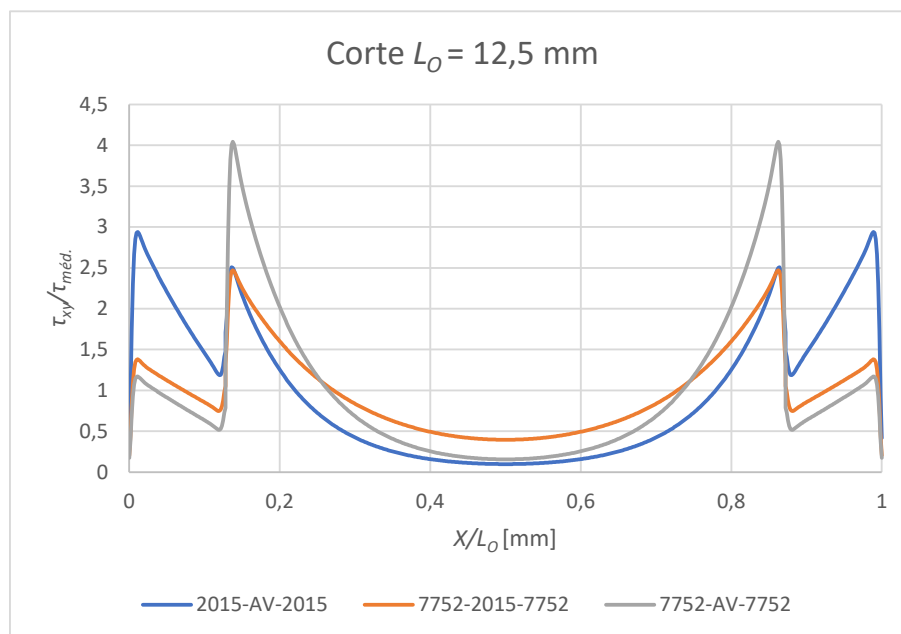


Figura 68 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.

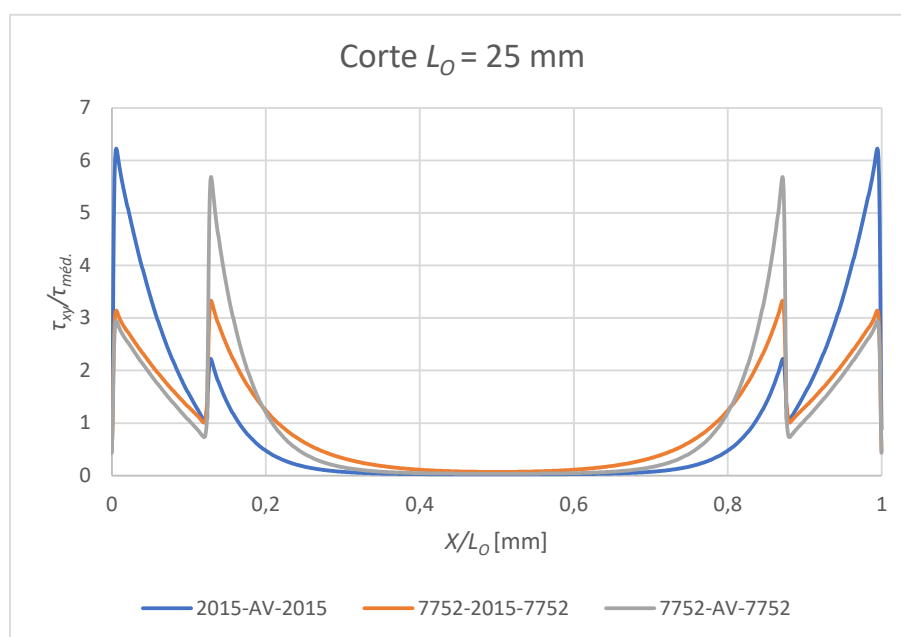


Figura 69 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=25$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.

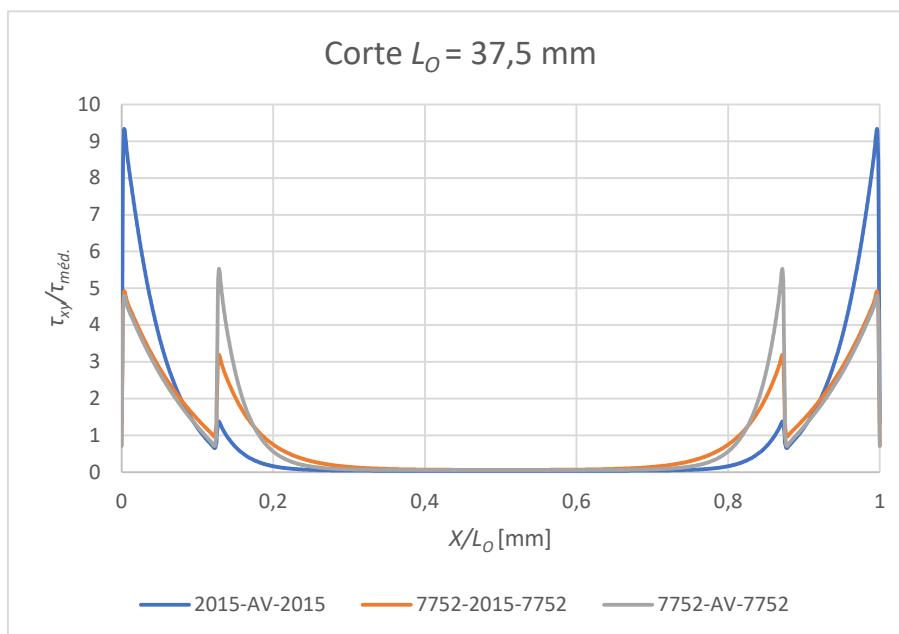


Figura 70 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=37,5$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.

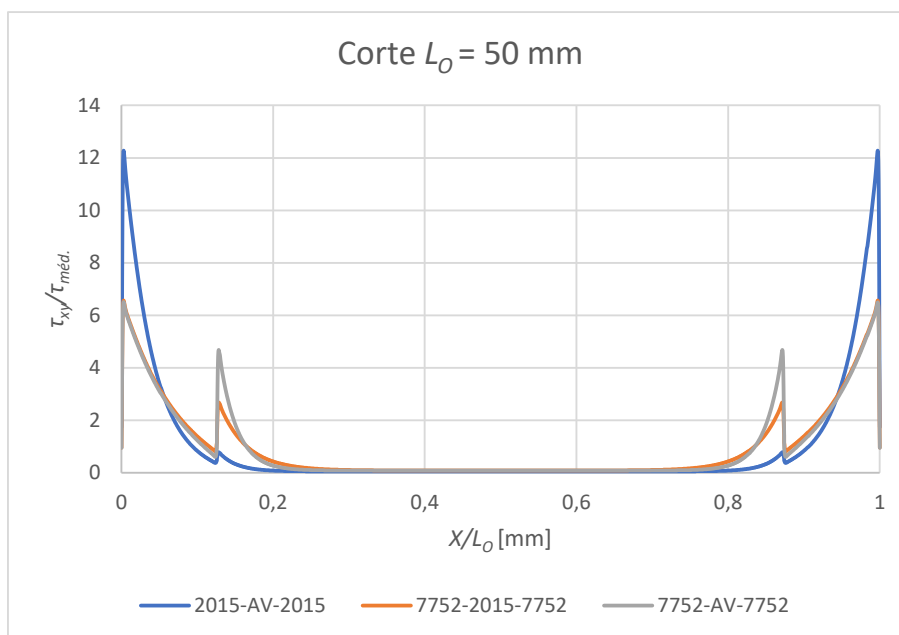


Figura 71 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=50$ mm e proporção 12,5%-75%-12,5%, em junta de dois adesivos.

É possível constatar que as curvas de tensão de corte mantêm o aspeto simétrico, embora sejam visíveis picos de tensão não só nas extremidades como nas fronteiras de mudança de adesivo ($x/L_0 \approx 0,1$ e $x/L_0 \approx 0,9$).

A configuração 7752-AV-7752 é a que apresenta valores mais elevados de tensão de corte $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ máximo de 4,04 para $L_0=12,5$ mm, contribuindo para esse facto as zonas de fronteira de adesivo. Nas restantes sobreposições é novamente a configuração

2015-AV-2015 que detém os valores máximos de tensão τ_{xy} presentes nas extremidades da junta.

De um modo geral é a configuração 7752-2015-7752 que apresenta menores valores de pico, embora para $L_0=50$ mm a diferença para a configuração 7752-AV-7752 seja inferior a 1%. De salientar também a pequena variação entre $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm na configuração 7752-AV-7752 (respetivamente 5,69 e 5,54). Nesta configuração a variação rondou os 3%, enquanto nas restantes se verificaram aumentos de 50% na maior sobreposição.

- Dois adesivos, proporção 33%-34%-33%

A Figura 57 à Figura 60 demonstram os dados resultantes da análise numérica da distribuição de tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm nas juntas de dois adesivos com a proporção 33%-34%-33%, respetivamente. Como seria espectável, os picos de tensão τ_{xy} de fronteira de adesivo mudaram de posição de forma a acompanhar as novas proporções dos adesivos ($x/L_0 \approx 0,3$ e $x/L_0 \approx 0,6$). Ao comparar configurações, constata-se que é a configuração 2015-AV-2015 que apresenta consistentemente valores mais elevados de tensão de corte com valores de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ máximos de 3,20 para $L_0=12,5$ mm; 6,34 para $L_0=25$ mm; 9,37 para $L_0=37,5$ mm e 12,28 para $L_0=50$ mm. Estes picos ocorrem sempre nas extremidades da junta. Relevante também é a diferença entre a configuração 7752-2015-7752 e 7752-AV-7752, que demonstra uma variação inferior a 0,5% nas três maiores sobreposições, apesar de variar cerca de 35% para $L_0=12,5$ mm.

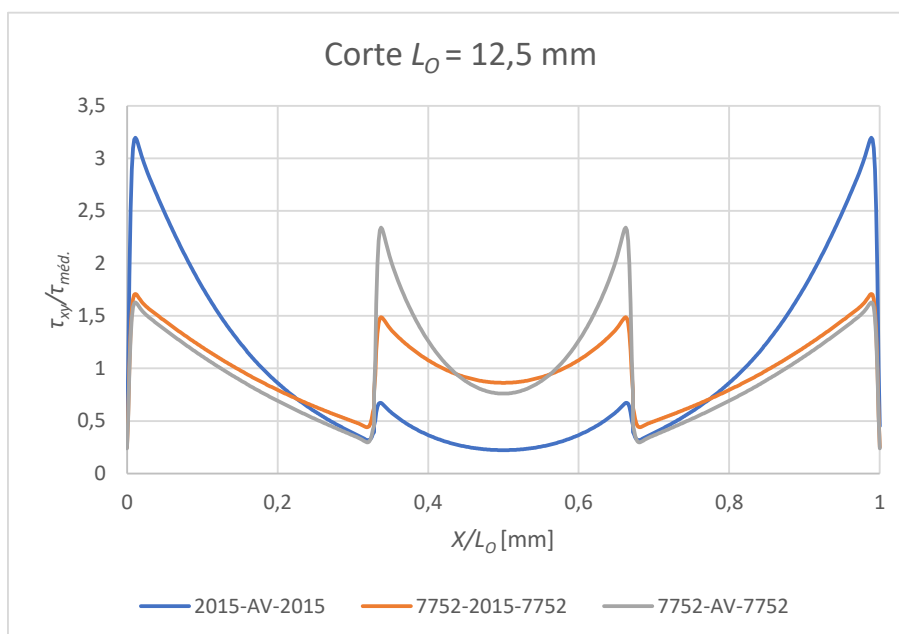


Figura 72 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.

