



Comportamento estrutural de juntas adesivas com aderentes produzidos por fabrico aditivo

FÁBIO ANDRÉ FERNANDES SILVA MAGALHÃES

outubro de 2025

**Comportamento estrutural de juntas adesivas com
aderentes produzidos por fabrico aditivo**

Fábio André Fernandes Silva Magalhães

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Mestrado em Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Construções mecânicas**

Orientador: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Coorientador: Ricardo Fernando Rodrigues Pinto

Júri:

Presidente:

Armando José Vilaça de Campos

Vogais:

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Paulo Reinier Gonçalves

Porto, Setembro de 2025

Agradecimentos

A conclusão desta dissertação representa o culminar de um percurso exigente, repleto de desafios, aprendizagens e crescimento. Seria impossível chegar até aqui sem o apoio de pessoas fundamentais, às quais devo o meu mais sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor Doutor Raul Campilho, pela orientação incansável, pela disponibilidade constante e pela forma clara e rigorosa com que me guiou ao longo deste trabalho. A sua confiança nas minhas capacidades, aliada à exigência académica que sempre demonstrou, foram cruciais para o desenvolvimento desta tese. Muito obrigado por todo o apoio, paciência e incentivo ao longo deste processo.

À minha namorada, Daniela Silva, deixo um agradecimento que as palavras dificilmente conseguem expressar por completo. Obrigado por estares sempre ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis, por me dares força quando faltava, por me ouvires, compreenderes e incentivares.

Aos meus pais, agradeço de coração por todo o apoio incondicional ao longo da minha vida. Pela educação que me deram, pelo exemplo de integridade, trabalho e dedicação, e por acreditarem sempre em mim. Tudo o que conquistei até hoje tem as vossas raízes.

A todos os que, de alguma forma, fizeram parte deste percurso, colegas, amigos, professores, o meu sincero obrigado. Esta etapa termina com sentimento de dever cumprido e com a certeza de que não a percorri sozinho.

Resumo

A crescente adoção do fabrico aditivo, nomeadamente através da tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), tem impulsionado novas possibilidades no design e produção de componentes. No entanto, a integração destas peças em estruturas maiores levanta desafios importantes, nomeadamente limitações nas dimensões fabricáveis, na qualidade das superfícies de contacto e na compatibilidade entre os materiais dos aderentes e os adesivos utilizados.

A presente dissertação analisa o comportamento estrutural de juntas adesivas com aderentes fabricados por impressão 3D, utilizando a tecnologia FDM. O trabalho desenvolveu-se numa abordagem experimental e numérica, com o objetivo de avaliar a influência da geometria da junta e do tipo de adesivo no desempenho mecânico sob solicitações de flexão. Foram estudadas três configurações geométricas de juntas (*SLJ*, *SCARF* e *STEP*), combinadas com dois adesivos de naturezas distintas (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) e três materiais poliméricos para os aderentes (PLA, PETG e ABS). As juntas foram submetidas a ensaios experimentais, para a caracterização de parâmetros como resistência, rigidez, energia de rotura e modos de rotura. Paralelamente, foram desenvolvidos modelos numéricos com recurso ao método dos elementos finitos e modelos de dano coesivo (MDC), implementados no software Abaqus®, calibrados com base nos resultados experimentais. Os resultados indicaram que a geometria *SCARF* apresentou o melhor desempenho estrutural, enquanto a *SLJ* revelou fragilidades significativas. O adesivo Araldite® 2015 demonstrou maior rigidez e resistência, ao passo que o Sikaforce® 7752 evidenciou maior capacidade de dissipação energética em algumas configurações. Os modelos numéricos reproduziram adequadamente as tendências experimentais, embora com algumas discrepâncias em termos de rigidez e energia de rotura.

Palavras-chave: Ligações adesivas, Análise de juntas adesivas, Fabrico aditivo, FDM, Modelação numérica, dano coesivo, Método de Elementos Finitos, Impressão 3D.

Abstract

The growing adoption of additive manufacturing, particularly through Fused Deposition Modeling (FDM) technology, has opened new possibilities in the design and production of components. However, integrating such parts into larger structures presents significant challenges, particularly in terms of build size limitations, surface quality, and the compatibility between adherend materials and adhesives.

This dissertation analyzes the structural behavior of adhesive joints with adherends produced via 3D printing using the FDM process. The study follows both experimental and numerical approaches, aiming to assess the influence of joint geometry and adhesive type on the mechanical performance under bending loads. Three joint geometries (SLJ or *single-lap joint*, SCARF, and STEP) were evaluated, combined with two adhesives of different characteristics (Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752) and three polymeric materials for the adherends (PLA, PETG, and ABS). The joints were subjected to experimental tests to characterize parameters such as strength, stiffness, fracture energy, and failure modes. In parallel, numerical models were developed using the finite element method and cohesive zone models (CZM), implemented in Abaqus® software and calibrated based on the experimental results. The results showed that SCARF geometry exhibited the best structural performance, while the SLJ configuration presented significant weaknesses. Araldite® 2015 demonstrated higher stiffness and strength, whereas Sikaforce® 7752 showed greater energy dissipation capability in some configurations. The numerical models accurately reproduced the experimental trends, although some discrepancies were observed in terms of stiffness and fracture energy.

KEYWORDS: Adhesive bonding, Adhesive joint analysis, Additive manufacturing, FDM, Numerical modeling, Cohesive damage, Finite Element Method, 3D printing.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Acrónimos e Símbolos.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologia	2
1.4. Organização do relatório.....	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Ligações adesivas	5
2.1.1. Vantagens/desvantagens.....	5
2.1.2. Conceitos de base	6
2.1.3. Esforços aplicados.....	6
2.1.4. Configurações de juntas e roturas mais comuns.....	7
2.1.5. Aplicações	8
2.1.6. Previsão de resistência.....	10
2.1.6.1. Mecânica dos meios contínuos.....	10
2.1.6.2. Mecânica da fratura	11
2.1.6.3. Modelos de dano coesivo	11
2.1.6.4. Mecânica do dano.....	12
2.1.6.5. Método dos elementos finitos estendido.....	13
2.1.7. Estado-da-arte	13
2.2. Fabrico aditivo.....	15
2.2.1. Caracterização geral do processo	15
2.2.2. Vantagens e limitações do fabrico aditivo	16
2.2.3. Tecnologias de fabrico	16
2.2.3.1. Binder jetting.....	16
2.2.3.2. Directed energy deposition.....	17
2.2.3.3. Material extrusion.....	18

2.2.3.4. Material jetting	19
2.2.3.5. Powder bed fusion	19
2.2.3.6. Sheet lamination	20
2.2.3.7. Vat polymerization	21
2.2.4. Aplicações de fabrico aditivo	22
2.2.5. Equipamentos e características	22
2.2.6. Estado-da-arte	23
2.3. Ligações adesivas em componentes de fabrico aditivo	25
2.3.1. Ligações correntes em FA	25
2.3.2. Ligações adesivas em FA	27
2.3.3. Tecnologia e vantagens associadas	27
2.3.4. Fabrico e automação	28
2.3.5. Compatibilidade de aderentes/adesivos	29
2.3.6. Estado-da-arte	30
2.3.6.1. Ensaio experimentais.....	30
2.3.6.2. Modelação numérica	31
3. Desenvolvimento	33
3.1. Trabalho experimental	33
3.1.1. Determinação das propriedades dos aderentes.....	33
3.1.2. Geometria das juntas.....	37
3.1.3. Adesivos utilizados.....	39
3.1.4. Processo de fabrico.....	40
3.1.5. Ensaio de flexão	42
3.1.6. Resultados.....	42
3.1.6.1. Modos de rotura	42
3.1.6.2. Curvas P- δ	45
3.1.6.3. Rigidez máxima	55
3.1.6.4. Energia de rotura	60
3.2. Trabalho numérico	66
3.2.1. Preparação dos modelos numéricos.....	66
3.2.2. Modelo coesivo triangular	71
3.2.3. Determinação dos parâmetros coesivos	73
3.2.3.1. Araldite® 2015.....	74
3.2.3.2. Sikaforce® 7752.....	74
3.2.4. Resultados.....	75
3.2.4.1. Modos de rotura	75
3.2.4.2. Curvas P- δ	81

3.2.4.3. Rigidez máxima	88
3.2.4.4. Energias de rotura	91
3.3. Discussão e comparação de resultados	95
3.3.1. $P_{máx}$ e resistência das juntas.....	95
3.3.2. Rigidez máxima	99
3.3.3. Energias de rotura.....	102
4. Conclusão.....	109
4.1. Conclusões finais	109
4.2. Limitações e trabalhos futuros.....	110
Referências.....	111
Declaração de Integridade	119
Anexo A	121

Lista de Figuras

Figura 1 - Junta sujeita a esforços de tração [1]	6
Figura 2 - Junta sujeita a esforços de compressão [1]	6
Figura 3 - Junta sujeita a esforços de corte [1]	7
Figura 4 - Junta sujeita a esforços de clivagem [1]	7
Figura 5 - Junta sujeita a esforços de arrancamento [1].....	7
Figura 6 Configurações de juntas adesivas mais comuns (adaptado de [2])	8
Figura 7 - Diferentes tipos de rotura em juntas adesivas [1].....	8
Figura 8 -a) Indústria Naval, b) Indústria Aeroespacial c) Indústria Automóvel d) Construção Civil [14-16].....	9
Figura 9 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura nula: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [31]).....	11
Figura 10 - Transformação do modelo 3D para produto final [64].....	16
Figura 11 - Representação esquemática do processo BJ [71].....	17
Figura 12 - a) DED por laser [56] b) DED por feixe de eletrões [74]	17
Figura 13 - Representação esquemática do processo FDM [63]	18
Figura 14 - Esquema de funcionamento do sistema <i>material jetting</i> [63]	19
Figura 15 - Representação esquemática do processo de PBF através de laser [63].....	20
Figura 16 - Representação esquemática do processo sheet lamination [79]	21
Figura 17 - Representação esquemática do processo <i>vat polymerization</i> [81].....	21
Figura 18 - Principais aplicações do fabrico aditivo [63].....	22
Figura 19 - Exemplos de ligações roscadas em elementos impressos [99]	26
Figura 20 - Exemplo de ligação por entalhe [101]	26
Figura 21 - <i>SLJ</i> com aderentes em FA (Adaptado de [102])	26
Figura 22 - Implementação da robotização na impressão 3D [109]	28
Figura 23 - Dimensões do provete típico para materiais plásticos rígidos e semirrígidos do Tipo I	33
Figura 24 - Impressão de provetes <i>bulk</i> : a) PLA laranja; b) PETG amarelo e c) ABS vermelho..	34
Figura 25 - Shimadzu Autograph AG-X 100 [119]	35
Figura 26 - Curvas σ - ε dos provetes <i>bulk</i> do material PLA, ABS e PETG [121].....	37
Figura 27 - Diferentes geometrias de junta: a) <i>SLJ</i> ; b) <i>STEP</i> ; c) <i>SCARF</i>	38
Figura 28 - Geometrias <i>SCARF</i> com os respetivos valores de L_0 : a) $L_0=5$ mm; b) $L_0=10$ mm; c) $L_0=20$ mm.....	38
Figura 29 - Adesivo Araldite® 2015 e pistola de aplicação [125]	39
Figura 30 - Adesivo Sikaforce® 7752 FRW L60 da marca Sika®[126]	39
Figura 31 - Aplicação de adesivo Araldite® 2015	41
Figura 32 - Preparação da mistura homogénea dos componentes	41
Figura 33 - Sessão de preparação de juntas PETG com Araldite® 2015	41
Figura 34 - Ensaio a flexão de juntas <i>SCARF</i> : a) PLA; b) PETG; c) ABS	42
Figura 36 - Curvas P - δ das juntas <i>SLJ</i> com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752	46

Figura 37 - Curvas $P-\delta$ das juntas <i>SLJ</i> com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752	46
Figura 37 - Curvas $P-\delta$ das juntas <i>SLJ</i> com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752.....	47
Figura 38 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o [mm] por adesivo e aderente para as juntas <i>SLJ</i>	48
Figura 39 - Curvas $P-\delta$ das juntas <i>SCARF</i> com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752	49
Figura 40 - Curvas $P-\delta$ das juntas <i>SCARF</i> com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752	49
Figura 41 - Curvas $P-\delta$ das juntas <i>SCARF</i> com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752	50
Figura 42 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o [mm] por adesivo e aderente para as juntas <i>SCARF</i>	51
Figura 43 - Curvas $P-\delta$ das juntas <i>STEP</i> com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752.....	52
Figura 44 - Curvas $P-\delta$ das juntas <i>STEP</i> com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752	53
Figura 45 - Curvas $P-\delta$ das juntas <i>STEP</i> com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752.....	53
Figura 46 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o [mm] por adesivo e aderente para as juntas <i>STEP</i>	54
Figura 47 - Valores médios de $K_{máx}$ [kN/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas <i>SLJ</i>	56
Figura 48 - Valores médios de $K_{máx}$ [kN/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas <i>SCARF</i>	58
Figura 49 - Valores médios de $K_{máx}$ [kN/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas <i>STEP</i>	59
Figura 50 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas <i>SLJ</i>	61
Figura 51 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas <i>SCARF</i>	62
Figura 52 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas <i>STEP</i>	64
Figura 53 - Definição do tipo de elemento no programa Abaqus®	67
Figura 54 - Desenho 2D do provete com a geometria <i>SLJ</i> e $L_o=5$ mm.....	67
Figura 55 - Desenho 2D dos punções: a) punção inferior; b) punção superior	67
Figura 56 - Propriedades atribuídas no Abaqus®	68
Figura 57 - Secção atribuída como adesivo.....	68
Figura 58 - Definição dos incrementos no Abaqus®	70
Figura 59 - Condições fronteira aplicadas.....	70
Figura 60 - Malhas aplicadas para geometria a) <i>SLJ</i> , b) <i>SCARF</i> e c) <i>STEP</i> com L_o de 5 mm.....	71
Figura 61 - Modelo coesivo triangular [131].....	72
Figura 62 - Modo de propagação de tensões nas juntas <i>SLJ</i> : a) Início do carregamento; b) Intensificação e propagação das tensões; c) Início do processo de rotura	76
Figura 63 - Modo de propagação de dano no adesivo em juntas <i>SLJ</i> : a) Sem carregamento; b) Carregamento e propagação das tensões; c) Processo de rotura	76
Figura 64 - Modo de propagação de tensões nas juntas <i>SCARF</i> : a) Fase anterior ao carregamento; b) Início do carregamento; c) Intensificação e propagação das tensões.....	78
Figura 65 - Modo de propagação de dano no adesivo em juntas <i>SCARF</i> a) Fase anterior ao carregamento; b) Carregamento e propagação das tensões; c) Processo de rotura	78

Figura 66 - Modo de propagação de tensões nas juntas <i>STEP</i> : a) Fase anterior ao carregamento; b) Início do carregamento; c) Intensificação e propagação das tensões.....	79
Figura 67 - Modo de propagação de dano no adesivo em juntas <i>STEP</i> : a) Fase anterior ao carregamento; b) Carregamento e propagação das tensões; c) Processo de rotura	80
Figura 68 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas <i>SLJ</i> com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752	81
Figura 69 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas <i>SLJ</i> com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752.....	82
Figura 70 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas <i>SLJ</i> com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752.....	83
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas <i>SCARF</i> com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752.....	84
Figura 72 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas <i>SCARF</i> com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752 ..	85
Figura 73 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas <i>SCARF</i> com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752	85
Figura 74 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas <i>STEP</i> com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752	86
Figura 75 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas <i>STEP</i> com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752.....	87
Figura 76 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas <i>STEP</i> com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752.....	88
Figura 77 - Valores de $K_{máx}$ [N/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas <i>SLJ</i>	89
Figura 78 - Valores de $K_{máx}$ [N/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas <i>SCARF</i>	90
Figura 79 - Valores de $K_{máx}$ [N/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas <i>STEP</i>	91
Figura 80 - Valores de energia de rotura [kN.mm] em função de L_o , adesivo e aderente para as juntas <i>SLJ</i>	92
Figura 81 - Valores de Energia de rotura [kN.mm] em função de L_o , adesivo e aderente para as juntas <i>SCARF</i>	93
Figura 82 - Valores médios de Energia de rotura [kN.mm] em função de L_o , adesivo e aderente para as juntas <i>STEP</i>	94
Figura 83 - Comparação de $P_{máx}$ numérico com experimental das juntas <i>SLJ</i> com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS.....	96
Figura 84 - Comparação de $P_{máx}$ numérico com experimental das juntas <i>SCARF</i> com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS.....	98
Figura 85 - Comparação de $P_{máx}$ numérico com experimental das juntas <i>STEP</i> com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS.....	99
Figura 86 - Comparação de $K_{máx}$ numérico com experimental das juntas <i>SLJ</i> com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS.....	100
Figura 87 - Comparação de $K_{máx}$ numérico com experimental das juntas <i>SCARF</i> com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS.....	101
Figura 88 - Comparação de $K_{máx}$ numérico com experimental das juntas <i>STEP</i> com aderentes a) PLA, b) PETG e c) ABS.....	102
Figura 89 - Comparação de energia de rotura numérica com experimental das juntas <i>SLJ</i> com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS.....	103
Figura 90 - Comparação de energia de rotura numérica com experimental das juntas <i>SCARF</i> com aderentes a) PLA, b) PETG e c) ABS.....	105
Figura 91 - Comparação de energia de rotura numérica com experimental das juntas <i>STEP</i> com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS.....	106

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens de ligações adesivas [1-3].....	5
Tabela 2 - Estado de arte de métodos de previsão.....	13
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do processo aditivo [58, 63, 67-70].....	16
Tabela 4 - Lista de impressoras 3D subdividida nas tecnologias associadas e respetivas características fornecidas pelo fabricante [85-89]	23
Tabela 5 - Estudos realizados em AM	23
Tabela 6 - Ensaios experimentais realizados em juntas adesivas de FA.....	30
Tabela 7 - Artigos sobre modelação numérica realizados em juntas adesivas de FA.....	31
Tabela 8 - Propriedades de impressão para os diferentes aderentes	34
Tabela 9 - Propriedades mecânicas para os diferentes aderentes (adaptado de [121, 122])...	36
Tabela 10 - Parâmetros aplicados em diferentes tipos de juntas.....	38
Tabela 11 - Propriedades dos adesivos [124, 127]	40
Tabela 12 - Preparação das faces dos aderentes.....	40
Tabela 13 - Modos de rotura em juntas <i>SLJ</i>	43
Tabela 14 - Modos de rotura em juntas <i>SCARF</i>	43
Tabela 15 - Modos de rotura em juntas <i>STEP</i>	44
Tabela 16 - Modos de roturas nas juntas <i>SLJ</i>	48
Tabela 17 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o para as juntas <i>SLJ</i>	48
Tabela 18 - Modos de roturas na juntas <i>SCARF</i>	51
Tabela 19 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o para as juntas <i>SCARF</i>	52
Tabela 20 - Modos de roturas nas juntas <i>STEP</i>	54
Tabela 21 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o para as juntas <i>STEP</i>	55
Tabela 22 - Valores médios de $K_{máx}$ [kN/mm] em função de L_o para as juntas <i>SLJ</i>	57
Tabela 23 - Valores médios de $K_{máx}$ [kN/mm] em função de L_o para as juntas <i>SCARF</i>	58
Tabela 24 - Valores médios de $K_{máx}$ [kN/mm] em função de L_o para as juntas <i>STEP</i>	60
Tabela 25 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_o para as juntas <i>SLJ</i>	62
Tabela 26 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_o para as juntas <i>SCARF</i>	63
Tabela 27 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_o para as juntas <i>STEP</i>	65
Tabela 28 - Parâmetros coesivos utilizados para a simulação os adesivas 2015 e 7752 [127, 144]	75
Tabela 29 - Modos de rotura experimental vs. numérico das juntas <i>SLJ</i>	77
Tabela 30 - Modos de rotura experimental vs. numérico das juntas <i>SCARF</i>	79
Tabela 31 - Modos de rotura experimental vs. numérico das juntas <i>STEP</i>	80

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>
AM	<i>Additive manufacturing</i>
BJ	<i>Binder jetting</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
DED	<i>Directed energy deposition</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
FA	Fabrico aditivo
FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
HRR	Hutchinson-Rice-Rosengreen
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISSF	<i>Intensity of Singular Stress Fields</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
MDC	Modelo do dano coesivo
ME	<i>Material extrusion</i>
MEF	Método de elementos finitos
MEFX	Método de elementos finitos estendidos
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
PBF	<i>Powder bed fusion</i>
PC	Policarbonato
PEI	<i>Polyetherimide</i>
PETG	<i>Polyethylene terephthalate glycol</i>
PLA	<i>Polylactic acid</i>
PPSF	<i>Polyphenylsulfone</i>
SDEG	Degradação do adesivo
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLJ	<i>Single-lap joint</i>

SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	Sinterização seletiva por laser
STATUS	Estado do elemento
STL	<i>Standard tessellation language</i>
TFFV	Técnica de fecho da fenda virtual
TPU	<i>Thermoplastic polyurethane</i>
UV	Ultra-violeta

Lista de Símbolos

A	Ângulo	mm
A_0	Área inicial da secção	mm ²
A	Área inicial transversal	mm ²
A_{inst}	Área transversal instantânea	mm ²
P	Carga	N
$P_{máx}$	Carga máxima	N
ν	Coefficiente de Poisson	
T	Comprimento	mm
L_0	Comprimento de sobreposição	mm
t_0	Comprimento inicial	mm
ε	Deformação	mm
ε_f	Deformação de rotura à tração	%
γ_f	Deformação de rotura ao corte	%
ε_{lat}	Deformação lateral	mm
$\varepsilon_{máx}$	Deformação máxima	mm
Δ	Deslocamento	mm
δ_n^0	Deslocamento à tração	mm
δ_s^0	Deslocamento ao corte	mm
δ_n	Deslocamento no ponto n da curva	mm
δ_{n-1}	Deslocamento no ponto n-1 da curva	mm
L_T	Distância entre as punções inferiores	mm
L_{T1}	Distância entre as punções superiores	mm
t_A	Espessura da camada adesiva	mm

t_p	Espessura do aderente	mm
P_n	Força no ponto n da curva	N
B	Largura	mm
b_0	Largura inicial	mm
E	Módulo de elasticidade	Pa
G	Módulo de elasticidade transversal	GPa
P_m	Pressão média	Pa
t_n^0	Resistência coesiva à tração	Pa
t_s^0	Resistência coesiva ao corte	Pa
K	Rigidez	N/mm
$K_{máx}$	Rigidez máxima	N/mm
G_c	Taxa crítica de libertação de energia	J/m ²
G_I	Taxa de libertação de energia à tração	J/m ²
G_{II}	Taxa de libertação de energia ao corte	J/m ²
G_{IC}	Tenacidade à tração	N/mm
G_{IIC}	Tenacidade ao corte	N/mm
σ	Tensão	MPa
$\sigma_{0,2}$	Tensão a 0,2% de deformação	MPa
$\sigma_{0,5}$	Tensão a 0,5% de deformação	MPa
σ_y	Tensão de cedência à tração	MPa
τ_y	Tensão de cedência ao corte	MPa
σ_f	Tensão de rotura à tração	MPa
τ_f	Tensão de rotura ao corte	MPa
$Rp_{0,2}$	Tensão limite elástico a 0,2 %	Pa
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima nominal	MPa
σ_{real}	Tensão real	MPa
$\sigma_{R0,2}$	Tensão real a 0,2% de deformação	MPa
$\Delta\varepsilon$	Variação da deformação	mm
ΔF	Variação da força	N
$\Delta\sigma$	Variação da tensão	MPa
$\Delta\delta$	Variação dos deslocamentos	mm

1. Introdução

1.1. Contextualização

As ligações adesivas têm vindo a assumir um papel central no desenvolvimento de soluções estruturais de elevado desempenho, sobretudo em aplicações que exigem a combinação eficiente de diferentes materiais e a redução de peso sem comprometer a resistência mecânica. Em comparação com os métodos tradicionais de fixação mecânica, como juntas rebitadas ou aparafusadas, as juntas adesivas oferecem vantagens relevantes, nomeadamente a distribuição mais uniforme de tensões, a eliminação de concentrações de esforços e uma maior liberdade no projeto estrutural.