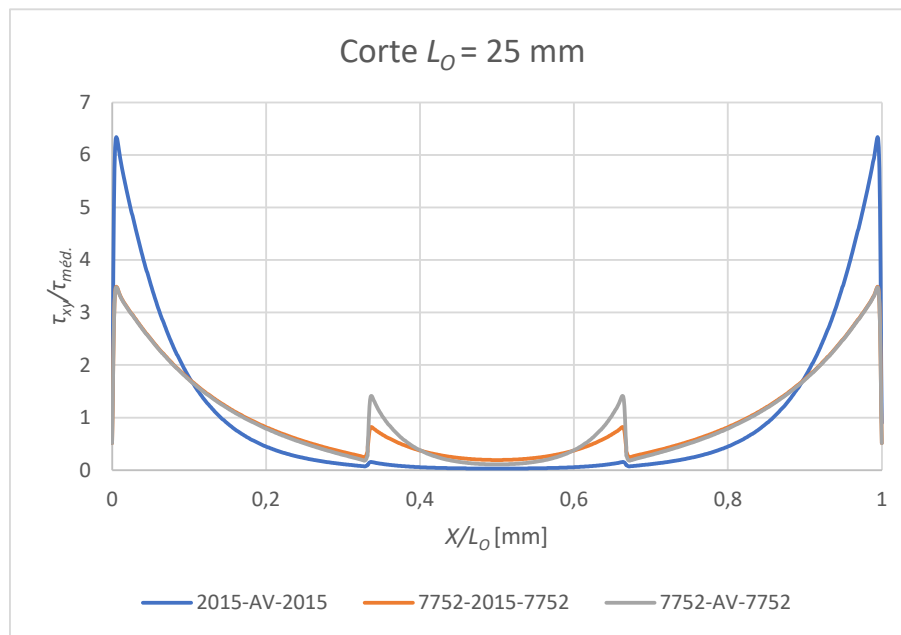


Figura 73 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=25 \text{ mm}$ e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.

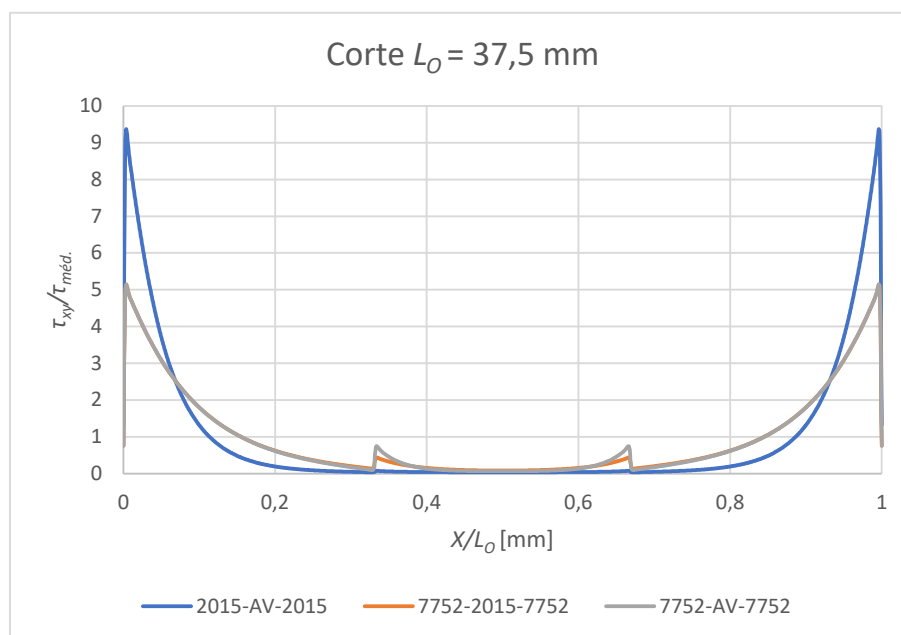


Figura 74 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=37,5 \text{ mm}$ e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.

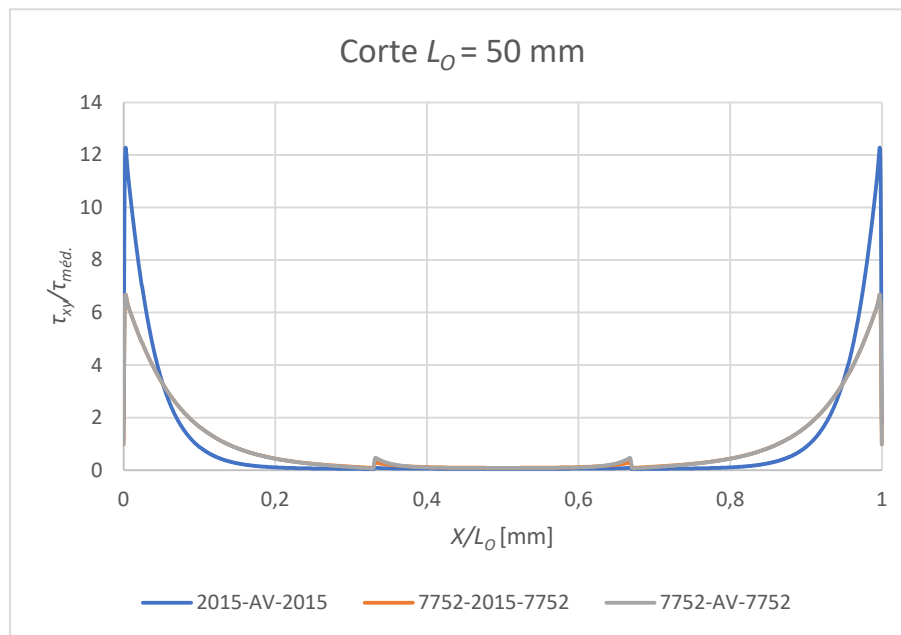


Figura 75 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=50$ mm e proporção 33%-34%-33%, em junta de dois adesivos.

- Dois adesivos, proporção 25%-50%-25%

Da Figura 61 à Figura 64 é possível constatar os valores relativos à análise numérica da distribuição de tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm, $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm nas juntas de dois adesivos com a proporção 25%-50%-25%, respetivamente.

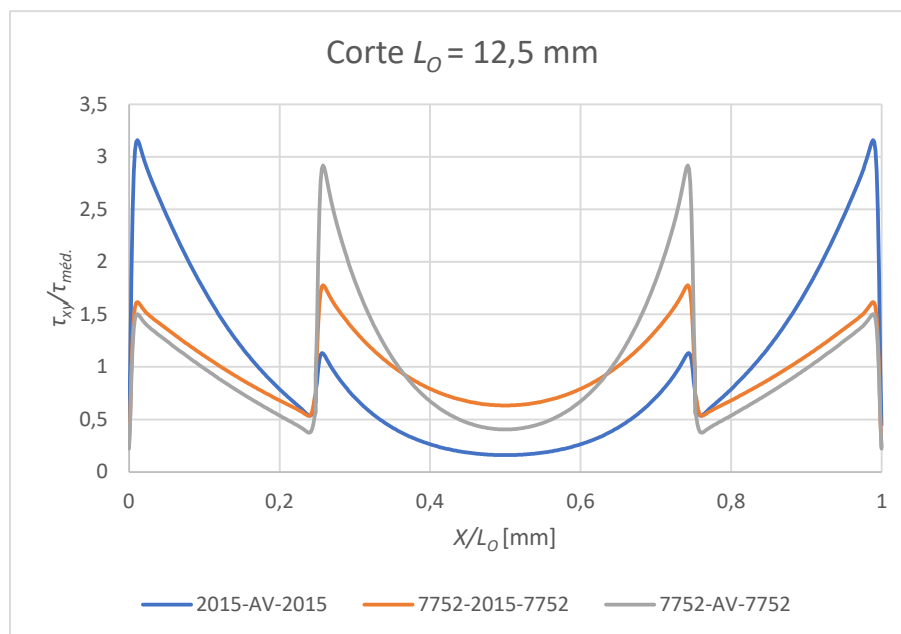


Figura 76 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=12,5$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.

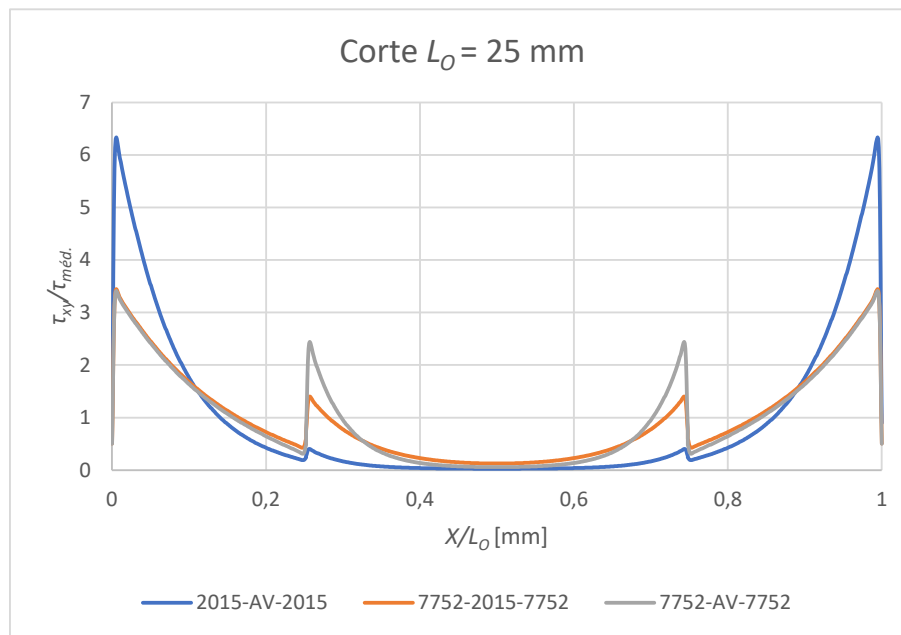


Figura 77 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=25$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.

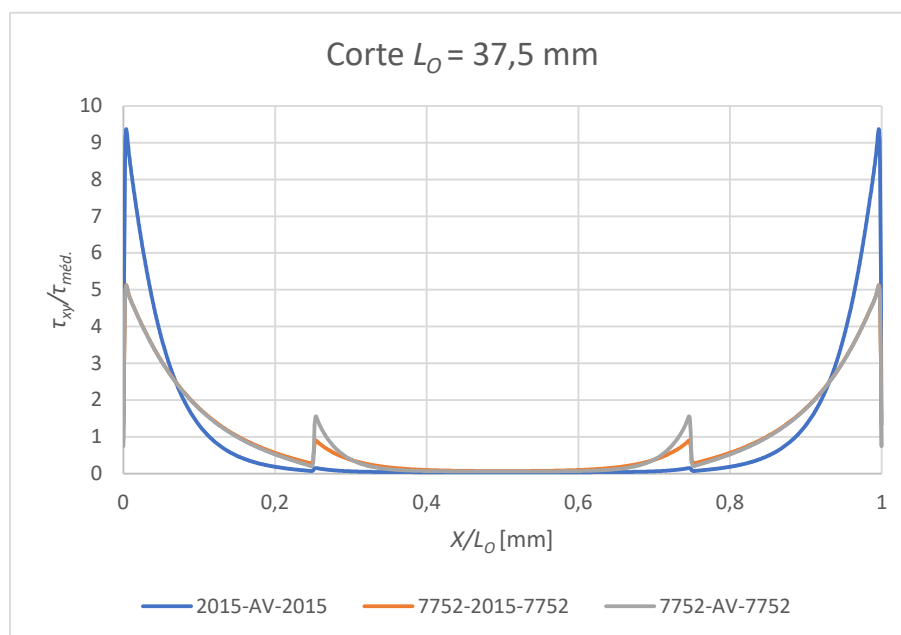


Figura 78 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=37,5$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.

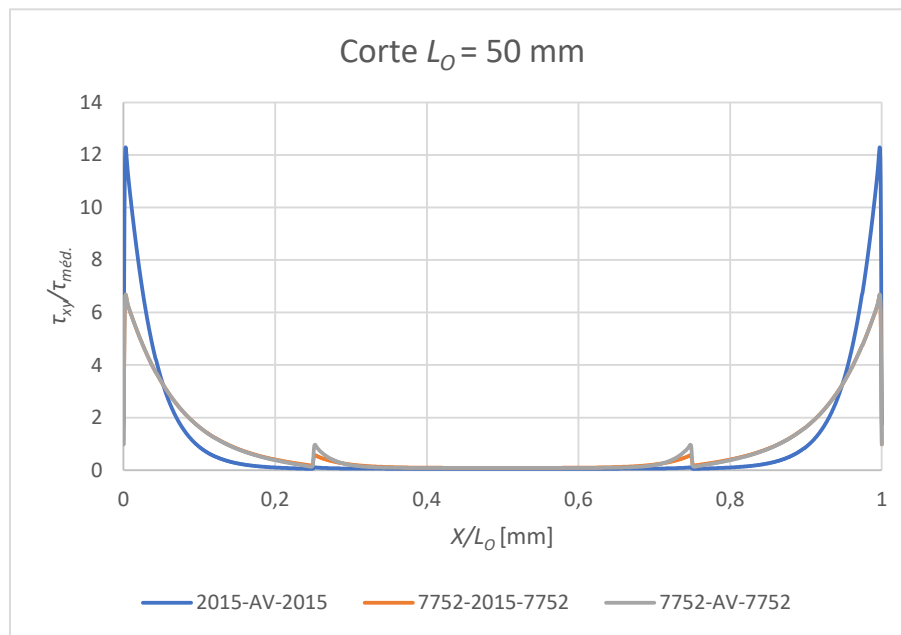


Figura 79 – Distribuição das tensões τ_{xy} para $L_0=50$ mm e proporção 25%-50%-25%, em junta de dois adesivos.

Tal como na proporção anterior, é a configuração 2015-AV-2015 que apresenta maiores valores de pico em todos os casos de estudo, com um valor máximo de $\tau_{xy}/\tau_{méd.}$ de 3,16 para $L_0=12,5$ mm e sofrendo incrementos de 45% nas restantes sobreposições. Semelhante também ao caso anteriormente comentado, é a diferença entre a configuração 7752-2015-7752 e 7752-AV-7752 que demonstra uma variação inferior a rondar o 1% nas três maiores sobreposições, enquanto varia em 65% para $L_0=12,5$ mm. A configuração 7752-AV-7752 incrementa apenas 17% na tensão máxima $\tau_{xy}/\tau_{méd.}$ na passagem de $L_0=12,5$ mm para $L_0=25$ mm, enquanto as restantes configurações duplicam o seu valor. Para as restantes sobreposições, as três configurações revelam ter um comportamento similar entre si.

3.2.3.3 Validação do modelo numérico

No presente subcapítulo é feita a validação do modelo numérico através da verificação do acordo entre os dados obtidos numericamente e experimentalmente.

Na Figura 80 é possível consultar o gráfico comparativo entre dados experimentais e numéricos para juntas simples de Araldite® 2015. Para estas juntas, os resultados experimentais foram similares aos obtidos numericamente. Para $L_0=37,5$ mm a variação de $P_{máx.}$ foi inferior a 1% enquanto para as restantes sobreposições este valor rondou os 3%. Numericamente foi também possível capturar o fenómeno de plastificação dos aderentes nos L_0 de maior comprimento.

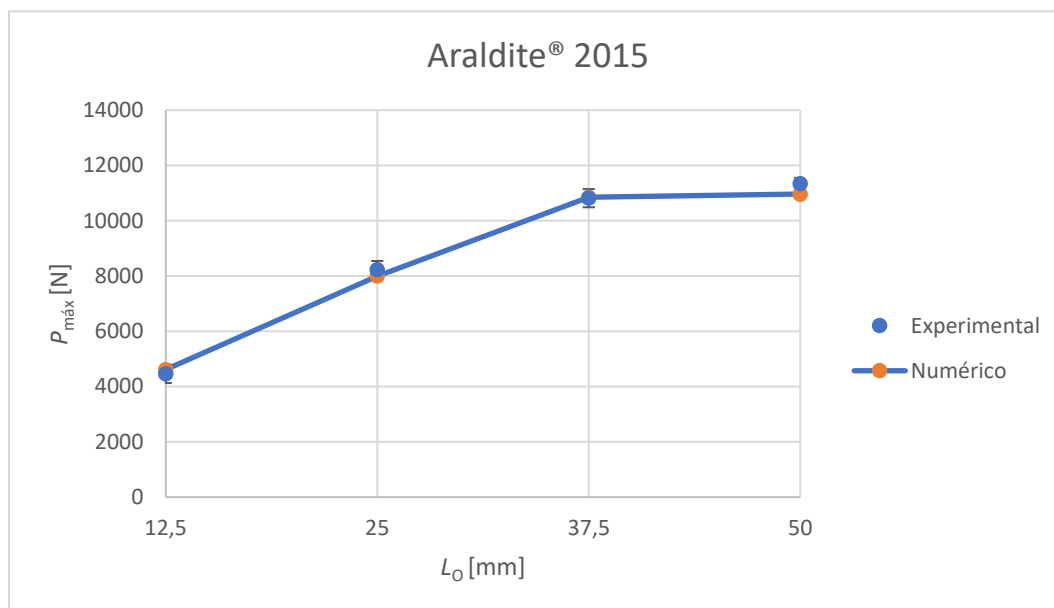


Figura 80 – Comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas simples de Araldite® 2015.

Na Figura 80 pode-se observar graficamente a comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas simples de Sikaforce® 7752. Para esta configuração de junta, os valores de $P_{máx.}$ obtidos experimentalmente foram notoriamente superiores aos numéricos. Para $L_0=12,5$ mm, $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm as diferenças de $P_{máx.}$ foram de 11%, 23% e 16%, respectivamente, valor que decaiu para apenas 2% no restante L_0 . Esta diferença deve-se à modelação de uma camada de adesivo dúctil com um MDC triangular, enquanto para $L_0=50$ mm este efeito é anulado devido à alteração do modo de rotura, para falha no substrato.

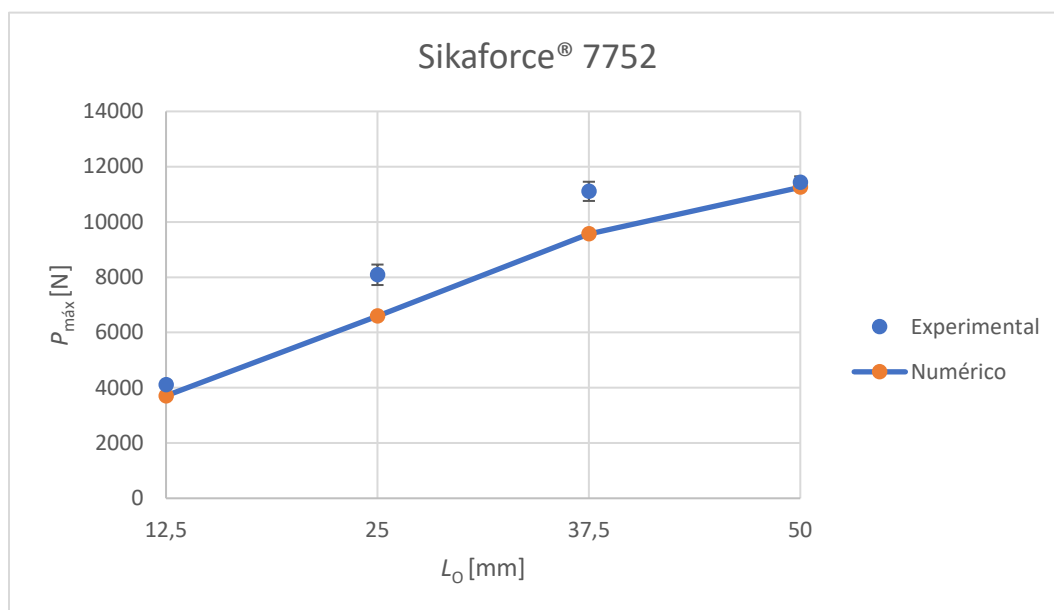


Figura 81 – Comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas simples de Sikaforce® 7752.

A Figura 82 demonstra o gráfico da comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas de dois adesivos na configuração 7752-2015-7752. Embora os valores numéricos mantenham concordância com os experimentais, são estes últimos que se revelam superiores. Nas juntas de configuração 7752-2015-7752, para $L_0=12,5$ mm a diferença de $P_{m\acute{a}x.}$ é de apenas 1%, aumentando para 7% para $L_0=25$ mm. Para os restantes L_0 a variação rondou os 3%. Mais uma vez se verifica que os modelos numéricos conseguem capturar a alteração do modo de rotura para L_0 mais elevados, com correspondente quebra da tendência de crescimento de $P_{m\acute{a}x.}$.

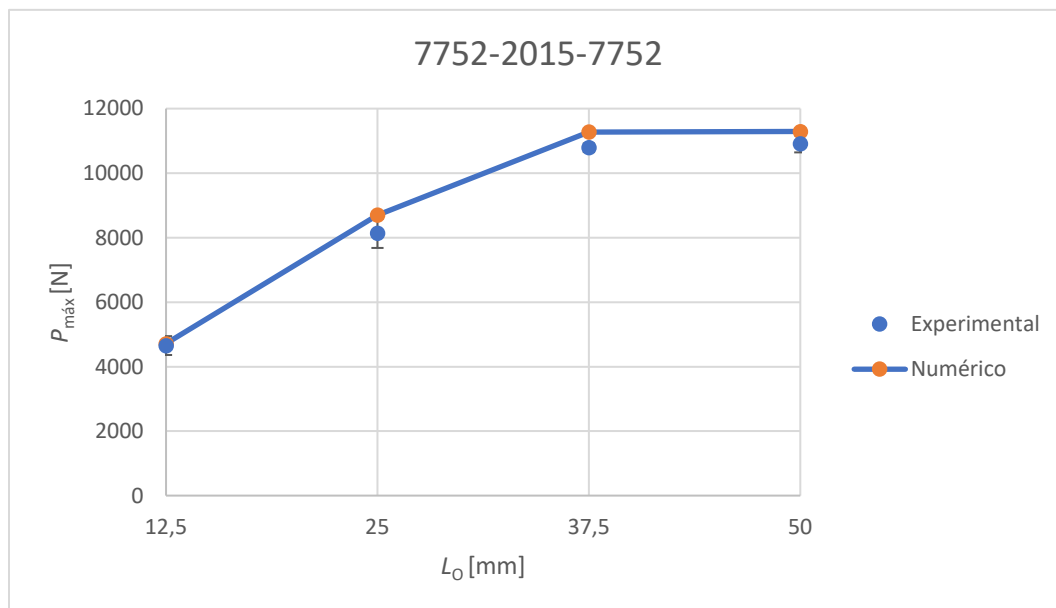


Figura 82 – Comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas de dois adesivos na configuração 7752-2015-7752.