Em paralelo, o fabrico aditivo consolidou-se como uma das tecnologias mais promissoras no contexto da Indústria 4.0, pela sua capacidade de produzir componentes com elevada complexidade geométrica e personalização, minimizando desperdícios de material. Contudo, a utilização de peças fabricadas por este processo coloca novos desafios, especialmente no que respeita ao tamanho das peças fabricadas, uma vez que as peças fabricadas por fabrico aditivo apresentam geometrias muito limitadas, e à compatibilidade entre os materiais e os adesivos.

A intersecção entre estas duas áreas, ligações adesivas e fabrico aditivo, constitui um domínio emergente de investigação. A caracterização do desempenho estrutural das juntas adesivas em componentes obtidos por fabrico aditivo revela-se essencial para o desenvolvimento de soluções fiáveis, capazes de responder às exigências de aplicações industriais. Neste contexto, a presente dissertação centra-se na análise experimental e numérica de diferentes geometrias de juntas adesivas, procurando compreender a influência da sua configuração no comportamento global da ligação.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste na avaliação do desempenho estrutural, através de componentes experimentais e componentes numéricas com auxílio do MDC, de diferentes geometrias de juntas adesivas quando aplicadas a componentes obtidos por fabrico aditivo, com particular destaque para a resistência, rigidez máxima ($K_{máx}$) e energia de rotura.

De forma mais detalhada, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar as propriedades mecânicas fundamentais dos materiais constituintes, incluindo aderentes e adesivos;

- Fabricar e ensaiar experimentalmente juntas adesivas com diferentes geometrias (*SLJ*, *SCARF* e *STEP*) e caracterizar o seu comportamento estrutural;
- Identificar e classificar os modos de rotura observados, relacionando-os com a evolução das curvas carga-deslocamento ($P-\delta$);
- Desenvolver e calibrar modelos numéricos baseados no método de elementos finitos e, modelos de dano coesivo, de modo a reproduzir o comportamento observado nos ensaios;
- Comparar criticamente os resultados experimentais e numéricos, avaliar as diferenças e complementaridades entre ambas as abordagens de modo a validar a técnica numérica;
- Confrontar os resultados obtidos com o estado da arte, de forma a consolidar conclusões sobre o desempenho das diferentes geometrias estudadas.

1.3. Metodologia

A presente dissertação assenta numa abordagem combinada de natureza experimental e numérica, com o objetivo de analisar o comportamento estrutural de juntas adesivas cujos aderentes foram produzidos por fabrico aditivo, através da tecnologia de FDM. A metodologia adotada estruturou-se em quatro grandes vertentes: revisão bibliográfica, trabalho experimental, trabalho numérico e validação de resultados.

Numa fase inicial, foi realizada uma revisão bibliográfica, com objetivo de consolidar os principais conceitos teóricos associados às ligações adesivas, ao fabrico aditivo e à sua integração. Esta revisão foi conduzida recorrendo a bases de dados científicas reconhecidas, nomeadamente ScienceDirect, SpringerLink, Scopus e Web of Science, através de palavras-chave em inglês como *adhesive bonding*, *additive manufacturing*, *FDM*, *mechanical behaviour*, *cohesive zone modelling*, *finite element analysis*, *joint failure*, entre outras. A seleção dos documentos teve como critérios a atualidade, a relevância científica e a aplicabilidade direta ao objeto de estudo.

Na segunda fase, foi desenvolvido um trabalho experimental, no qual foi realizado a caracterização mecânica dos aderentes fabricados por FDM e a análise do desempenho estrutural das juntas adesivas com diferentes geometrias e tipos de adesivos. Os aderentes foram desenhados em Solidworks® e processados no software Ultimaker Cura, para preparação da impressão. Foram utilizados filamentos poliméricos compatíveis com os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, selecionados com base na literatura. A realização dos ensaios de flexão permitiu avaliar parâmetros como a rigidez, a energia de rotura e os modos de rotura das juntas. Os dados obtidos foram tratados e analisados com ferramentas de cálculo e representação gráfica.

Paralelamente, iniciou-se a terceira fase onde foi conduzido um trabalho numérico com recurso ao *software* Abaqus®, com o objetivo de simular o comportamento mecânico das juntas adesivas e validar os resultados experimentais. Os modelos tridimensionais foram importados

do Solidworks® para o Abaqus®, onde foi implementado um MDC triangular para simular a propagação do dano no adesivo. Os parâmetros coesivos utilizados foram calibrados com base nos resultados experimentais, permitindo a obtenção de curvas $P-\delta$, avaliação da rigidez (K) e da energia de rotura, bem como a análise da distribuição de tensões ao longo da junta.

Na quarta fase, esta abordagem permitiu avaliar, de forma sistemática e comparativa, o impacto de diferentes geometrias de junta, materiais dos aderentes e tipos de adesivo no desempenho mecânico das ligações, assim como validar os modelos computacionais com base nos resultados experimentais.

1.4. Organização do relatório

A dissertação está estruturada em quatro capítulos principais, organizados de forma a refletir a sequência lógica do trabalho realizado.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução geral à dissertação, primeiramente com a contextualização do tema e respetivo destaque da relevância no âmbito científico e tecnológico. De seguida, são definidos os objetivos principais do trabalho, bem como a metodologia do mesmo. Por fim, é descrita a estrutura do documento, que fornece ao leitor uma visão global da organização da dissertação.

O Capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica, onde se apresentam os fundamentos teóricos associados às ligações adesivas, incluindo vantagens, desvantagens e conceitos base, bem como os principais métodos de previsão da resistência. É igualmente abordado o fabrico aditivo, destacando-se as suas tecnologias, aplicações e limitações e finaliza-se com uma análise específica da utilização de ligações adesivas em componentes fabricados por este processo.

O Capítulo 3 é dedicado ao desenvolvimento do trabalho experimental e numérico. A primeira parte descreve os materiais utilizados, as geometrias das juntas, o processo de fabrico, os ensaios realizados e os resultados experimentais obtidos. São analisados os modos de rotura, as curvas $P-\delta$, a $K_{máx}$ e a energia de rotura. A segunda parte incide sobre a modelação numérica, detalhe da preparação dos modelos, a implementação das leis coesivas e a determinação dos parâmetros. Segue-se a apresentação dos resultados numéricos e a comparação com os ensaios experimentais.

Por fim, no Capítulo 4 apresentam-se as conclusões gerais do estudo e são sugeridas linhas de investigação futura, com vista ao aprofundamento e à consolidação do conhecimento na área das ligações adesivas em componentes de fabrico aditivo.

Introdução

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ligações adesivas

Com o passar dos anos, a evolução da indústria e tecnologia mecânica desenvolveram novos meios e métodos, o que permite um maior número de soluções para inúmeros problemas. Atualmente, nos processos de ligação, observa-se que para além da evolução dos mais tradicionais, estes já incluem outros tipos de ligação que se estão a tornar bastante competitivos na indústria. Atualmente é possível unir materiais através de processos de ligações mecânicas (ligação aparafusada e/ou rebitada), ligações soldadas, ligação adesiva e outros tipos de ligação (ligação por solvente, ligação por encaixe ou *clinched*).

2.1.1. Vantagens/desvantagens

As ligações adesivas apresentam diversas vantagens face aos restantes processos de ligações, pelo que se têm tornado cada vez mais preponderantes nas diferentes indústrias como automóvel, espacial, aeronáutica, eletrónica, civil, entre outras [1, 2]. Porém, tal como os outros métodos de ligação estas apresentam vantagens e desvantagens (Tabela 1).

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens de ligações adesivas [1-3]

Vantagens	Desvantagens
Reduz e/ou elimina concentrações de tensões.	É necessário um tratamento térmico das superfícies.
Maior resistência à fadiga.	A cura do adesivo pode ser bastante demorada.
Elevada capacidade de amortecimento de vibrações.	Pode ser necessário aplicar temperatura e pressão.
Permite ligar e vedar simultaneamente.	Características afetadas por condições de processamento.
Promove o isolamento acústico.	Durabilidade limitada em condições extremas de serviço.
Reduz o peso da estrutura.	Pode necessitar de ferramentas especiais para garantir o posicionamento e alinhamento dos aderentes.
De uma maneira global torna-se económico.	Pode ser mais dispendioso face à fixação mecânica.
Processo simples e mais rápido que os restantes processos.	Desmontagem impossível ou muito difícil.
Fácil de automatizar.	Fraca resistência à propagação de fissuras.
Capacidade de ligar aderentes sensíveis ao choque.	Fraca resistência a arrancamento e/ou clivagem.
Resistência a corrosão.	A variação da fluidez do adesivo quando sujeito continuamente a uma fonte de calor.
Permite ligar formas com diferentes espessuras, formas ou até superfícies irregulares.	Tempo de vida limitado.
Combinação de materiais similares ou dissimilares.	Há adesivos que possuem uma grande toxicidade e inflamabilidade.
Não há alterações estruturais e não danifica os materiais.	

2.1.2. Conceitos de base

As juntas adesivas são compostas por um adesivo (material polimérico capaz de unir dois corpos), é considerado estrutural caso possua uma resistência ao corte que exceda 6.9MPa. Quando se processa a junta, é necessário reconhecer que nos dois aderentes existe dois processos de união, adesão (entre adesivo e aderente) e coesão (atração entre moléculas e/ou átomos do adesivo). As juntas possuem duas regiões com propriedades distintas, uma delas é denominada de Interfase (zona onde ocorre o contacto entre o adesivo e a superfície do aderente, esta zona permite visualizar as alterações das suas propriedades tanto do adesivo como do aderente) e a outra de Interface (camada limite correspondente ao plano de contacto entre adesivo e aderente, este está contido na interfase) [1].

Quando se escolhe/manuseia um adesivo deve-se ter em conta diversos fatores, sendo um deles o processo de cura (um processo onde se desenvolve uma reação química, normalmente definida pelo fabricante, que por vezes envolve a aplicação de pressão e temperatura). É importante garantir que o tempo de cura é cumprido até ao final, pois este é um ponto que influencia drasticamente a resistência da junta. Os outros fatores que devem ser alvos de análise são a Validade (o tempo que o adesivo pode permanecer guardado mantendo-se adequado para ser usado), Vida útil (tempo ao qual o adesivo permanece em condições de uso após mistura), o Tempo fabrico (tempo máximo que o adesivo pode estar exposto a atmosfera antes de fechar a junta) e o tempo de manuseamento (tempo mínimo necessário para que o adesivo ofereça resistência suficiente para que possa ser manuseado) [1].

2.1.3. Esforços aplicados

Para perceber o comportamento das juntas adesivas, é importante reconhecer os modos de rotura quando solicitadas a esforços de tração/compressão, corte, clivagem e arrancamento.

- Esforços de tração/compressão

As forças são aplicadas na junta perpendicularmente ao plano de ligação, como se pode ver nas Figura 1 e Figura 2, o que conduz uma distribuição de tensões uniforme ao longo do comprimento de ligação [2].



Figura 1 - Junta sujeita a esforços de tração [1] Figura 2 - Junta sujeita a esforços de compressão [1]

- Esforços de corte

Ao contrário dos esforços de tração/compressão, estes são aplicados paralelamente ao plano de ligação, o que provoca escorregamento entre os dois aderentes e o adesivo (Figura 3). Neste caso, a distribuição das tensões de corte resultantes não é uniforme, o que leva a concentração destas tensões nas extremidades das juntas. Em determinadas juntas, como as de sobreposição

simples, é possível aumentar a resistência da junta sem alterar a área da junta adesiva. Este feito é refletido através do aumento da largura da junta, pois esta permite obter uma maior secção transversal face à carga aplicada, dando origem ao aumento da resistência [2].



Figura 3 - Junta sujeita a esforços de corte [1]

- Esforços de clivagem/arrancamento

Os esforços de clivagem são semelhantes aos esforços de tração, já que são aplicados esforços que se traduzem em forças perpendiculares ao plano de tração. Porém, a carga destes é aplicada numa extremidade da junta (Figura 4), o que dá origem a uma concentração de tensões muito maior numa das extremidades do adesivo. Os esforços de arrancamento são semelhantes aos esforços de clivagem. Porém no arrancamento um ou mais dos aderentes é flexível, o que permite observar o fenómeno, representado na Figura 5. Neste caso, os aderentes fletem e apresentam um ângulo de separação maior face ao arrancamento, o que por sua vez se traduz numa menor resistência da junta comparativamente à utilização de aderentes rígidos. Pelos motivos referidos, os esforços de arrancamento/clivagem são evitados em ligações adesivas.