A Figura 83 organiza graficamente os dados comparativos experimentais e numéricos para juntas de dois adesivos na configuração 7752-AV-7752. As juntas desta configuração mantêm a tendência da configuração anteriormente discutida, com uma diferença de $P_{m\acute{a}x.}$ de 9% para $L_0=12,5$ mm e a estabilizar na casa dos 4% para os restantes L_0 . Para $L_0=37,5$ e 50 mm foi possível capturar a rotura prematura dos aderentes, que se observou nos ensaios experimentais.

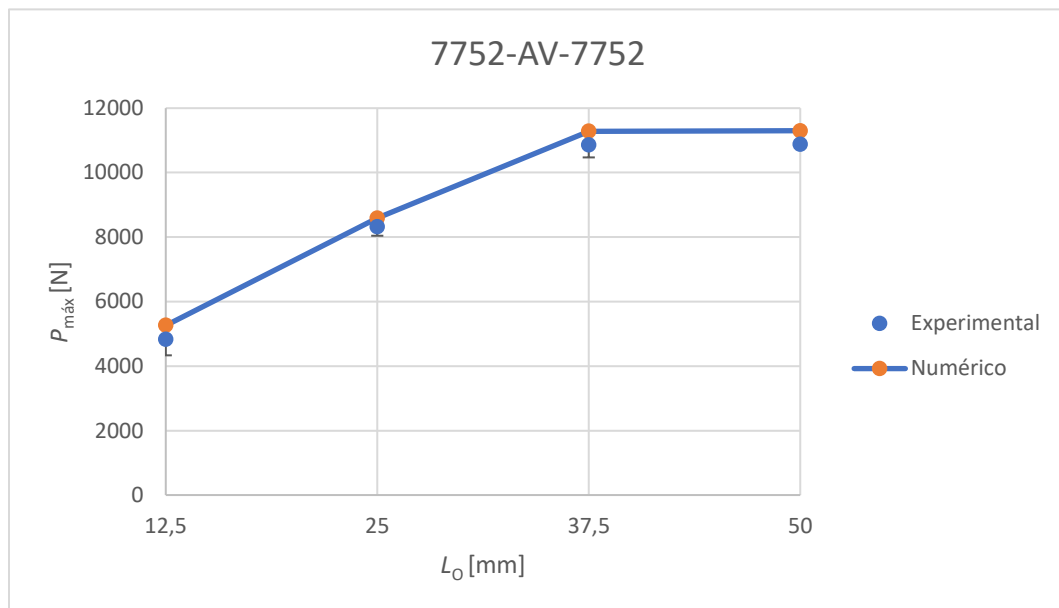


Figura 83 – Comparação entre dados experimentais e numéricos para juntas de dois adesivos na configuração 7752-AV-7752.

3.2.3.4 Resistência das juntas

No presente subcapítulo são enumerados e discutidos os resultados do estudo numérico relativo à resistência das juntas em análise. Para efeitos de discussão, é feita a comparação percentual do incremento de resistência de cada um dos casos em estudo em relação aos valores obtidos para a junta de adesivo simples Araldite® AV138, uma vez que este foi o caso com pior desempenho de todas as combinações analisadas.

- Proporção 12,5%-75%-12,5%

Na Figura 84 é possível consultar os valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos através de análise numérica para a proporção 12,5%-75%-12,5%. A Tabela 26 compila os valores do gráfico apresentado e compara-os sob forma percentual. Verifica-se que a configuração com melhor desempenho para a proporção em análise é a 7752-2015-7752 para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm, e tanto esta como a 7752-AV-7752 para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm. Por outro lado, devido à característica pouco dúctil do seu adesivo, é a junta simples de Araldite® AV138 que apresenta os valores mais baixos de resistência. As juntas concebidas com dois adesivos apresentam os valores mais elevados de resistência. Para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm, este fato é visível quando se comparam as juntas mais resistentes de adesivo simples (Araldite® 2015) com a homóloga de dois adesivos (7752-2015-7752) – existe um incremento de resistência de 14% e 23%, respetivamente. No entanto, para os dois L_0 superiores, a diferença é apenas de 4% em $L_0=37,5$ mm e inferior a 0,5% para $L_0=50$ mm, devido à plastificação

dos aderentes, o que, para estes substratos, pode tornar mais vantajoso a utilização de apenas um adesivo ao simplificar o seu processo de fabrico.

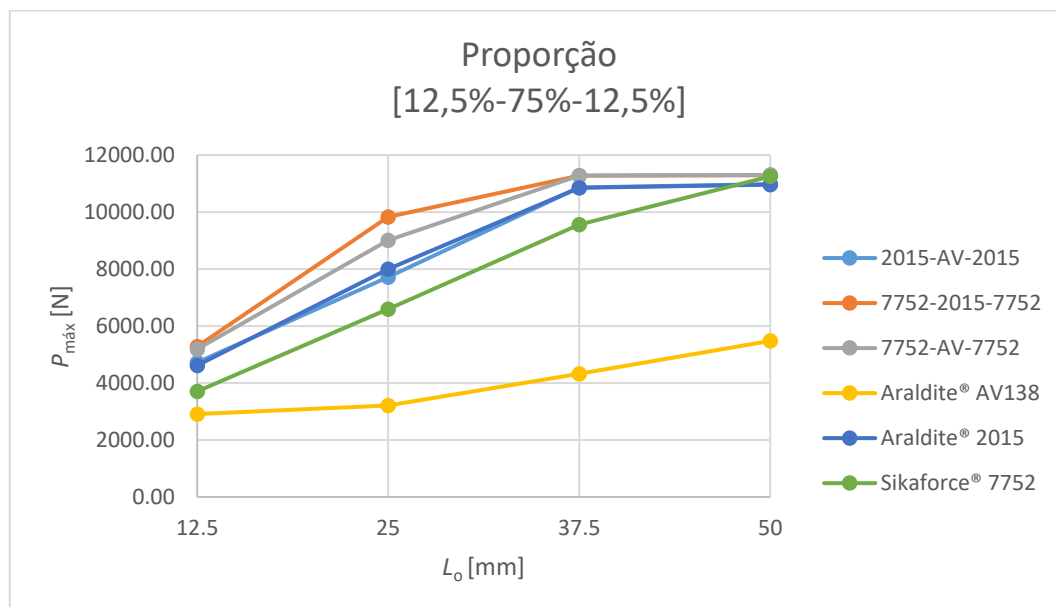


Figura 84 – Representação gráfica dos valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos para a proporção 12,5%-75%-12,5%.

Tabela 26 – Valores de $P_{\text{máx}}$ e incremento percentual de resistência para a proporção 12,5%-75%-12,5%.

Configuração \ L_o	12,5 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm
Araldite® AV138	2911,80 N	3207,82 N	4322,41 N	5478,44 N
Araldite® 2015	4616,86 N (59%)	7998,72 N (149%)	10848,51 N (151%)	10961,89 N (100%)
Sikaforce® 7752	3706,76 N (27%)	6591,78 N (105%)	9564,87 N (121%)	11251,43 N (105%)
2015-AV-2015	4722,30 N (62%)	7722,55 N (141%)	10862,11 N (151%)	10980,43 N (100%)
7752-2015-7752	5281,43 N (81%)	9833,88 N (207%)	11278,67 N (161%)	11296,84 N (106%)
7752-AV-7752	5189,07 N (78%)	9011,00 N (181%)	11281,69 N (161%)	11298,62 N (106%)

- Proporção 33%-34%-33%

A Figura 85 e a Tabela 27 demonstram, respectivamente, a comparação gráfica e numérica dos valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos em simulação ABAQUS® para a proporção 33%-34%-33%.

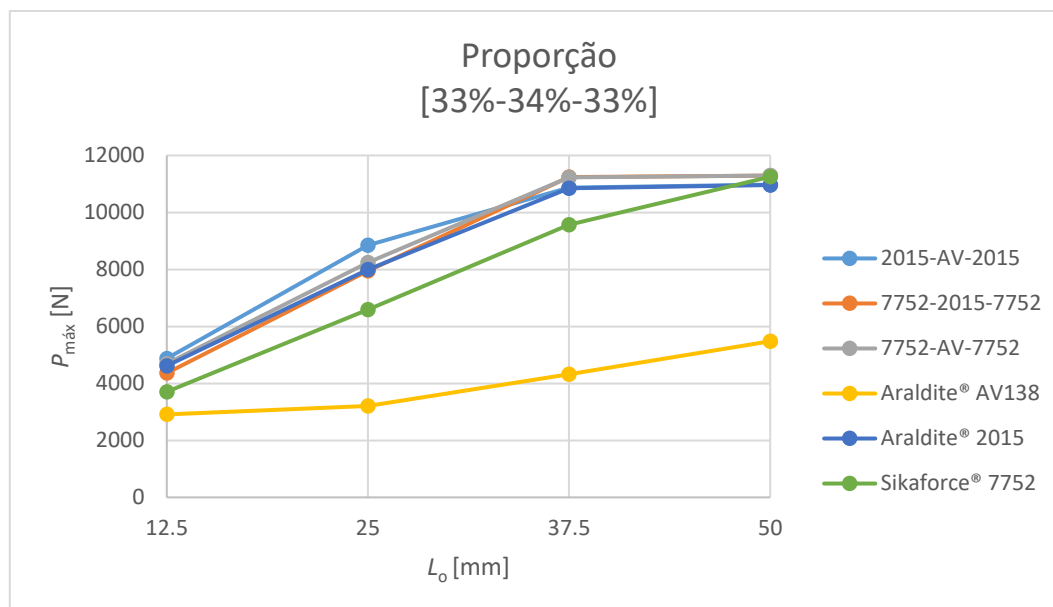


Figura 85 – Representação gráfica dos valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos para a proporção 33%-34%-33%.

Tabela 27 – Valores de $P_{\text{máx.}}$ e incremento percentual de resistência para a proporção 33%-34%-33%.

Configuração \ L_o	12,5 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm
Araldite® AV138	2911,80 N	3207,82 N	4322,41 N	5478,44 N
Araldite® 2015	4616,86 N (59%)	7998,72 N (149%)	10848,51 N (151%)	10961,89 N (100%)
Sikaforce® 7752	3706,76 N (27%)	6591,78 N (105%)	9564,87 N (121%)	11251,43 N (105%)
2015-AV-2015	4876,17 N (67%)	8850,37 N (176%)	10866,42 N (151%)	10976,18 N (100%)
7752-2015-7752	4362,27 N (50%)	7946,48 N (148%)	11238,29 N (160%)	11292,10 N (106%)
7752-AV-7752	4691,91 N (61%)	8246,07 N (157%)	11227,51 N (160%)	11295,69 N (106%)

Nesta proporção observa-se que, para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm, a configuração com melhor desempenho é a 2015-AV-2015, que demonstra um incremento de 67% e 176%, respetivamente, para as juntas homólogas de Araldite® AV138. Nas dois restantes L_0 as configurações 7752-2015-7752 e 7752-AV-7752 demonstram o $P_{\text{máx.}}$ mais elevado e virtualmente o mesmo desempenho, embora com diferença bastante reduzida para a configuração 2015-AV-2015.

Ao comparar a junta de adesivo simples com melhor desempenho (Araldite® 2015), pode ser verificado que, para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm, esta revela um desempenho superior à configuração 7752-2015-7752. Para os restantes L_0 , o desempenho é ligeiramente inferior, com uma diferença de resistência de aproximadamente 3%.

- Proporção 25%-50%-25%

Na Figura 86 pode ser observado o gráfico do comparativo dos valores de $P_{\text{máx.}}$ relativos à proporção 25%-50%-25% devolvidos pela simulação ABAQUS®. Na Tabela 28 são compilados os valores presentes no gráfico anterior e assinaladas as configurações com melhor desempenho.

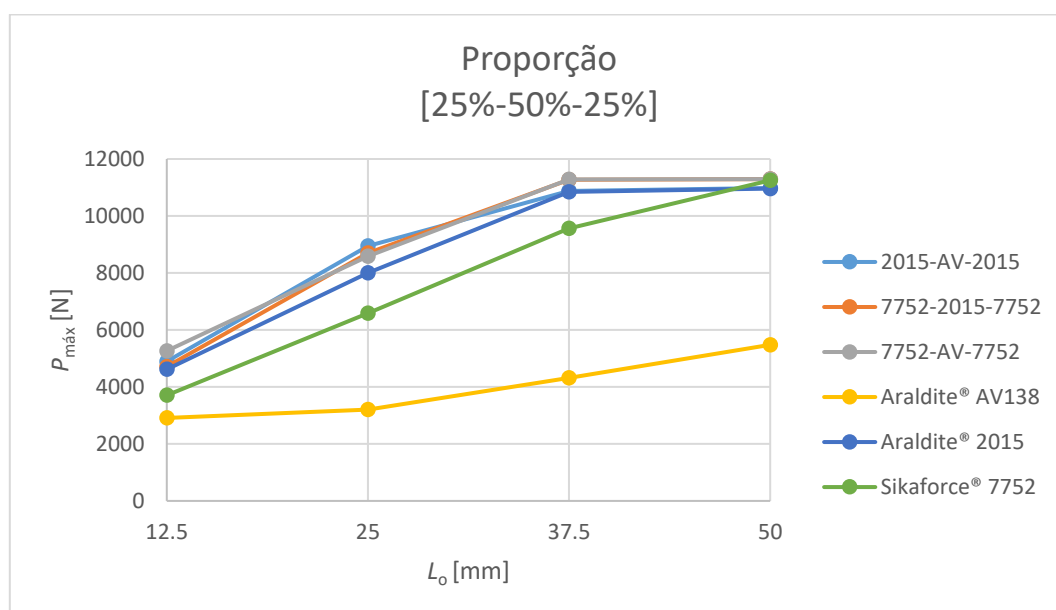


Figura 86 – Representação gráfica dos valores de $P_{\text{máx.}}$ obtidos para a proporção 25%-50%-25%.

Com variações similares à proporção anteriormente discutida, é a configuração 7752-AV-7752 que revela melhor desempenho na proporção 25%-50%-25%, exceto para $L_0=25$ mm, com a configuração 7752-2015-7752 a obter valores apenas ligeiramente inferiores para a $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm. Para $L_0=25$ mm, a configuração recomendada é 2015-AV-2015.

De um modo geral, a junta simples de adesivo Araldite® 2015 demonstra novamente desempenho similar, embora ligeiramente inferior, às juntas de dois adesivos, principalmente à medida que L_0 aumenta.

Tabela 28 – Valores de $P_{máx.}$ e incremento percentual de resistência para a proporção 25%-50%-25%.

Configuração \ L_0	12,5 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm
Araldite® AV138	2911,80 N	3207,82 N	4322,41 N	5478,44 N
Araldite® 2015	4616,86 N (59%)	7998,72 N (149%)	10848,51 N (151%)	10961,89 N (100%)
Sikaforce® 7752	3706,76 N (27%)	6591,78 N (105%)	9564,87 N (121%)	11251,43 N (105%)
2015-AV-2015	4895,60 N (68%)	8948,55 N (179%)	10873,29 N (152%)	10982,27 N (100%)
7752-2015-7752	4713,91 N (62%)	8703,53 N (171%)	11276,31 N (161%)	11293,93 N (106%)
7752-AV-7752	5265,50 N (81%)	8587,16 N (168%)	11279,28 N (161%)	11294,13 N (106%)

3.2.3.5 Energia dissipada

No presente subcapítulo são apresentados e discutidos os valores de U obtidos através da simulação ABAQUS®. Para auxiliar a comparação de valores, são apresentadas as variações de energia em percentagem em relação aos valores obtidos para a junta de adesivo simples Araldite® AV138.

- Proporção 12,5%-75%-12,5%

Na Figura 87 é possível observar os valores de U obtidos através de análise numérica para a proporção 12,5%-75%-12,5%. A Tabela 29 agrega os valores do gráfico apresentado e compara-os sob forma percentual. À semelhança do já verificado no subcapítulo anterior, a junta simples de adesivo Araldite® AV138 é a que apresenta os menores valores de U , devido à característica pouco dúctil desse adesivo.

Pode-se constatar que, para $L_0=12,5$ mm, a junta com maior U é a junta simples de adesivo Sikaforce® 7752 com um valor de 1,85 J, um incremento de 5% sobre a configuração 7752-2015-7752. Para $L_0=25$ mm é a configuração 7752-2015-7752 que

obtem o maior valor de U (4,03 J). Nas duas restantes sobreposições é a configuração 7752-AV-7752 que demonstra maior energia dissipada (26,21 J e 33,91 J para $L_0=37,5$ e 50 mm, respetivamente). De notar que, para $L_0=50$ mm, a segunda configuração com maior valor de U é a junta de adesivo simples Araldite® 2015, com um valor de 25,65 J.

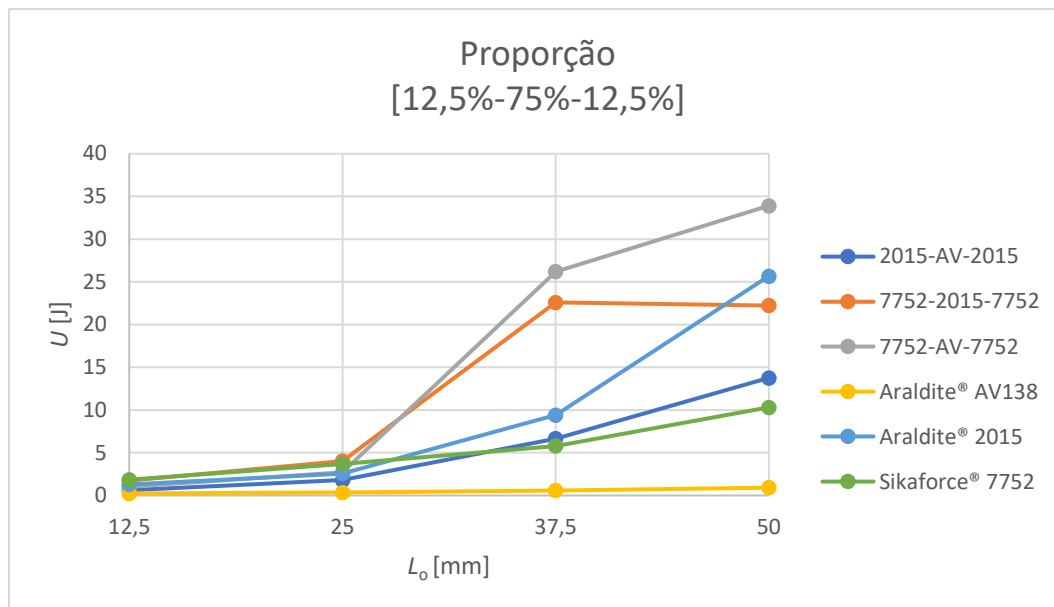


Figura 87 – Representação gráfica dos valores de U obtidos para a proporção 12,5%-75%-12,5%.

Tabela 29 – Valores de U e incremento percentual de resistência para a proporção 12,5%-75%-12,5%.

Configuração \ L_0	12,5 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm
Araldite® AV138	0,24 J	0,35 J	0,58 J	0,93 J
Araldite® 2015	1,30 J (440%)	2,56 J (630%)	9,40 J (1508%)	25,65 J (2645%)
Sikaforce® 7752	1,85 J (671%)	3,69 J (952%)	5,79 J (890%)	10,30 J (1002%)
2015-AV-2015	0,60 J (152%)	1,80 J (413%)	6,65 J (1037%)	13,75 J (1371%)
7752-2015-7752	1,75 J (631%)	4,03 J (1048%)	22,59 J (3763%)	22,23 J (2278%)
7752-AV-7752	1,01 J (323%)	2,71 J (671%)	26,21 J (4382%)	33,91 J (3528%)

- Proporção 33%-34%-33%

A Figura 88 e a Tabela 30 demonstram, respetivamente, a comparação gráfica e numérica dos valores de U obtidos em simulação ABAQUS® para a proporção 33%-34%-33%.

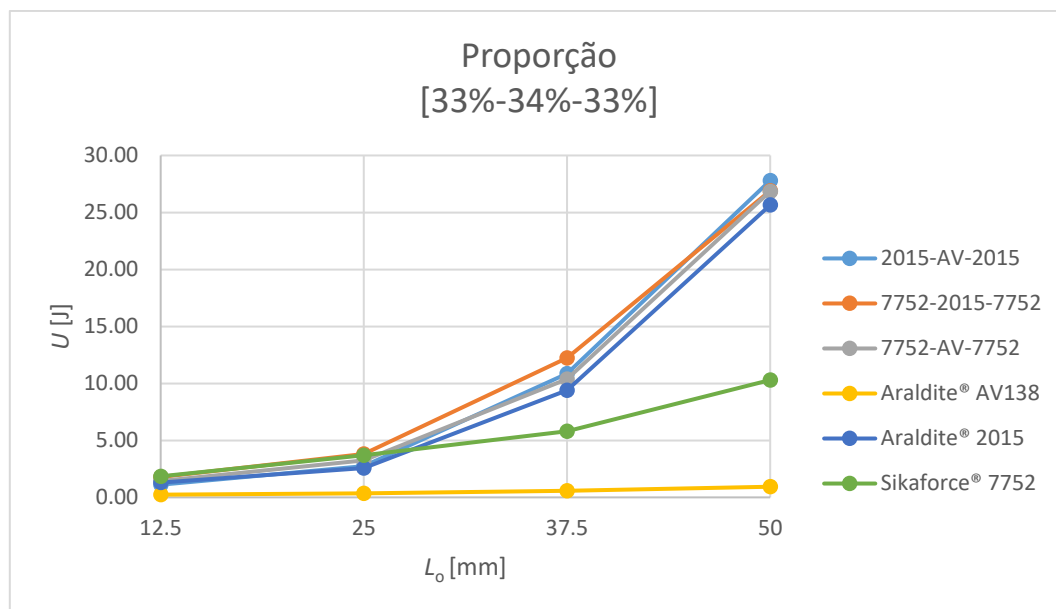


Figura 88 – Representação gráfica dos valores de U obtidos para a proporção 33%-34%-33%.

Para $L_0=12,5$ mm a configuração com maior valor de U é a junta simples de adesivo Sikaforce® 7752, com um valor de 1,85 J. De seguida, para $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm é a configuração 7752-2015-7752 que revela um valor energético mais elevado, com 3,80 J e 12,24 J, respetivamente. No entanto, para o caso de $L_0=25$ mm, o valor máximo de U para a junta simples de adesivo Sikaforce® 7752 é apenas 3% inferior (3,69 J). Finalmente, para $L_0=50$ mm, apesar de a configuração com maior U ser a 2015-AV-2015 com 27,80 J, tanto as restantes configurações de dois adesivos como a junta simples de adesivo Araldite® 2015 obtêm valores similares.

Tabela 30 – Valores de U e incremento percentual de resistência para a proporção 33%-34%-33%.