Figura 4 - Junta sujeita a esforços de clivagem [1]

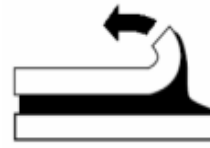


Figura 5 - Junta sujeita a esforços de arrancamento [1]

2.1.4. Configurações de juntas e roturas mais comuns

Na indústria, as juntas adesivas possuem diversas configurações, cuja seleção constitui um fator decisivo na resistência da junta. Como tal, a sua escolha deve permitir obter o melhor resultado possível. Na Figura 6 podem-se visualizar as configurações mais comuns e respetiva designação. As configurações de juntas mais comuns são as juntas de sobreposição simples (*SLJ*), as juntas de sobreposição dupla (*JSD*), as juntas com chanfro interior (*SCARF*) e as juntas com degrau. A configuração *SLJ* é a mais utilizada em contextos teóricos e práticos mesmo que esta apresente flexão nos aderentes (fenómeno minimizado nas *JSD*, *SCARF* e degrau, que apresentam uma diminuição nos esforços de arrancamento e excentricidade da carga aplicada), pois é menos dispendiosa e de fabrico mais expedito do que as restantes [4]. Embora as configurações *SLJ* sejam as mais utilizadas, as juntas mais simples de fabricar são as juntas topo a topo. No entanto, estas últimas são menos utilizadas que as *SLJ* devido à sua menor área de ligação e sensibilidade a esforços de flexão [1, 5, 6]. Existem também as juntas cobre-junta (cobre-junta simples e cobre-junta dupla) que se destacam das restantes por reduzirem o momento fletor, e as juntas tubulares, que são geralmente utilizadas para unir varões e tubos, e se destacam das juntas topo a topo devido à maior área de ligação, o que aumenta a área resistente.

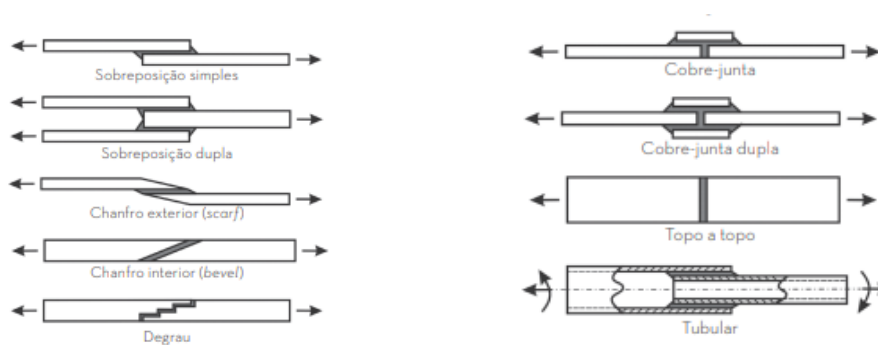


Figura 6 Configurações de juntas adesivas mais comuns (adaptado de [2])

Com base na configuração, propriedades dos materiais e diferentes esforços aplicados, as juntas podem apresentar diferentes modos de rotura, no caso:

- Rotura coesiva adesiva - Este tipo de rotura ocorre quando as forças de adesão são inferiores às forças de coesão, o que conduz à rotura na interface entre o aderente e o adesivo (Figura 7 a). Uma das principais causas deste tipo de roturas são as más preparações da superfície, o que reduz a ancoragem do adesivo no aderente [7];
- Rotura coesiva - A rotura tem lugar no interior do adesivo (Figura 7 b), o que mostra que a força coesiva do adesivo é inferior à força adesiva [7];
- Rotura pelo aderente - A rotura ocorre no aderente (Figura 7 c). Esta rotura indica que a escolha do adesivo e a fabricação da junta foram executadas de maneira correta;
- Rotura mista - Nesta junta ocorrem os dois fenómenos em simultâneo, rotura coesiva adesiva e rotura coesiva, como se pode visualizar na (Figura 7 d). A rotura dá-se tanto no aderente como no adesivo, o que pode indicar uma má preparação do aderente e/ou utilização de um adesivo desadequado para a ligação [8].

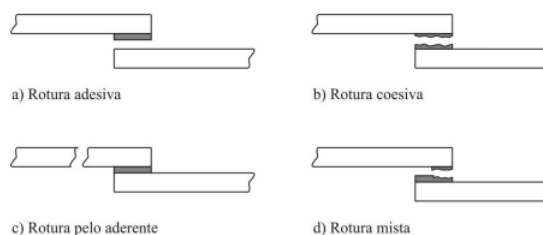


Figura 7 - Diferentes tipos de rotura em juntas adesivas [1]

2.1.5. Aplicações

As ligações adesivas apresentam, uma constante evolução envolvendo em diversos setores tais como a indústria automóvel, indústria aeroespacial, indústria naval, indústria eletrónica, construção civil, desportos, assim como na indústria têxtil e no calçado [8].

Indústria Automóvel

Com o objetivo de reduzir o peso dos automóveis e obter melhor desempenho, a indústria automóvel introduziu as juntas adesivas nos automóveis de modo a criar meios de ligação mais leves, o que permite reduzir o seu peso final, unir materiais dissimilares (uma grande

necessidade no mundo automóvel), aumentar a segurança em acidentes de viação, aumentar a rigidez, reduzir ruídos e vibrações, entre outros fatores [2].

Indústria Aeroespacial

Pioneira na utilização de adesivos em metal, a indústria aeroespacial sentiu a necessidade da utilização das ligações adesivas para conseguir realizar a união de componentes sem afetar a integridade da estrutura, o que permite por consequência diminuir o peso da mesma (tal como na indústria automóvel) e o aumento da resistência à fadiga [9-11].

Indústria Naval

A utilização dos adesivos neste meio, oferece um leque das mais variadas vantagens, desde a obtenção de propriedades físicas e mecânicas mais favoráveis ao meio, tais como: estruturas mais leves, distribuição de tensões, resistência corrosão galvânica, humidade e temperatura [9, 12]. Deste modo, apresentam valores economicamente mais apetecíveis para os fabricantes.

Indústria Eletrónica

Nesta indústria, os adesivos são usados/divididos em duas grandes funções, Isoladores e Condutores. Os condutores são geralmente utilizados para unir outros componentes elétricos e garantir a condutibilidade elétrica, enquanto os isoladores são adesivos que se destacam face aos restantes pela baixa condutividade térmica e elétrica, e possuem uma boa flexibilidade. Tal como o nome indica, estes são geralmente utilizados no isolamento de circuitos elétricos [2].

Construção Civil

Neste meio, as principais funções dos adesivos são a fixação de materiais de acabamento decorativo de interior e exterior, isolamento acústico e térmico, acabamentos, montagem de sistemas elétricos, e reforço e reparação de elementos estruturais. Devido aos esforços e condições a que estas ligações estão sujeitas, não existe uma variedade de adesivos que possa ser utilizada para o exterior como para o interior [2, 13]. Na Figura 8 está representada algumas das funções dadas aos adesivos nas indústrias referidas anteriormente.

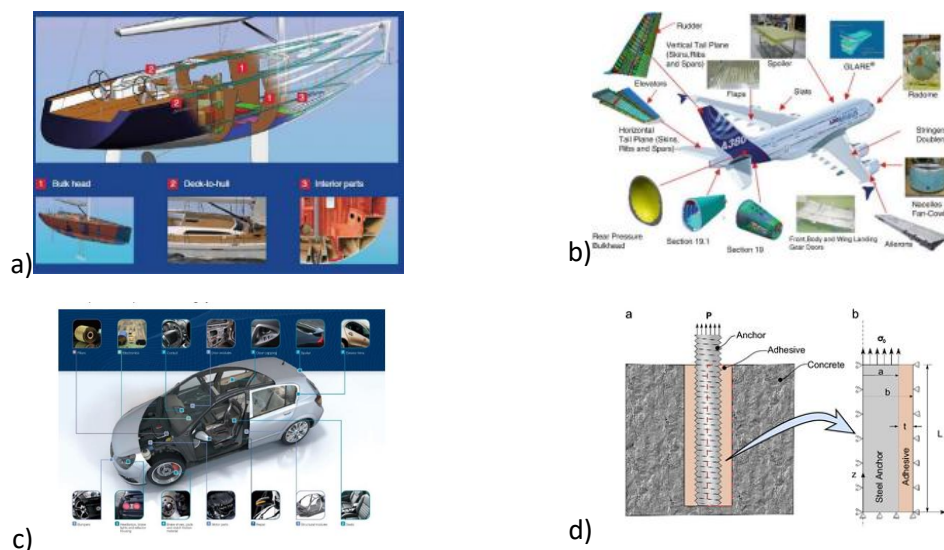


Figura 8 -a) Indústria Naval, b) Indústria Aeroespacial c) Indústria Automóvel d) Construção Civil [14-16]

2.1.6. Previsão de resistência

O processo evolutivo das juntas adesivas exige o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a sua eficiência e ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas causado pela falta de modelos de materiais precisos e de critérios de rotura adequados. As duas metodologias aplicáveis para a análise de juntas adesivas são as análises de métodos analíticos e de métodos numéricos. Os avanços na investigação das juntas adesivas começaram com o modelo analítico de Volkersen [17]. Contudo, a formulação analítica torna-se mais complexa, entre os métodos numéricos, onde se destaca o Método de elementos finitos (MEF) [18]. Este método é o mais utilizado tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [19]. O MEF pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, seja pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda e um nível do esforço computacional acrescido [20]. Avanços recentes incluem na análise numérica a modelação de dano por MDC e o Método de Elementos Finitos Estendido (MEFX). A MDC acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, pela utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas. Por sua vez, o MEFX utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.1.6.1. Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos é uma área da mecânica que estuda o comportamento dos materiais assumindo que estes são contínuos, isto é, que as suas propriedades físicas estão distribuídas de forma contínua no espaço. Esta abordagem permite descrever e prever o estado de tensão, deformação e energia de deformação nos materiais através de modelos analíticos ou numéricos, como o MEF. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, o modelo de Volkersen [17], considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [6] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [21]. Estes critérios não consideram as concentrações de tensões em entalhes e ranhuras, assim como de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [19], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.1.6.2. Mecânica da fratura

A mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis a causar uma rotura catastrófica, ou se durante o período de vida da estrutura, a fenda mantém-se com dimensões inferiores às críticas. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [22]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [23], que concluiu que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico. No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [24]. Porém esta teoria não é apropriada para modelar roturas dúcteis, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [25] e por Rice [26] que permite modelar roturas estáveis antes da rotura. Em juntas adesivas, utiliza-se a taxa de libertação de energia, G_I (tração) ou G_{II} (corte), e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [27], em vez de fatores de intensidade de tensão, devido a dificuldade de os determinar perto das interfaces. A fratura de juntas adesivas ocorre em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos aderentes, pelo que é necessário introduzir o conceito de envelope de fratura, que relaciona a tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes.

2.1.6.3. Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC surgiu com os estudos de Barenblatt [28] e Dugdale [29], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [30].

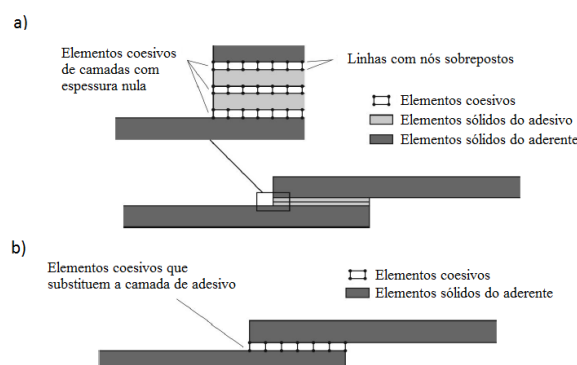


Figura 9 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura nula: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [31])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [32]. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos, e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos - aproximação local [33], ou diretamente entre dois materiais (Figura 9), para simular uma camada fina de material, por exemplo uma ligação adesiva - aproximação contínua [34]. Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos iniciais, através da implementação das leis de tensão-deslocamento entre os nós emparelhados. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, pelo que representam a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são geralmente lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser ajustadas para possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [35]. *Softwares*, como o caso do Abaqus®, implementam MDC para análises estáticas em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D). Contudo o modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [36].

2.1.6.4. Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo descreve a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados estabelecem um parâmetro de dano para a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [30]. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [37] para a delaminação de compósitos, e Khoramishad et al. [38] para camadas finas de adesivo. As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [39]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [40] ou do número de ciclos para análises de fadiga [41, 42], sendo recomendada para casos de dano seja generalizado ou de trajetória desconhecidas, ao contrario dos MDC, limitam a propagação a trajetos pré-definidos [43]. Hua et al. [44] propuseram um modelo independente da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental, calibrado com ensaios à fratura em modo misto. Este modelo introduz um parâmetro de dano dependente da humidade e deslocamento, garantindo previsões coerentes com os resultados experimentais. Chen et al. [45] usaram uma técnica da mecânica do dano em *SLJ* baseada na energia de deformação plástica média e a carga de rotura. Elementos que atingiam a condição de rotura tinham os valores do módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν) do material reduzidos quase até zero para simular a rotura. A comparação de resultados por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.1.6.5. Método dos elementos finitos estendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas. Baseia-se na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 (resistência coesiva à tração/resistência coesiva ao corte) ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamento à tração/deslocamento ao corte) utilizados no MDC, pela mesma ordem. Uma vantagem significativa do MEFEX, é a fenda passar a poder propagar-se livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [46]. Belytschko e Black [47], apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces [48]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda. O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, representado por uma matriz constitutiva que relaciona tensões com separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões ou deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação, lineares ou exponenciais, simulam a degradação dos materiais até à fratura [49].

2.1.7. Estado-da-arte

Com o objetivo de apresentar os desenvolvimentos mais relevantes dos modelos numéricos descritos, apresentam-se estudos numérico com relevância em juntas adesivas na Tabela 2.

Tabela 2 - Estado de arte de métodos de previsão.

Referência Bibliográfica	Descrição do trabalho
Barbosa et al. [50]	Este artigo analisou de forma experimental e numérica o comportamento de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços axiais, quando utilizados três tipos de adesivos diferentes. Para a validação numérica, foram aplicados os métodos da Mecânica dos Meios Contínuos, desenvolvidos por meio do MEF e do MDC. Os resultados indicaram que, para pequenos comprimentos de sobreposição, adesivos mais frágeis apresentam um melhor desempenho do que os adesivos dúcteis, e o inverso ocorre para comprimentos de sobreposição maiores. Quando comparados aos resultados experimentais, observou-se que apenas um adesivo apresentou uma grande divergência nos resultados.

Tabela 2 - Estado de arte de métodos de previsão (continuação)

Dionísio et al. [51]	Este artigo descreve como conceitos da mecânica da fratura foram utilizados para propor e avaliar um modelo capaz de determinar as singularidades de tensão associadas aos critérios ISSF (<i>Intensity of Singular Stress Fields</i>) em materiais compósitos. Para o efeito, foram usadas juntas de polímeros reforçados com fibra de carbono e adesivo frágil e uma diversidade de comprimentos de sobreposição. O modelo proposto para determinar as singularidades de tensão críticas envolveu a aplicação dos valores médios de P_m , obtidos experimentalmente, como carga imposta nas simulações numéricas do MEF para cada valor de comprimento. Com base nos resultados, foi recomendado prever a resistência das juntas utilizando um valor de comprimento superior ao utilizado na determinação das tensões críticas.
L. Ramalho e R. Campilho [52]	Este artigo tem como principal objetivo descrever e comparar métodos relevantes na previsão da resistência da junta adesiva (analítica e numericamente). Onde se comprovou que o modelo de dano coesivo é o método mais utilizado para a análise de juntas adesivas, com a possibilidade de beneficiar de ferramentas de calibração mais eficientes e menos demoradas, além disso, apresenta uma grande disponibilidade em diversos softwares comerciais, o que pode representar um avanço na sua utilização. O MEFX ainda não está totalmente desenvolvido para aplicação em juntas adesivas, porém apresenta um grande potencial se este for melhorado com novas formulações que consigam superar as limitações discutidas no mesmo artigo, Em suma, a utilização de métodos sem malha para juntas adesivas ainda está nos primeiros passos, mas, caso sejam incorporados critérios de fratura ou de danos para simular o crescimento do dano, certamente serão um avanço importante para permitir que esses métodos concorram com o MEF.
Eusebio e Campilho [53]	Com o objetivo de utilizar o MEFX para estudar o comportamento de juntas tubulares adesivas com diferentes adesivos e comprimentos de sobreposição, as previsões deste método são avaliadas através da comparação entre as cargas máximas previstas e as experimentais. Com este estudo, foi possível verificar, ao testar diferentes critérios de iniciação de dano, que alguns critérios não permitem a previsão precisa da resistência da junta, enquanto outros resultaram em valores muito próximos aos obtidos experimentalmente. Em suma, com uma escolha dos critérios de iniciação e propagação de danos viável, o método MEFX constitui uma ferramenta de projeto robusta e recomendada para este tipo de ligações.

Tabela 2 - Estado de arte de métodos de previsão (continuação)

Rosas et al. [54]	Este trabalho tem como base a análise experimental de juntas tubulares de alumínio com Araldite e a análise numérica através de MDC. Os ensaios têm como base a aplicação de esforços traça, em juntas com diferentes geometrias (chanfro exterior, chanfro interior, filete de adesivo em ambas as extremidades e filete adesivo com chanfro interior). A junta de chanfro exterior apresenta reduções de tensões significativas e oscilações na resistência da junta, as juntas com chanfro interior apresentaram reduções de tensões de arrancamento, porém aumentaram as tensões de corte, as juntas com filete adesivo em ambas as extremidades representam um aumento na resistência da junta e as juntas com filete adesivo e chanfro interior apresentam um aumento da resistência. Conclui-se assim, que as variações de geometria não demonstram grandes melhoria na resistência das juntas.
De Sousa et al. [55]	Este artigo apresenta como principal objetivo comparar métodos analíticos e numéricos para a previsão da resistência de <i>SLJ</i> de alumínio, com diferentes comprimentos de sobreposição e com diferentes adesivos. Foram utilizados dois métodos numéricos, MEFX e MDC. Conclui-se assim que o MDC é um método muito preciso, com a exceção das juntas compostas por adesivos muito dúcteis, ao contrário do MEFX, que não provou ser adequado, especialmente se este apresentar propagação de fendas em modo misto.

2.2. Fabrico aditivo

2.2.1. Caracterização geral do processo

O fabrico aditivo (FA) ou *additive manufacturing* (AM), mais conhecido como impressão 3D, é um método de fabricação camada por camada. O método inicia-se através de um ficheiro CAD (*computer aided design*) da peça pretendida, que posteriormente dá origem a um ficheiro em linguagem STL (*standard tessellation language*) de modo a ser interpretado pelas máquinas para que estas iniciem o processo de deposição de camadas (modelos 2D) de material que se unem à camada inferior. Este processo repete-se sucessivamente até à última camada de modo a reproduzir o modelo 3D pretendido/idealizado, como podemos visualizar na Figura 10 [56-58]. Ao contrário dos outros processos de fabrico convencionais (que apresentam por base a remoção de material), AM caracteriza-se capacidade de produzir as peças apenas com adição de material [59, 60]. Inicialmente, AM era um processo de fabrico bastante com utilização marginal, porém, nas últimas décadas, com a quarta revolução industrial (indústria 4.0), este tem-se tornado popular devido a possibilidade de construir componentes de geometrias mais complexas e/ou com certos materiais que seria bastante difícil, por vezes impossível, de obter com outros métodos de forma sustentável e ambiental, o que torna o AM um processo com potencial de se integrar e desenvolver em grandes produções [61-63].

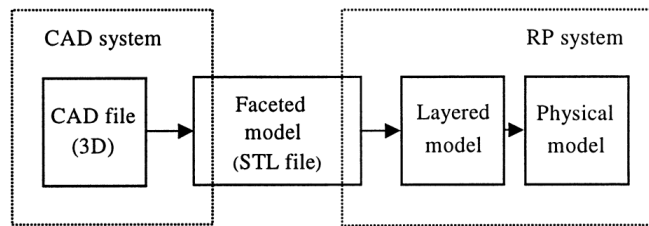


Figura 10 - Transformação do modelo 3D para produto final [64]

2.2.2. Vantagens e limitações do fabrico aditivo

No âmbito da indústria 4.0, as empresas necessitam de uma maior eficiência, flexibilidade, qualidade e redução de custos, características conseguidas através da integração da cibe física (sistemas físicos e digitais). Estas necessidades são algumas características encontradas no fabrico aditivo, o que permite com que se considere AM um dos processos revolucionários desta indústria [65, 66]. O AM possui uma vasta lista de particularidades que o destacam face aos restantes métodos, tanto, na Tabela 3 estão representados algumas das vantagens e desvantagens deste processo.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do processo aditivo [58, 63, 67-70]

Vantagens	Desvantagens
Produção de peças complexas.	Limitação do tamanho, tolerâncias e precisão.
Menor desperdício de material.	Propriedades mecânicas limitadas.
Sustentabilidade.	Investimento inicial elevado.
Melhoria da eficiência da cadeia de fornecimento.	Baixa qualidade superficial.
Flexibilidade.	Velocidade de impressão.
Não à necessidade de ferramentas complementares (por exemplo fresas, moldes ou matrizes).	
Produção descentralizada.	

2.2.3. Tecnologias de fabrico

Neste tópico são abordadas as principais tecnologias de fabrico aditivo, nomeadamente *binder jetting*, *directed energy deposition*, *material jetting*, *material extrusione* e *vat polymerization*.

2.2.3.1. Binder jetting

O *binder jetting* (BJ), esquematizado na Figura 11, é um processo do fabrico aditivo que consiste na deposição e nivelamento do material em forma pó para posteriormente, de um modo estratégico, ser depositado um agente de ligação líquido na zona onde se pretende solidificar o material, para que este cure quando exposto a uma luz ultravioleta. Este processo é repetido até se obter o produto final [63]. Após a obtenção do componente, este é limpo e deixado a curar à temperatura ambiente.

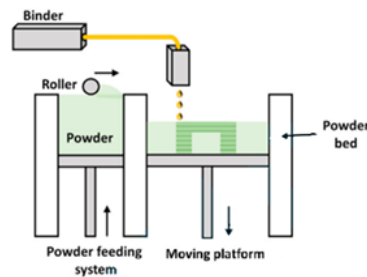


Figura 11 - Representação esquemática do processo BJ [71].

Neste método, os materiais mais utilizados pertencem às famílias dos aços inoxidáveis, cerâmicos, ligas Inconel e ferro fundido. Estes materiais possuem propriedades distintas, o que lhes permite ter uma ampla gama de aplicações. No caso do aço inoxidável e dos cerâmicos, estes apresentam excelente resistência ao calor e à corrosão, alta permeabilidade e boa resistência à tração, sendo normalmente usados em componentes de brocas e bombas. As ligas Inconel possuem boas propriedades mecânicas e alta densidade, o que as torna mais comuns em componentes como lâminas de turbinas, geradores de vapor e reatores. O ferro, que também apresenta boas propriedades mecânicas e resistência ao desgaste, é comumente utilizado em componentes automotivos e ferramentas [58, 72].

2.2.3.2. Directed energy deposition

A *directed energy deposition* (DED) ou deposição de energia direcionada, esquematizado na Figura 12, é uma técnica de fabricação aditiva que necessita de um sistema de dois bicos de injeção, um para o material e outro para a fonte de calor. O material é depositado por camadas em estado sólido ou líquido por um dos bicos, e fundido através da fonte de energia térmica (laser, feixe de elétrons, arco elétrico ou arco de plasma transferido) proveniente do outro bico de calor. Este é um processo contínuo até obter o produto final [58, 63, 73].