Configuração \ L_0	12,5 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm
Araldite® AV138	0,24 J	0,35 J	0,58 J	0,93 J
Araldite® 2015	1,30 J (440%)	2,56 J (630%)	9,40 J (1508%)	25,65 J (2645%)
Sikaforce® 7752	1,85 J (671%)	3,69 J (952%)	5,79 J (890%)	10,30 J (1002%)
2015-AV-2015	1,11 J (363%)	2,74 J (680%)	10,86 J (1756%)	27,80 J (2875%)
7752-2015-7752	1,79 J (645%)	3,80 J (982%)	12,24 J (1993%)	26,90 J (2779%)
7752-AV-7752	1,44 J (500%)	3,24 J (823%)	10,37 J (1674%)	26,85 J (2773%)

- Proporção 25%-50%-25%

Na Figura 89 pode-se visualizar o gráfico comparativo dos valores de U relativos à proporção 25%-50%-25% obtidos através de simulação ABAQUS®. Na Tabela 31 são agregados os valores presentes no gráfico anterior e assinaladas as configurações com melhor desempenho. Pode ser constatado que é a junta simples de Sikaforce® 7752 que apresenta, para $L_0=12,5$ mm, maior valor de U com 1,85 J. Em $L_0=25$ mm é a vez da configuração 7752-2015-7752 demonstrar maior valor de energia com 3,89 J. No entanto, quando comparada com a junta de Sikaforce® 7752, esta dissipa apenas 5% menos de energia. Para $L_0=37,5$ mm apresenta-se destacadamente a configuração 7752-2015-7752 com um valor de U de 22,56 J. Ao contrário das duas proporções anteriormente analisadas, para $L_0=50$ mm é evidente a proeminência da utilização de juntas de dois adesivos, pois as configurações 7752-AV-7752 e 2015-AV-2015 destacam-se das demais com valores de 42,22 J e 33,90 J, respetivamente. De notar que na posição seguinte se encontra a junta simples de adesivo Araldite® 2015 com aproximadamente o mesmo valor de U . De referir que esta junta simples apresenta resultados de U muito próximos da configuração 2015-AV-2015 para todos os L_0 , pelo que esta configuração de dois adesivos não apresenta vantagem para esta proporção de adesivos.

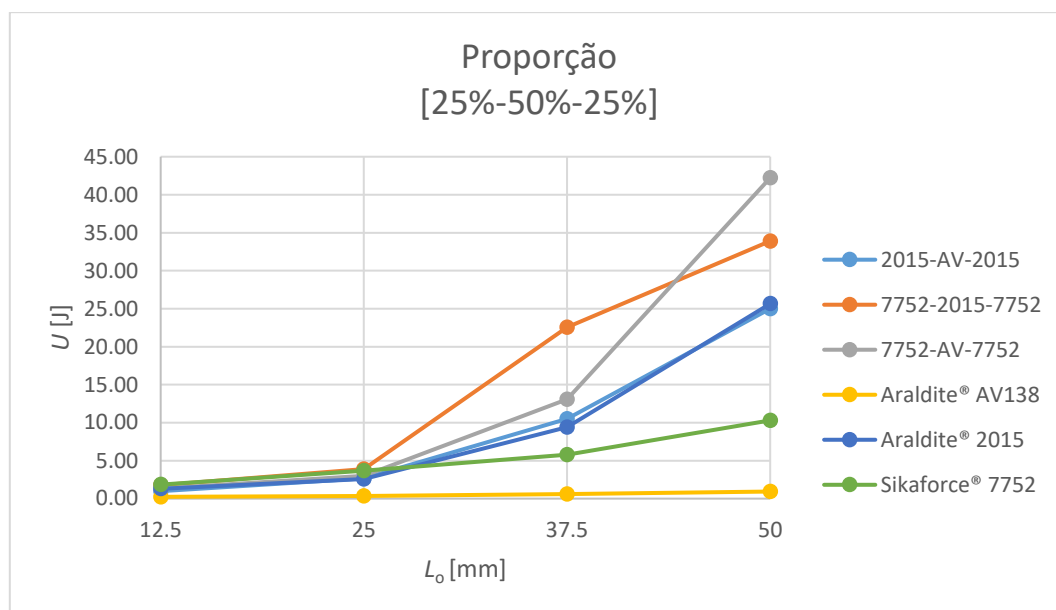


Figura 89 – Representação gráfica dos valores de U obtidos para a proporção 25%-50%-25%.

Tabela 31 – Valores de U e incremento percentual de resistência para a proporção 25%-50%-25%.

Configuração \ L_0	12,5 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm
Araldite® AV138	0,24 J	0,35 J	0,58 J	0,93 J
Araldite® 2015	1,30 J (440%)	2,56 J (630%)	9,40 J (1508%)	25,65 J (2645%)
Sikaforce® 7752	1,85 J (671%)	3,69 J (952%)	5,79 J (890%)	10,30 J (1002%)
2015-AV-2015	0,98 J (310%)	2,66 J (658%)	10,51 J (1697%)	25,01 J (2576%)
7752-2015-7752	1,77 J (637%)	3,89 J (1009%)	22,56 J (3758%)	33,90 J (3527%)
7752-AV-7752	1,34 J (457%)	3,02 J (760%)	13,09 J (2138%)	42,22 J (4418%)

3.2.3.6 Análise comparativa com JSS

No atual subcapítulo é realizada a comparação da resistência obtida numericamente entre juntas de degrau e JSS com um adesivo. Os dados numéricos referentes à resistência de JSS são resultantes do trabalho experimental levado a cabo por Barbosa [126].

A Figura 90 apresenta graficamente o comparativo entre a resistência obtida numericamente em JSS e juntas de degrau projetadas com o adesivo Araldite® AV138. Após a análise do gráfico é possível constatar a evidente supremacia que a JSS detém, a nível de resistência, sobre a junta de degrau. O incremento de resistência está balizado entre os 76% e 117%, conforme L_0 . Este fato deve-se à pouca espessura da zona de sobreposição dos aderentes, infligida pela maquinagem do degrau ($t_p=1,4$ mm), em comparação com a JSS ($t_p=3$ mm). Deste modo, os substratos estão sujeitos a maiores deformações longitudinais no provete. Uma vez que adesivo Araldite® AV138 apresenta característica frágil, este tem maior dificuldade em ligar com os picos de tensão gerados pela flexão excessiva, daí denotar pior comportamento.

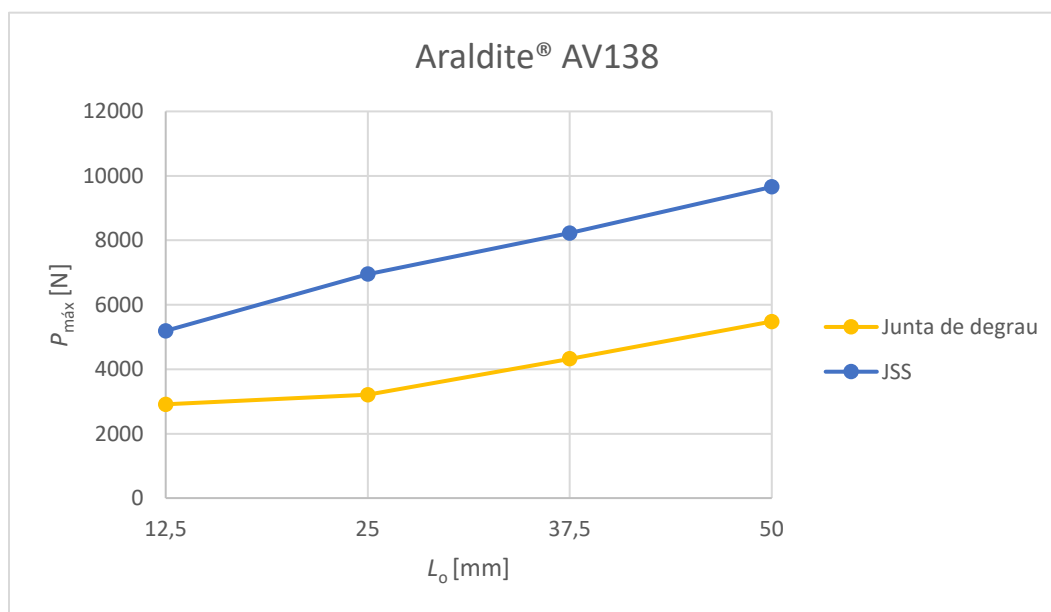


Figura 90 – Comparação de valores de $P_{máx}$. obtidos numericamente para juntas de degrau e JSS (Araldite® AV138).

Na Figura 91 está representada a comparação de resistência entre JSS e junta de degrau, agora para o adesivo Araldite® 2015. Posteriormente à observação do gráfico é mais uma vez aparente o melhor desempenho da JSS, embora a diferença para a configuração anteriormente comentada seja inferior comparativamente ao adesivo Araldite® AV138. Ao comparar os 3 menores L_0 contata-se que o incremento de resistência é consistente e ronda os 24%. Para $L_0=50$ mm ocorreu plastificação generalizada do aderente da junta em degrau, daí ser possível vislumbrar um patamar

na linha de gráfico a amarelo, outra desvantagem da baixa espessura na zona de colagem do aderente.

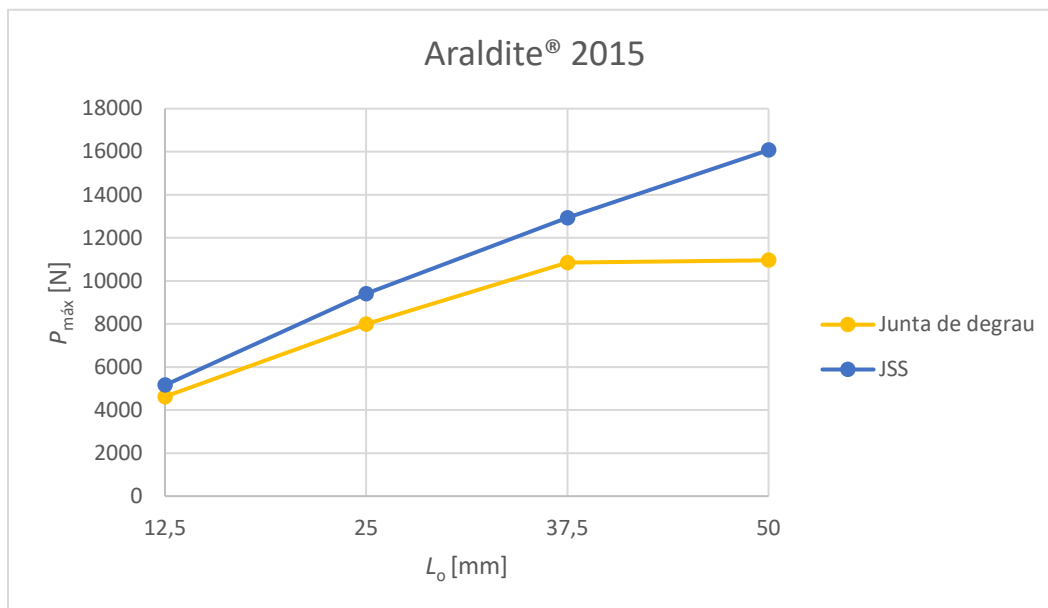


Figura 91 – Comparação de valores de $P_{máx}$. obtidos numericamente para juntas de degrau e JSS (Araldite® 2015).