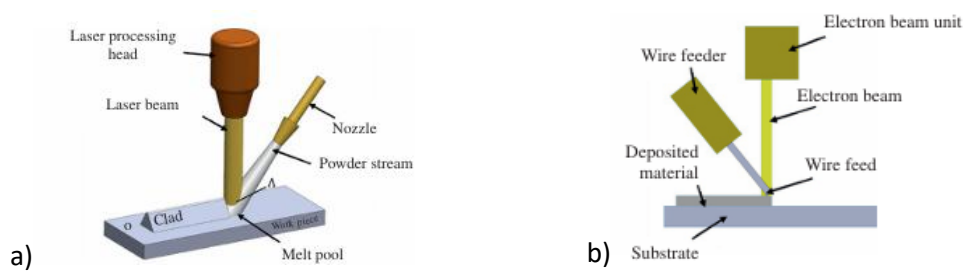


Figura 12 - a) DED por laser [56] b) DED por feixe de elétrons [74]

Os materiais utilizados nesta tecnologia incluem titânio, alumínio, aço inoxidável, cobre, Inconel e cerâmicos. O titânio destaca-se pela sua resistência à corrosão e à expansão térmica, elevada resistência mecânica e baixa densidade, características que o tornam ideal para aplicações em reparações de automatismos e na indústria aeroespacial. Por sua vez, o alumínio, devido à sua baixa densidade, excelente condutividade elétrica e facilidade de processamento, é frequentemente utilizado no condicionamento e reparação de peças já fabricadas. Por sua vez o cobre é um material mais utilizado em aplicações elétricas devido a sua alta condutividade elétrica. Por fim as cerâmicas que são usadas no setor aeroespacial devido a capacidade de

suportar altas temperaturas, assim como as ligas de Inconel que se destacam também pela capacidade de operarem em ambientes de alta temperatura o que leva a que estas sejam mais utilizadas no setor aeroespacial e energético. [58, 74].

2.2.3.3. *Material extrusion*

No processo *material extrusion*, também denominado FDM, o material é previamente aquecido até temperaturas próximas da temperatura de fusão, para mais tarde ser depositado por extrusão, como se pode verificar na Figura 13. O processo de deposição encontra-se dependente de variáveis que afetam a qualidade dos componentes fabricados, desde parâmetros de impressão. A velocidade de deposição do material ou aquecimento da superfície de deposição a parâmetros estruturais (ângulo de varrimento, densidade e orientação das camadas) [72, 75, 76]. Este processo é normalmente utilizado com polímeros termoplásticos e alguns filamentos metálicos.

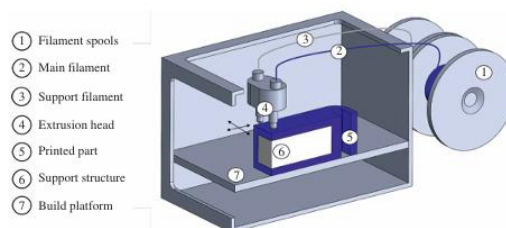


Figura 13 - Representação esquemática do processo FDM [63]

Este processo permite a fabricação de componentes através dos seguintes materiais designados como polímeros e plásticos, no caso, ABS, Nylon, PC, PPSF, PEI, PLA e TPU. O ABS caracteriza-se por ser um material forte e duro sendo mais utilizado nas indústrias médicas, indústria automóvel e indústria aeroespacial, já o nylon apresenta boa resistência química, resistência à fadiga e ao impacto, é um material ideal quando aplicado em materiais que necessitem de proteções contra impacto, peças sujeitas a fadiga, cobertura de antenas e ferramentas de produção personalizadas, o PC com alta resistência a tração e a flexão é normalmente utilizado em protótipos funcionais, ferramentas e acessórios, outro dos materiais usados o PPSF, caracterizado pela sua excelente resistência química, resistência à térmica e mecânica, é utilizado em dispositivos médicos esterilizáveis, protótipos automóveis e ferramentas para aplicações exigentes, aplicações numa variedade de indústrias que necessitem esterilização, no caso do PEI, este caracteriza-se pela sua biocompatibilidade acompanhada de excelente estabilidade mecânica, química e térmica é usado em prototipagem rápida e aplicações de ferramentas avançadas nas indústrias aeroespacial, automóvel, médica e de produção alimentar, o PLA que apresenta uma boa resistência a tração e qualidade superficial, torna-o ideal para modelos e protótipos que necessitem de um melhor acabamento, por fim o TPU com excelente rasgamento, desgaste, impacto e a dureza, o que o torna altamente versátil quando se necessita de um material com propriedades semelhantes a borracha e plástico [58].

2.2.3.4. *Material jetting*

Material jetting é uma tecnologia que se tem tornado mais popular devido à capacidade de conseguir componentes com dois ou mais materiais distintos através do processo de cura por luz UV (ultra-violeta), como se pode visualizar na Figura 14. Por outro lado, este método apresenta baixo custo quando comparado a métodos que usam fontes de energia térmica. Neste método, o material é depositado sobre a fórmula de gotículas sobre um aderente que enfrenta um processo de cura de modo a ficar sólido o suficiente para suportar outra camada. Este processo repete-se sucessivamente até obter o produto final [63].

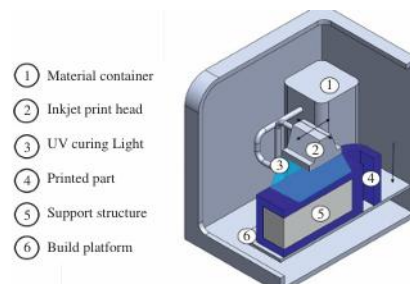


Figura 14 - Esquema de funcionamento do sistema *material jetting* [63]

Em *material jetting*, os materiais de adição mais utilizados na fabricação são *VeroWhitePlus*, *Digital ABS*, *Fullcure RGD 720*, *Rigur RGD 450*, *Rubber-like material*, *High-temperature material*, *bio compatible material* e *dental material*. O *VeroWhitePlus* é um material que se caracteriza pela sua durabilidade, rigidez e tolerâncias dimensionais o que o torna adequado a uma variedade de aplicações industriais, como carcaças eletrónicas, dispositivos médicos e peças de trabalho com características complexas, o *digital ABS* caracteriza-se por ser um material que possui uma maior resistência a deflexão térmica, o que se adequa a protótipos funcionais, moldes de injeção, ferramentas de fabrico, carcaças de eletrónica, modelos de apresentação duráveis, peças para motores e tampas, já o *Fullcure RGD 720*, apresenta transparência com acabamento superficial liso, o que torna este material apto a aplicações médicas, visualização do fluxo de líquidos, testes de ajuste de peças translúcidas como vidro, óculos e modelagem artística, o *Rigur RGD 450*, com branco brilhante e características semelhantes ao polipropileno é um material ideal para dobradiças vivas, embalagens, recipientes, reutilizáveis e fechamentos flexíveis nas indústrias automóveis, o *rubber-like material* caracterizado por elastómeros adequa-se a punhos sobre moldados, juntas simuladas, anéis de vedação, teclados e botões, o *high-temperature material* como o nome indica, este material apresenta uma grande resistência ao calor sendo o material ideal para aplicações de teste, como o fluxo de água quente ou o fluxo de ar quente em torneiras e tubos, já o *bio compatible material* apresenta uma transparência e estabilidade dimensional que se adequam a componentes que estejam em contacto com a pele, e por fim *dental material* que possuem uma boa resistência, alta precisão e durabilidade são usados em materiais dentários como o nome indica [58, 72].

2.2.3.5. *Powder bed fusion*

A *powder bed fusion* (PBF), representada na Figura 15, é a tecnologia mais utilizada no fabrico aditivo de metais, pois é através desta que se consegue produzir peças com maior qualidade

[63]. Este processo realiza o depósito de material em pó uniformemente sobre a superfície, que posteriormente é derretido através de uma fonte de calor (laser ou feixe de elétrons) que apenas funde o pó na área pretendida. Após a fusão todo o processo de deposição, nivelamento e fusão serão repetidos até alcançar a camada fina [71, 77].

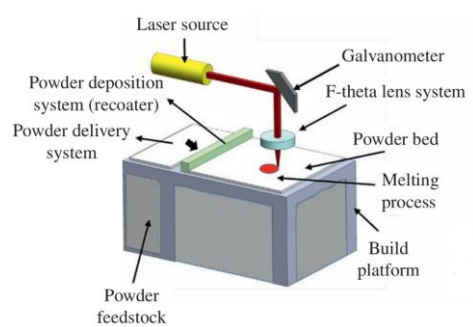


Figura 15 - Representação esquemática do processo de PBF através de laser [63]

No processo PBF, os materiais mais utilizados são o titânio, o aço inoxidável, o alumínio, ligas de níquel e a liga de cobalto-cromo. O titânio é um material que possui como principais características uma boa resistência a corrosão, biocompatibilidade, baixa expansão térmica, baixa densidade e alta resistência a tração, é usada na tecnologia médica, aeroespacial, automóvel, marítima, joalheria e design. O aço inoxidável destaca-se pela sua resistência à corrosão e à expansão térmica, alta resistência e baixa densidade, propriedades que o tornam adequado para uma vasta gama de aplicações, tais como design, implantes médicos, indústria naval, indústria química, indústria aeroespacial e indústria automóvel. A liga de cobalto-cromo, por sua vez, é caracterizada por uma maior dureza, excelente resistência à corrosão e boa ductilidade. Devido a estas propriedades esta liga, é amplamente utilizada no sector médico e dentário, bem como em indústrias que exigem propriedades térmicas superiores, como por exemplo em motores. Por último, as ligas de níquel, conhecidas pela sua excelente soldabilidade, capacidade de endurecimento e resistência à corrosão, são frequentemente aplicadas em componentes da engenharia aeroespacial e na fabricação de ferramentas [58, 72].

2.2.3.6. *Sheet lamination*

Sheet lamination, ou laminação de folhas, é um processo baseado na sobreposição e união de folhas de material para obter a forma da componente pretendida. Neste processo são usadas camadas pré-feitas de material que, posteriormente à colocação de cada camada, são consolidadas através de processos ultrassônicos ou brasagem, como observa na Figura 16. Este método utiliza principalmente materiais como polímeros, compósitos, papel e metais. A aplicação de polímeros e compósitos é particularmente relevante na indústria do papel, na qual os compósitos se destacam devido ao alto módulo de rigidez, baixa densidade e excelente resistência à fadiga. Os cerâmicos, por sua vez, são mais frequentemente utilizados nas indústrias de fundição e forjamento, devido à sua resistência térmica e mecânica. O papel, embora associado à indústria gráfica. É cada vez mais utilizado na indústria eletrotécnica, graças à sua boa condutividade elétrica, por fim, os metálicos apresentam propriedades mecânicas superiores, o que os torna ideais para aplicações em estruturas inteligentes [58, 78].

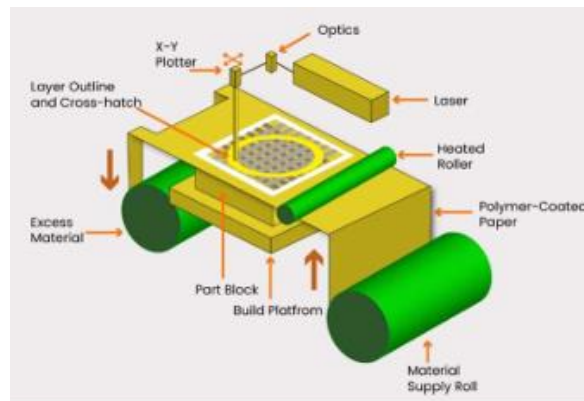


Figura 16 - Representação esquemática do processo *sheet lamination* [79]

2.2.3.7. Vat polymerization

O *vat polymerization*, representado na Figura 17, é um método baseado na deposição de um líquido polimérico por camadas. Posteriormente à colocação de cada camada, este líquido é curado através de um processo chamado de polimerização segundo o qual, através de luz UV, o polímero cura até se obter o produto [80].

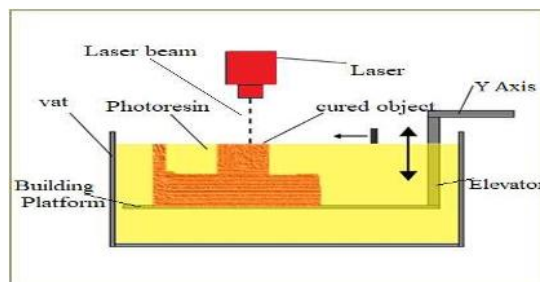


Figura 17 - Representação esquemática do processo *vat polymerization* [81]

O *vat polymerization* é um método que opera essencialmente com resinas como material de depósito para produzir as peças. Essas resinas estão subdivididas em resinas foto poliméricas (DC 100/ DC 500) que se destacam pela sua durabilidade, sendo mais usado em fundição e peças de joalheria, resinas específicas para impressão 3D (DL 350/ DL 360), são resinas feitas de materiais resistentes e flexíveis o que proporciona a possibilidade de produzir peças para fins industriais, resinas biocompatíveis (AB 001) estas tal como as específicas para impressão 3D, apresentam elevada resistência porém são mais rígidas e apresentam características elétricas o que as permite ser usadas em peças que se pretendam ter como principais características a resistência e superfícies lisas, resinas para prototipagem (GM 08), estas resinas apresentam elevadas resistências assim como flexibilidade e elasticidade sendo utilizadas em peças que não necessitem grandes acabamentos, por fim, resinas para peças duradouras (DM 210), estas apresentam propriedades cerâmicas e bom um acabamento sendo utilizadas em protótipos/peças que necessitem de maior resistência mecânica e/ou em joalherias [58, 72].

2.2.4. Aplicações de fabrico aditivo

Atualmente, o fabrico aditivo apresenta um vasto leque de aplicações no ramo das engenharias nas indústrias automóvel e aeroespacial, como nas medicinas e odontologias, energias, meios de defesa, na exploração de recursos naturais, na construção civil e na indústria alimentar [69, 82], como se pode ver na Figura 18.

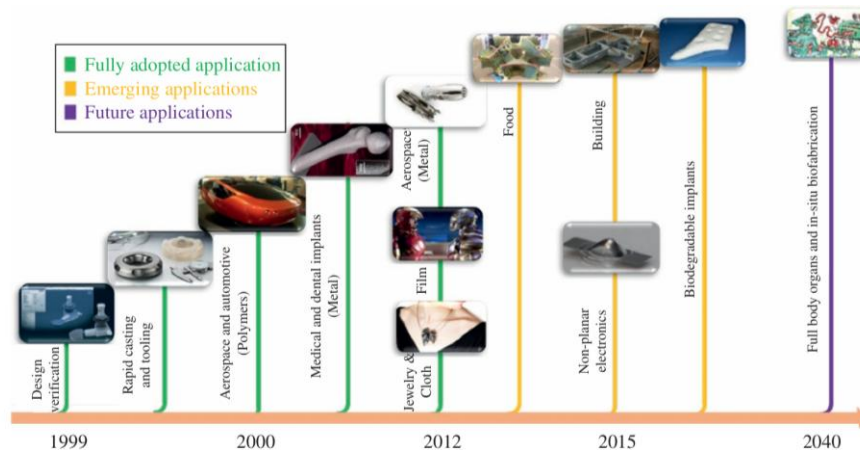


Figura 18 - Principais aplicações do fabrico aditivo [63]

Dentro das principais engenharias descritas, na engenharia automóvel e engenharia aeroespacial o FA destaca-se ao ser usado para produzir rapidamente protótipos e sob procura, produzir peças de alto desempenho e personalizar componentes existentes de uma maneira mais eficiente. Nos meios de defesa e exploração de recursos naturais, este método destaca-se pela versatilidade que atende em várias áreas destas indústrias sendo bastante usado em personalização e reparação de equipamentos [63]. Na medicina este processo é utilizado para o fabrico de próteses e implantes, pois este permite ajustes personalizados ao corpo do paciente e encaixes perfeitos de maneira rápida e eficiente [63]. Na construção civil, este torna-se mais usado em módulos estruturais para paredes e colunas, em formas complexas e exclusivas, no fabrico de protótipos e elementos para fins decorativos [68].

2.2.5. Equipamentos e características

O fabrico aditivo apresenta uma vasta gama de equipamentos com inúmeras variações nos seus princípios tecnológicos, capacidades e aplicações. A seleção de um equipamento baseia-se em vários fatores, como o material utilizado, a precisão dimensional pretendida, o volume de produção e as especificações da aplicação final. Os equipamentos de fabrico aditivo podem ser classificados de acordo com a tecnologia utilizada, sendo as principais a fusão por laser, a sinterização seletiva por laser (SLS), o fabrico por FDM e a *stereolithography* (SLA) [65, 80, 83, 84]. Contudo, os equipamentos diferem também nas suas características técnicas como a precisão dimensional, a compatibilidade de materiais, a velocidade de produção, a dimensão de construção pretendida e os requisitos de pós-processamento [65, 83, 84]. Na Tabela 4 encontram-se exemplos representativos de impressoras 3D comerciais das várias tecnologias (FDM, SLS, SLA) e as suas características técnicas [85].

Tabela 4 - Lista de impressoras 3D subdividida nas tecnologias associadas e respetivas características fornecidas pelo fabricante [85-89]

<i>Equipamentos/ Características</i>	Stratasys F900	Formlabs Fuse 1+ 30w	Formlabs Form 2
Tecnologia de FA	FDM	SLS	SLA
Volume de impressão X × Y × Z (mm)	914,4×609,6×914,4	165×165×300	145×145×175
Espessura da camada (mm)	0,127≤0,254≤0,508	0,11	0,025≤0,050≤0,100
Diâmetro do foco do laser (mm)	-	0,247	0,14
Peso (kg)	-	114	13
Fonte de alimentação	230 VAC (trifásico) 50/60Hz, 40 A	230 VAC, 7.5 A (Circuito dedicado)	100-240 V, 1.5 A 50/60 Hz, 65 W
Ar comprimido	90-120 PSI	-	-
Materiais	ABS, Antero, ASA, Nylon PC, PPSF, PC-ABS, PC-ISO, ULTEM (1010 e 9085)	Nylon e TPU	Resina standard, castable, Bio compatible
Dimensões da impressora (mm ³)	2772×1683×2027	685×645×1065	350×330×520

2.2.6. Estado-da-arte

Na Tabela 5 estão apresentados estudos considerados relevantes para a análise dos processos de impressão referenciados neste subcapítulo.

Tabela 5 - Estudos realizados em AM

Referência bibliográfica	Descrição do trabalho
Miyajima et al. [90]	Neste estudo analisou-se como a velocidade de impressão no processo BJ afeta a precisão dimensional e o nível de saturação de equilíbrio da peça final. Dependendo da velocidade a que o ligante é depositado, este apresenta uma reação distinta com o pó, o que afeta a integridade da peça final. Com o aumento da velocidade de impressão registou-se uma menor precisão, sendo também possível alterar a variar a precisão dimensional tendo em conta a direção de impressão.
Sarkar et al. [91]	Neste artigo foi analisado o efeito da adição de diboreto de titânio (TiB ₂) no fabrico de Inconel 718 (IN718) através de DED. A necessidade de adição de TiB ₂ deve-se ao facto de este permitir reduzir/eliminar os defeitos que ocorrem entre camadas originados pelos depósitos. Concluiu-se, que a adição de TiB ₂ promove um refinamento dos grãos e elimina um dos principais fatores que promove o aparecimento das dendrites, pelo que ainda foi possível concluir que a taxa de fluxo de pó depositado durante o processo de fabrico é um dos principais fatores que afeta a densidade de energia de deposição, logo, ao baixar o caudal será possível reduzir também o defeito entre as camadas.

Tabela 5 - Estudos realizados em AM (continuação)

<p>Hsiang Loh et al. [92]</p>	<p>Este artigo mostra como ME é uma tecnologia de fabrico aditivo acessível e económica, frequentemente utilizada para produzir protótipos rápidos e escaláveis. A crescente utilização de impressoras ME levou ao desenvolvimento de estratégias de design e à necessidade de orientações para resolver problemas de forma eficiente, já que as informações disponíveis são muitas vezes fragmentadas. Os principais problemas identificados com ME estão relacionados com a incorreta calibração da impressora, com os parâmetros de impressão, roturas de hardware, material, modelo CAD e configurações de laminação. A pesquisa também apresentou diferentes soluções para os problemas observados, o que ajuda os utilizadores a identificar causas comuns em impressoras cartesianas, Delta, Polar e extrusoras adaptadas a braços robóticos. Por fim, os autores sugerem o desenvolvimento de guias interativos para apoiar os utilizadores na solução de problemas durante o uso de impressoras ME.</p>
<p>Pérez et al. [93]</p>	<p>Este artigo avalia o efeito da variação dos parâmetros de impressão na rugosidade de superfície em processos de <i>material jetting</i> com PLA. Esta investigação revelou que a rugosidade da peça varia com a parâmetros como a altura da camada, o caminho de impressão, a velocidade, a temperatura e a espessura da parede. O estudo conclui que os parâmetros críticos são a altura da camada e a espessura da parede, e através de uma altura de camada menor e espessura de parede adequada ao tamanho do bico extrusor, consegue-se produzir uma superfície de melhor qualidade.</p>
<p>Elambasseril et al. [94]</p>	<p>Este trabalho pretende realizar um estudo sistemático com objetivo de reduzir/eliminar o rasgo a quente na fabricação da liga de alumínio (AL2139) através do processo PBF. Para este efeito, foi necessário variar uma seleção de parâmetros como velocidade do laser, espaçamento de passagem do laser e densidade de energia depositada, de modo a obter uma maior refinação do grão. Conclui-se que, o aumento da densidade da energia depositada pode reduzir, e eventualmente, eliminar o rasgo, o refinamento de grãos pela adição de AlTiB também reduz o rasgo, e o processo PBF comparado com a fundição permite obter uma melhor ductilidade embora apresente limites elásticos inferiores.</p>

Tabela 5 - Estudos realizados em AM (continuação)

Bhatt et al. [95]	Este estudo analisa uma extensão do processo de fabrico através de <i>sheet lamination</i> , integrou-se robôs no processo de laminação de folhas, permitindo assim o uso de diferentes materiais por camada e a montagem de componentes pré-fabricados. Desenvolveu-se uma base algorítmica para gerar automaticamente as instruções para os robôs. Foram analisadas as restrições de velocidade, precisão e restrições de singularidade do movimento. O sistema automatizado apresenta vantagens significativas, como alta velocidade, baixo custo, capacidade de trabalhar com múltiplos materiais e a possibilidade de fabricar peças grandes de forma eficiente. Apesar de o processo exigir a intervenção do operador humano na seleção da orientação das peças e dos materiais, prevê-se que, no futuro, estas decisões sejam feitas automaticamente a partir da análise do modelo CAD.
Piedra-Cascón et al. [96]	Este artigo tem como principal objetivo rever os elementos do fluxo de trabalho do <i>Vat-Polymerization</i> , tal como, parâmetros de impressão, estruturas de suporte, <i>slicing</i> e pós-processamento. A seleção dos parâmetros ideais teve como base aplicações dentárias com foco na rugosidade superficial, precisão de impressão e propriedades mecânicas. Concluiu-se que os parâmetros de impressão, estruturas de suporte, <i>slicing</i> , e pós processamento são cruciais para obter as melhores características possíveis.

2.3. Ligações adesivas em componentes de fabrico aditivo

Como já mencionado em capítulos anteriores, o fabrico aditivo tornou-se um processo sólido nas diferentes indústrias. Porém, o facto de este apresentar uma restrição nas dimensões máximas de componentes levou as indústrias a procurarem métodos/meios de contornar este problema através de diferentes métodos de ligação.

2.3.1. Ligações correntes em FA

A união de aderentes fabricados através de fabrico aditivo apenas pode ser soldada quando os componentes forem constituídos por ligas metálicas ou termoplásticos. Tal como acontece na união de ligas metálicas conformadas nos métodos mais convencionais, estas juntas também apresentam tensões residuais que podem ser prejudiciais [97]. As ligações mecânicas são uma solução muito utilizada para unir elementos de fabrico aditivo através de elementos roscados, como se pode visualizar na Figura 19. Estas roscas podem ser obtidas tanto durante a impressão, através de furação e da aplicação de uma rosca, e/ou através da inserção de porcas-rosca. Existem algumas limitações associadas à impressão de rosca em conjunto com o componente que se tornam um entrave neste processo, nomeadamente o passo da rosca, que quanto mais fino for o passo, mais difícil será a sua impressão e menor será a sua resistência.

Quando a rosca é aplicada após o seu fabrico, o processo consiste no furo do componente e utilização de um macho para formar a rosca. Contudo, este método necessita de mais tempo e mais componentes, o que o pode torna mais dispendioso. Na implementação de porcas-rosca (maioritariamente usado em plásticos e/ou materiais facilmente deformados), são inseridas as porcas através de calor ou pressão, em componentes onde já exista o furo [98].



Figura 19 - Exemplos de ligações roscadas em elementos impressos [99]

As ligações por entalhe ou ligações por encaixe, consistem na produção de elementos com uma geometria que permita que estes se acoplem a outros apenas através de encaixe, como se pode ver na Figura 20. Porém, estas ligações estão limitadas a elementos maciços, a elementos que não possuam limites finos e podem apresentar deformações de forma significativas provenientes da deformação local criada no encaixe [100].