A Figura 92 demonstra a diferença de resistência entre JSS e junta de degrau projetadas em adesivo Sikaforce® 7752. No caso das juntas de adesivo Sikaforce® 7752, uma vez que este apresenta característica dúctil e lida melhor com os picos de tensão, é evidente a ligeira vantagem desta alteração geométrica para L_o até 37,5 mm. O incremento de resistência ronda os 11% nos 3 menores L_o , enquanto para $L_o=50$ mm, o valor de $P_{máx}$. seja limitado pela rotura plástica nos substratos.

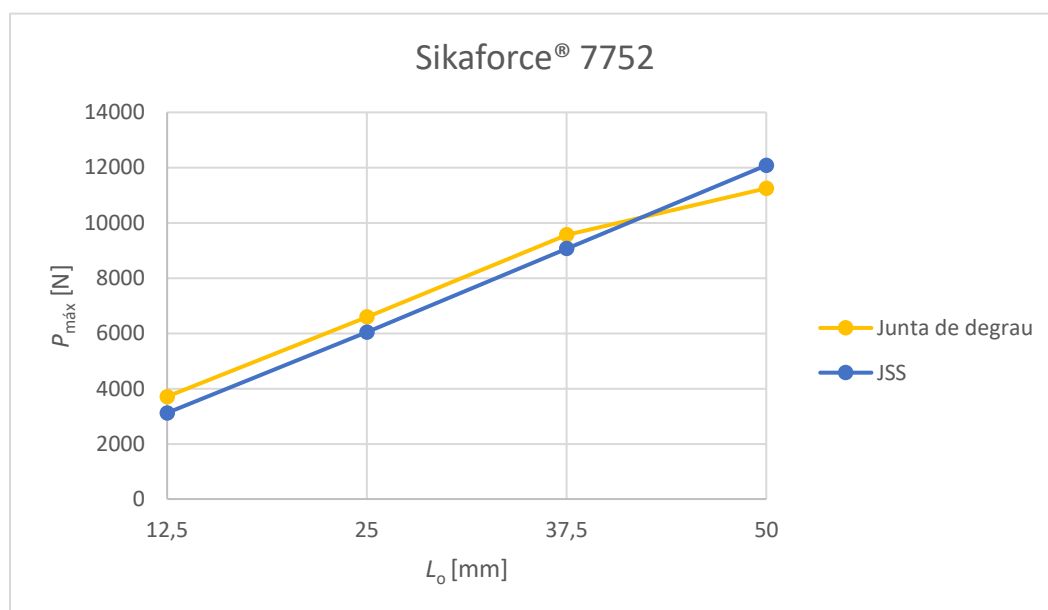


Figura 92 – Comparação de valores de $P_{máx}$. obtidos numericamente para juntas de degrau e JSS (Sikaforce® 7752).

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

A presente dissertação teve como principal foco a realização de um estudo experimental e numérico de juntas adesivas de degrau com aderentes em alumínio utilizando o conceito de *dual adhesive*. Com esta finalidade foram considerados três adesivos com comportamentos distintos, o adesivo frágil Araldite® AV138 e os adesivos com diferentes níveis de ductilidade Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Começou-se pela validação experimental através da realização de ensaios de tração a uma seleção de provetes com variadas configurações de junta. As principais conclusões do estudo experimental são as seguintes:

- Os modos de rotura apresentaram-se maioritariamente coesivos nas juntas de adesivo simples Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752;
- Nas juntas de dois adesivos na configuração 7752-AV-7752 e 7752-2015-7752, embora a totalidade dos modos de rotura fosse classificada como mista, a sua preponderância considerou-se coesiva;
- Em termos de resistência das juntas de adesivo simples, foi o adesivo Araldite® 2015 que revelou melhor desempenho para os dois L_0 de menor dimensão. Nos restantes L_0 , embora com diferença marginal, foi o adesivo Sikaforce® 7752 que demonstrou melhor comportamento;
- Entre L_0 , ambos os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 demonstraram elevados incrementos de $P_{máx.}$ de $L_0=12,5$ mm para $L_0=25$ mm (84% e 97%, respetivamente). Entre $L_0=25$ mm e $L_0=37,5$ mm o incremento de $P_{máx.}$ reduziu para 31% para o Araldite® 2015 e 37% para o Sikaforce® 7752. Já o incremento para o L_0 de maior valor foi apenas residual (inferior a 5% em ambos) devido à evidência do efeito de plastificação dos substratos;
- Ambas as configurações de juntas de dois adesivos tiveram valores de resistência similares, com um ligeiro pender para a configuração 7752-AV-7752, que obteve valores de $P_{máx.}$ superiores para os L_0 não afetados pela plastificação dos substratos;

- Ao comparar L_0 das juntas de dois adesivos, ambas as configurações tiveram valores similares, com incrementos de $P_{máx.}$ a rondar os 74% de $L_0=12,5$ mm para $L_0=25$ mm, 32% de $L_0=25$ mm para $L_0=37,5$ mm, e inferior a 1% de $L_0=37,5$ mm para $L_0=50$ mm, novamente devido ao fenómeno da plastificação dos substratos;
- Por fim, ao comparar as juntas de adesivo simples com as de dois adesivos, é possível constatar que, para L_0 de valor inferior (12,5 mm e 25 mm) a junta de dois adesivos na configuração 7752-AV-7752 revela melhor desempenho. No entanto, para $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm, é a junta de adesivo simples Sikaforce® 7752 que consegue melhores resultados, embora o efeito da plastificação dos substratos que se verificou no L_0 de maior dimensão de todas as juntas, torne difícil a asserção deste resultado.

Seguidamente realizou-se o estudo numérico com base no *software* de modelação ABAQUS®. Neste trabalho foram obtidos os modos de rotura, as distribuições de tensões das juntas em estudo, a previsão de resistência e a energia dissipada. As conclusões principais são descritas de seguida:

- Os resultados numéricos de modos de rotura demonstram que, nas juntas de adesivo simples, a rotura se dá maioritariamente no adesivo localizado na transição vertical entre aderentes, excetuando na junta de maior L_0 de adesivo Sikaforce® 7752, para a qual a rotura se dá por cedência no substrato;
- Nas juntas de dois adesivos, independentemente da proporção considerada, as juntas na configuração 2015-AV-2015 revelaram rotura no adesivo, localizada na transição vertical entre aderentes. Para as restantes configurações foi comum a rotura dos substratos nos L_0 de maior comprimento. Na configuração 7752-AV-7752, geralmente nas juntas de menor L_0 , foi também comum observar-se a rotura no centro da zona de ligação devido à diferença de rigidez entre os adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® AV138;
- A análise das tensões de arrancamento revela cumplicidade entre a característica do adesivo e o tamanho dos picos de tensão registado. A rigidez do adesivo Araldite® AV138 tende a provocar picos de tensão mais elevados quando comparado com os restantes adesivos, tanto nas juntas simples como na transição entre adesivos das juntas *dual adhesive*. Relativamente aos diferentes L_0 , quanto maior for o seu valor, maiores são os picos de tensão, enquanto a posição dos picos de tensão compressivos se desloca para as extremidades da zona de ligação, devido à normalização da posição relativamente ao L_0 de cada junta;

- A análise das tensões de corte revela novamente que o adesivo Araldite® AV138 inflige os picos de tensão mais elevados na transição entre adesivos nas juntas *dual adhesive* e nas extremidades das juntas simples. Já nas extremidades das juntas de dois adesivos a configuração com maiores picos de tensão revelou ser consistentemente a 2015-AV-2015. Ao comparar os diferentes L_0 , é notório que os picos de tensão aumentam nas extremidades da junta com o aumento de L_0 , embora o inverso aconteça nas zonas de transição entre adesivos;
- Referente à resistência global das juntas, é possível concluir que, embora por vezes marginalmente, o conceito de *dual adhesive* apresenta valores de desempenho superiores às juntas adesivas simples. Para a proporção 12,5%-75%-12,5% é a configuração 7752-2015-7752 que revela maiores valores de $P_{máx.}$ para $L_0=12,5$ mm e $L_0=25$ mm. Nos restantes L_0 esta configuração partilha valores similares aos da configuração 7752-AV-7752. Para a proporção 33%-34%-33% a configuração 2015-AV-2015 é a que demonstra valores superiores de $P_{máx.}$ para os dois L_0 de valor inferior. Para os restantes L_0 ambas as configurações 7752-2015-7752 e 7752-AV-7752 apresentam valores muito próximos. Por fim, para a proporção 25%-50%-25% o melhor desempenho em todos os L_0 estudado corresponde à configuração 7752-AV-7752;
- Relativamente a U , o conceito *dual adhesive* é apenas vantajoso nos 3 L_0 de maior dimensão. Para $L_0=12,5$ mm, e independentemente da proporção de adesivo, é a junta simples de Sikaforce® 7752 que revela maior capacidade de dissipação de energia em relação às juntas homologas. No geral, o conceito *dual adhesive* consegue melhorias de desempenho superior em U do que em $P_{máx.}$.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

Após a conclusão do presente estudo, de modo a colmatar lacunas existentes na literatura atual, fica a sugestão de trabalhos futuros:

- Efetuar o estudo experimental e numérico de juntas de dois adesivos com outros tipos de degraus;
- A realização de um trabalho similar ao atual, mas solicitando as juntas à fadiga em detrimento de um carregamento estático;
- Estudar juntas de degrau com substratos de espessura superior ou material mais resistente, de forma a mitigar tanto os fenómenos de plastificação dos substratos como a flexão longitudinal excessiva dos provetes.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Kinloch, A.J., *Adhesion and adhesives: science and technology*. 1987: Springer Science & Business Media.
2. Heinzmann, C., C. Weder, and L.M. de Espinosa, *Supramolecular polymer adhesives: advanced materials inspired by nature*. Chemical Society Reviews, 2016. **45**(2): p. 342-358.
3. Pocius, A.V. and D.A. Dillard, *Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications*. 2002: Elsevier.
4. Niewiarowski, P.H., A.Y. Stark, and A. Dhinojwala, *Sticking to the story: outstanding challenges in gecko-inspired adhesives*. Journal of Experimental Biology, 2016. **219**(7): p. 912-919.
5. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005: Elsevier.
6. Wu, S., *Polymer interface and adhesion*. 1982: Routledge.
7. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000: McGraw-Hill Education.
8. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindústria Portugal.
9. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. 2005: Elsevier.
10. Mathaudhu, S.N., et al., *Essential readings in magnesium technology*. 2014: Springer.
11. HellermannTyton, *Global Automotive Products*, HellermannTyton, Editor. 2019: Alemanha. p. 121.
12. Ebnesajjad, S. and A.H. Landrock, *Adhesives technology handbook*. 2008: William Andrew.
13. Harper, C.A., *Handbook of plastics, elastomers, & composites*. 2004, USA: McGraw-Hill.
14. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
15. ASTM, *Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. 2019, ASTM International: PA, USA.
16. Davis, M.J. and D.A. Bond. *The importance of failure mode identification in adhesive bonded aircraft structures and repairs*. in *12th International Conference on Composite Materials*. 1999. Paris, France.
17. Natu, A.V., A.R. Sharma, and N.R. Anekar, *Variation of Adhesive Strength in Single Lap Joint (SLJ) with Surface Irregularities*. American Journal of Mechanical Engineering, 2019. **7**(2): p. 61-67.

18. Da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlin, Germany: Springer Science & Business Media.
19. da Silva, A.F.M.V., *Uso de alterações geométricas em juntas adesivas tubulares para melhoria da resistência ao impacto*. 2020, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
20. Dillard, D.A., *Advances in structural adhesive bonding*. 2010, Amesterdão, Holanda: Elsevier.
21. Shields, J., *Adhesives handbook*. 1984, Amesterdão, Holanda: Elsevier.
22. Hussey, B. and J. Wilson, *Structural adhesives: directory and databook*. 1996, Berlim/Heidelberg, Alemanha: Springer Science & Business Media.
23. Ramalho, L.D.C., et al., *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2020. **96**: p. 102451.
24. Panigrahi, S.K. 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.
25. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
26. Volkersen, O.V., *Die Nietkraft Verteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschritten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
27. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944: p. A17-A27.
28. Tsai, M.Y., D.W. Oplinger, and J. Morton, *Improved theoretical solutions for adhesive lap joints*. International Journal of Solids and Structures, 1998. **35**(12): p. 1163-1185.
29. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded double-lap joints*, in *NASA contract report*. 1973, NASA: Washington DC, EUA.
30. Wooley, G.R. and D.R. Carver, *Stress concentration factors for bonded lap joints*. Journal of Aircraft, 1971. **8**(10): p. 817-820.
31. Campilho, R.D.S.G., *Strength prediction of adhesively-bonded joints*. 2017, Boca Raton, EUA: CRC Press.
32. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
33. da Silva, L.F.M., et al., *Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**(3): p. 331-341.
34. Bigwood, D.A. and A.D. Crocombe, *Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1989. **9**(4): p. 229-242.
35. Bigwood, D.A. and A.D. Crocombe, *Non-linear adhesive bonded joint design analyses*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1990. **10**(1): p. 31-41.
36. Frostig, Y., O.T. Thomsen, and F.I. Mortensen, *Analysis of adhesive-bonded joints, square-end, and spew-fillet—High-order theory approach*. Journal of Engineering Mechanics, 1999. **125**(11): p. 1298-1307.

37. Wang, R.X., et al., *Strength of adhesive joints with adherend yielding: I. analytical model*. The Journal of Adhesion, 2003. **79**(1): p. 23-48.
38. Adams, R.D. and V. Mallick, *A method for the stress analysis of lap joints*. The Journal of Adhesion, 1992. **38**(3-4): p. 199-217.
39. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
40. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 2: Experimental study*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
41. 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.
42. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
43. Duan, K., X. Hu, and Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
44. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
45. Carvalho, U.T.F. and R.D.S.G. Campilho, *Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2017. **77**: p. 41-50.
46. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
47. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, in *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012, Springer: Nova Iorque, EUA. p. 1-93.
48. 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.
49. Voyiadjis, G.Z. and P.I. Kattan, *Damage mechanics*. 2005, Boca Raton, EUA: CRC Press.
50. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage mechanics with finite elements: practical applications with computer tools*. 2002, Berlim/Heidelberg, Alemanha: Springer Science & Business Media.
51. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
52. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
53. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.

54. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008, Hoboken, USA: John Wiley & Sons.
55. 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.
56. Moës, N., J. Dolbow, 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.
57. Gwinner, J. and E.P. Stephan, *Advanced Boundary Element Methods—Treatment of Boundary Value. Transmission and Contact Problems*, draft of book, 2017.
58. Wang, H. and Q.-H. Qin, *Methods of fundamental solutions in solid mechanics*. 2019, Amesterdão, Holanda: Elsevier.
59. Lucy, L.B., *A numerical approach to the testing of the fission hypothesis*. The Astronomical Journal, 1977. **82**: p. 1013-1024.
60. Gingold, R.A. and J.J. Monaghan, *Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977. **181**(3): p. 375-389.
61. Belytschko, T., Y.Y. Lu, and L. Gu, *Element-free Galerkin methods*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994. **37**(2): p. 229-256.
62. Chen, J.-S., et al., *Reproducing kernel particle methods for large deformation analysis of non-linear structures*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996. **139**(1-4): p. 195-227.
63. Liu, W.K., S. Jun, and Y.F. Zhang, *Reproducing kernel particle methods*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1995. **20**(8-9): p. 1081-1106.
64. Wang, J.G. and G.R. Liu, *A point interpolation meshless method based on radial basis functions*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002. **54**(11): p. 1623-1648.
65. Wang, J.G., G.R. Liu, and Y.G. Wu, *A point interpolation method for simulating dissipation process of consolidation*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001. **190**(45): p. 5907-5922.
66. Liu, G.R., *A point assembly method for stress analysis for two-dimensional solids*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(1): p. 261-276.
67. Tsai, C.L., et al., *Analysis of cohesive failure in adhesively bonded joints with the SSPH meshless method*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014. **51**: p. 67-80.
68. Bodjona, K. and L. Lessard, *Nonlinear static analysis of a composite bonded/bolted single-lap joint using the meshfree radial point interpolation method*. Composite Structures, 2015. **134**: p. 1024-1035.
69. Ayatollahi, M.R. and A. Akhavan-Safar, *Failure load prediction of single lap adhesive joints based on a new linear elastic criterion*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015. **80**: p. 210-217.
70. Karachalios, E.F., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Single lap joints loaded in tension with high strength steel adherends*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **43**: p. 81-95.

71. Karachalios, E.F., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Single lap joints loaded in tension with ductile steel adherends*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **43**: p. 96-108.
72. Zhao, X., R.D. Adams, and L.F.M. Da Silva, *Single lap joints with rounded adherend corners: Stress and strain analysis*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(8): p. 819-836.
73. Campilho, R.D.S.G., 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.
74. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. Da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
75. Afendi, M., T. Teramoto, and H.B. Bakri, *Strength prediction of epoxy adhesively bonded scarf joints of dissimilar adherends*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2011. **31**(6): p. 402-411.
76. Leguillon, D., *Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch*. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2002. **21**(1): p. 61-72.
77. Moradi, A., et al., *Strength prediction of bonded assemblies using a coupled criterion under elastic assumptions: effect of material and geometrical parameters*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **47**: p. 73-82.
78. Hell, S., et al., *A coupled stress and energy criterion for the assessment of crack initiation in single lap joints: a numerical approach*. Engineering Fracture Mechanics, 2014. **117**: p. 112-126.
79. Mendoza-Navarro, L.E., et al., *Interfacial failure in adhesive joints: Experiments and predictions*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **44**: p. 36-47.
80. O'Mahoney, D.C., et al., *Taguchi analysis of bonded composite single-lap joints using a combined interface-adhesive damage model*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **40**: p. 168-178.
81. Geleta, T.N., et al., *Failure behavior of inclined thick adhesive joints with manufacturing defect*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018. **32**(5): p. 2173-2182.
82. Anyfantis, K.N. and N.G. Tsouvalis, *A novel traction-separation law for the prediction of the mixed mode response of ductile adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures, 2012. **49**(1): p. 213-226.
83. Li, J., et al., *Experimental and numerical study of adhesively bonded CFRP scarf-lap joints subjected to tensile loads*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**(1): p. 1-17.
84. Banea, M.D., et al., *Multi-material adhesive joints for automotive industry*. Composites Part B: Engineering, 2018. **151**: p. 71-77.
85. Avgoulas, E.I. and M.P.F. Sutcliffe, *Biomimetic-inspired CFRP to perforated steel joints*. Composite Structures, 2016. **152**: p. 929-938.
86. Chousal, J.A.G. and M.F.S.F. De Moura, *Mixed-mode I+ II continuum damage model applied to fracture characterization of bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **41**: p. 92-97.

87. Belnoue, J.P.-H. and S.R. Hallett, *Cohesive/adhesive failure interaction in ductile adhesive joints Part I: A smeared-crack model for cohesive failure*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2016. **68**: p. 359-368.
88. Belnoue, J.P.-H., et al., *Cohesive/adhesive failure interaction in ductile adhesive joints Part II: Quasi-static and fatigue analysis of double lap-joint specimens subjected to through-thickness compressive loading*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2016. **68**: p. 369-378.
89. Zhang, Q., et al., *Investigation of tensile behavior and influence factors of composite-to-metal 2D-scarf bonded joint*. Engineering Structures, 2019. **180**: p. 284-294.
90. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
91. Machado, R.M.D., R.D.S.G. Campilho, and R.J.B. Rocha, *Extended finite element modelling of aluminium stepped-adhesive joints*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(5-7): p. 450-473.
92. Mubashar, A., I.A. Ashcroft, and A.D. Crocombe, *Modelling damage and failure in adhesive joints using a combined XFEM-cohesive element methodology*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(8): p. 682-697.
93. da Silva, L.F.M. and R.D. Adams, *Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2007. **27**(3): p. 227-235.
94. Pinto, A.M.G., et al., *Effect of adherend recessing on the tensile strength of single lap joints*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(8): p. 649-666.
95. Bahrami, B., et al., *Strength improvement in single lap adhesive joints by notching the adherends*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2019. **95**: p. 102401.
96. Zhao, X., R.D. Adams, and L.F.M. Da Silva, *Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(8): p. 837-856.
97. Haghpanah, B., S. Chiu, and A. Vaziri, *Adhesively bonded lap joints with extreme interface geometry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **48**: p. 130-138.
98. Razavi, S.M.J., et al., *Parametric study of adhesive joints with non-flat sinusoid interfaces*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018. **93**: p. 44-55.
99. Silva, J.O.S., et al., *Comparative evaluation of adhesively-bonded single-lap and stepped-lap joints*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 1189-1196.
100. Sancaktar, E. and U. Karmarkar, *Mechanical behavior of interlocking multi-stepped double scarf adhesive joints including void and disbond effects*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 44-56.
101. Bayramoglu, S., K. Demir, and S. Akpinar, *Investigation of internal step and metal part reinforcement on joint strength in the adhesively bonded joint: Experimental and numerical analysis*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020. **108**: p. 102613.
102. Li, D., G. Qing, and Y. Liu, *A three-dimensional semi-analytical model for the composite laminated plates with a stepped lap repair*. Composite Structures, 2011. **93**(7): p. 1673-1682.

103. Sawa, T., et al., *A three-dimensional finite element stress analysis and strength prediction of stepped-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to bending moments*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 298-305.
104. Kimiaiefar, A., et al., *Asymptotic sampling for reliability analysis of adhesive bonded stepped lap composite joints*. Engineering Structures, 2013. **49**: p. 655-663.
105. Durmuş, M. and S. Akpınar, *The experimental and numerical analysis of the adhesively bonded three-step-lap joints with different step lengths*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020. **105**: p. 102427.
106. Brito, R.F.N., et al., *Composite stepped-lap adhesive joint analysis by cohesive zone modelling*. Procedia Structural Integrity, 2021. **33**: p. 665-672.
107. Da Silva, L.F.M. and R.D. Adams, *Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(3): p. 216-226.
108. 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.
109. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
110. *ASTM E8M-04 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*. ASTM International: West Conshohocken, EUA.
111. Lavalette, N.P., et al., *Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints*. Composite Structures, 2020. **240**: p. 112077.
112. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015. **57**: p. 125-132.
113. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International journal of fracture, 2006. **141**(1): p. 147-161.
114. Chen, X., X. Deng, and M.A. Sutton, *Simulation of stable tearing crack growth events using the cohesive zone model approach*. Engineering Fracture Mechanics, 2013. **99**: p. 223-238.
115. Campilho, R.D.S.G., et al., *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single-and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 678-686.
116. Jousset, P. and M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2014. **132**: p. 48-69.
117. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
118. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap*

- repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
119. Pocius, A., *Adhesion and adhesives technology, an introduction*, 2nd ed. 2002, Cincinnati, USA: Hanser Gardner Publications.
120. 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.
121. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
122. Marques, E.A.S. and L.F.M. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.
123. Campilho, R.D.S.G., et al., *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single-and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 678-686.
124. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
125. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
126. Barbosa, N.G.C., et al., *Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures*. Applied Adhesion Science, 2018. **6**(1): p. 1-19.