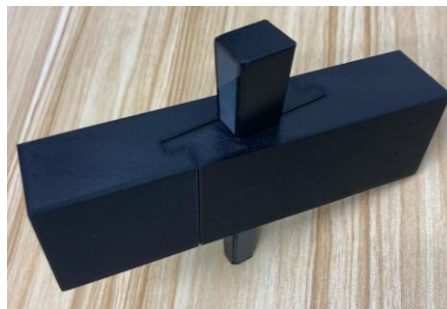


Figura 20 - Exemplo de ligação por entalhe [101]

As ligações adesivas, como se pode ver na Figura 21, destacam-se pela capacidade de unir diferentes materiais, por ser um processo de união que não cria deformações nas uniões e por apresentar uma distribuição de tensões mais uniformes quando comparado a outros processos de união. Este processo também pode ser usado para complementar processos já referenciados anteriormente, em reforço de ligações por entalhe ou fixação das porcas de inserção em peças.

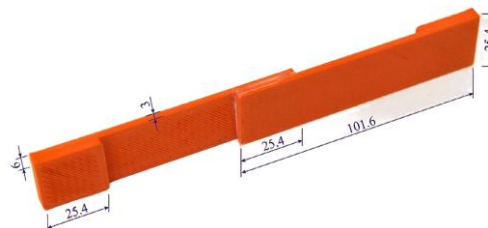


Figura 21 - *SLJ* com aderentes em *FA* (Adaptado de [102])

2.3.2. Ligações adesivas em FA

Com o objetivo de eliminar um dos maiores problemas de FA (dimensões máximas bastante reduzidas), utilizaram-se ligações adesivas para criar a oportunidade de fabricar estruturas maiores e com um custo menor e um menor número de pontos críticos de concentrações de tensões, pelo que as torna favoritas quando comparados com os restantes métodos convencionais [103, 104]. No entanto, é fundamental investigar a integridade das estruturas, os possíveis pontos de rotura e as propriedades mecânicas dessas ligações adesivas, de modo a garantir que o seu uso seja seguro e eficiente [105]. A tecnologia mais usada quando o objetivo é combinar aderentes provenientes de FA e adesivos é o processo FDM. Porém, as juntas de FA unidas por adesivos apresentam todo um leque de parâmetros que devem ser considerados, desde as propriedades mecânicas dos aderentes e adesivos, aos parâmetros de impressão dos aderentes, a espessura do adesivo, possível preparação superficial e fabrico das juntas, pois estas irão influenciar tanto os componentes na sua individualidade como a junta num todo [105]. Com isto, conclui-se que existe uma infinidade de combinações de parâmetros para fabricar juntas de adesivas que serão analisadas experimentalmente e numericamente de modo a compreender a influência de todos os parâmetros no desempenho da junta.

2.3.3. Tecnologia e vantagens associadas

As ligações adesivas têm ganho destaque pela união de componentes fabricados aditivamente, graças à sua versatilidade e capacidade de unir materiais dissimilares. Estas tecnologias permitem a montagem de estruturas maiores, reparação de peças e até a melhoria funcional (flexibilidade, durabilidade e eficiência) de componentes fabricados por métodos de fabrico aditivo, como FDM e *Selective Laser Melting* (SLM) [15].

Entre os adesivos mais utilizados destacam-se os adesivos estruturais de base epóxi, amplamente conhecidos pela sua elevada resistência mecânica e durabilidade. Estes adesivos são particularmente adequados para aplicações estruturais em peças metálicas ou poliméricas fabricadas por FA, pois ainda oferecem resistência térmica, o que os torna ideais para aplicações em condições extremas [106]. Outra categoria de adesivos amplamente aplicada inclui os adesivos acrílicos e ciano acrilatos, que se caracterizam pela cura rápida e facilidade de aplicação, sendo particularmente úteis em prototipagem e em componentes não estruturais de polímeros produzidos por tecnologias de FA, como o FDM [107].

Os adesivos híbridos caracterizam-se por possuir propriedades mecânicas dos adesivos estruturais com tempos de cura mais curtos, estes são uma solução especialmente atrativa na união de materiais heterogêneos, como metal e polímero, o que proporciona uma versatilidade adicional nas aplicações de FA [108]. Além disso, tecnologias emergentes, como as soluções de adesão assistida por laser ou ultrassom, têm sido exploradas para melhorar a adesão em superfícies de fabrico aditivo. Estas abordagens aumentam a energia superficial das peças, o que promove uma melhor interação entre o adesivo e o aderente, enquanto se reduz a necessidade de tratamentos químicos convencionais [107]. As vantagens destas tecnologias de ligação adesiva são numerosas, pelo que se destaca a flexibilidade na união de materiais heterogêneos, um desafio comum no fabrico aditivo, onde diferentes aderentes, como

polímeros e metais, são frequentemente combinados [108]. Além disso, a distribuição uniforme de tensões proporcionada pelas ligações adesivas é essencial para peças de FA, que podem apresentar zonas de menor resistência devido à anisotropia do processo de fabricação camada a camada [106]. Outra vantagem significativa é a possibilidade de reparação e montagem modular, o que facilita a união de módulos menores em estruturas maiores ou a substituição de componentes individuais [107]. Por fim, as ligações adesivas demonstram compatibilidade com superfícies complexas e texturizadas, comuns em peças fabricadas aditivamente, enquanto tecnologias avançadas, como pré-tratamento com plasma ou jatos de partículas, permitem melhorar as propriedades funcionais e a durabilidade da adesão [108]. No entanto, desafios como preparação de superfície, compatibilidade adesivo-aderente e envelhecimento devem ser considerados e abordados adequadamente para garantir o sucesso da aplicação [15].

2.3.4. Fabrico e automação

A integração de juntas adesivas em componentes de fabrico aditivo destaca-se como solução inovadora quando o contexto é o fabrico e automação, particularmente pela sua capacidade de unir materiais distintos e promover estruturas leves e complexas. Contudo, é importante salientar que o fabrico de juntas adesivas em componentes fabricados em FA apresenta um conjunto de variáveis que podem considerar o seu desempenho, nomeadamente a preparação da superfície, a seleção do adesivo e os testes mecânicos necessários para a validação da ligação. Este cenário torna a automação da ligação adesiva um processo crítico, uma vez que é essencial garantir que a aplicação do adesivo seja realizada de forma precisa e eficiente, de para assegurar a uniformidade nas juntas. Para que tal aconteça, recorre-se a robôs industriais que apresentam uma maior precisão em superfícies complexas. Em alguns casos de estudo, são implementados braços robóticos com extrusoras, como representado na Figura 22, pois estes conseguem obter um controlo mais preciso dos parâmetros de impressão, o que melhora o desempenho do processo e permite criar padrões geométricos mais complexos [109].

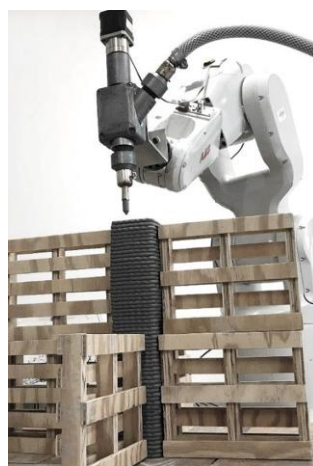


Figura 22 - Implementação da robotização na impressão 3D [109]

Além disso, a automação permite o aumento das velocidades de produção através da implementação de sistemas automatizados de cura de modo a acelerar a solidificação do adesivo. Outro ponto positivo na automação é a implementação de inspeções automatizadas

através da utilização da visão computacional, pois esta permite avaliar a uniformidade das juntas adesivas e detetar potenciais roturas. Outro processo de automatização impactante no fabrico de ligações adesivas é obtida através da implementação de robôs que aplicam o adesivo com auxílio de pistolas pneumáticas, o que apresenta uma maior precisão comparado a outros processos [110]. A utilização de robôs permite que as ligações mantenham a consistência mesmo quando estas provêm de tarefas repetitivas [110]. Estas práticas não só garantem a qualidade final das juntas, como contribuem para a redução de custos na produção [111, 112].

2.3.5. Compatibilidade de aderentes/adesivos

O desempenho e compatibilidade de uma junta adesiva (capacidade de um adesivo formar uma união eficaz com um material específico) depende de um conjunto de fatores que influenciam a interação entre o adesivo e o aderente, mais concretamente as propriedades do adesivo, as propriedades do aderente, as condições de operação e os métodos de preparação da superfície [5, 65]. A viscosidade do adesivo desempenha um papel crucial nas juntas adesivas, pelo que uns adesivos com viscosidade alta podem apresentar dificuldades na penetração adequada nas superfícies a serem unidas. Esta limitação pode levar a uma menor resistência mecânica da junta adesiva [113]. A força de adesão também é um fator a considerar, assim como a elasticidade do adesivo, o regime de operação a que este se encontra e a durabilidade do mesmo, de modo a garantir que este não se degrade com o tempo. Na análise dos aderentes, é importante perceber se a energia superficial é alta o suficiente para facilitar a adesão, e se estes apresentam baixa porosidade, pois quanto mais porosos mais difícil é a sua adesão. A composição química também é um fator importante, pois existem alguns materiais que apresentam baixas afinidades aos adesivos, o que impacta negativamente o processo de união. Outro fator importante que afeta o desempenho da junta é a aplicação de um tratamento superficial no aderente que possibilite uma melhor adesão [114].

Os materiais mais comuns no fabrico aditivo incluem PLA, ABS, PETG, Nylon e TPU. O PLA um termoplástico biodegradável amplamente utilizado devido à sua facilidade de impressão, rigidez e origem sustentável. O ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) é reconhecido pela sua elevada resistência e capacidade de suportar temperaturas mais elevadas, pelo que é ideal para aplicações mais exigentes. O PETG (Polietileno Tereftalato Glicol) é um material que combina a facilidade de uso do PLA com a robustez do ABS, que se caracteriza por possuir uma boa resistência química. O Nylon (Poliamida) destaca-se pela sua elevada resistência mecânica, flexibilidade e durabilidade, sendo particularmente indicado para peças funcionais. O TPU (Poliuretano Termoplástico) é um material flexível e elástico, frequentemente utilizado em componentes que requerem resistência ao impacto e deformações contínuas [114].

O adesivo epóxico é um adesivo amplamente utilizado devido à sua elevada resistência mecânica e capacidade de preencher lacunas, o que o torna especialmente eficaz quando combinado com PLA, ABS e Nylon. O ciano acrilato, mais conhecido como supercola, é adequado para uniões rápidas e eficazes, sendo particularmente útil com PLA e ABS. Contudo, a rigidez resultante após a cura limita o seu uso em materiais flexíveis como o TPU. Os adesivos de poliuretano destacam-se pela sua flexibilidade após a cura, o que os torna ideais para

materiais como PETG e TPU, casos onde é necessária alguma elasticidade na junta adesiva. Os adesivos de silicone, devido à sua elevada flexibilidade e resistência a variações térmicas, são frequentemente recomendados para materiais flexíveis como o TPU [65].

2.3.6. Estado-da-arte

Neste capítulo, são apresentados estudos experimentais (Tabela 6) e numéricos (Tabela 7), focados na análise do desempenho das ligações adesivas em componentes impressos em 3D. Primeiro são descritos os ensaios experimentais (2.3.6), seguidas das análises através da modelação numérica (2.3.6.2).

2.3.6.1. Ensaios experimentais

Na Tabela 6 encontram-se representados estudos experimentais relevantes para a análise do comportamento de juntas adesivas com aderentes fabricados por FDM.

Tabela 6 - Ensaios experimentais realizados em juntas adesivas de FA

Referência Bibliográfica	Descrição do trabalho
Khosravani et al. [102]	Este artigo incide na investigação de como os parâmetros de impressão e a espessura dos adesivos afetam o desempenho das juntas adesivas em componentes poliméricos fabricados por FDM, tendo como base ensaios experimentais e simulações numéricas para avaliação do comportamento das juntas. Nesta pesquisa identificou-se que a rotura experimental coesiva é o modo predominante de rotura. Verificou-se que a espessura ótima de adesivo é de 0,2 mm, enquanto a largura de varrimento recomendada é de 0,75 mm. A análise pelo método de elementos finitos (MEF) corroborou os resultados experimentais e forneceu informações para otimizar o design das juntas adesivas.
Khosravani et al. [115]	Este artigo investiga o impacto da configuração da área de sobreposição em juntas adesivas em degrau fabricadas através de aderentes impressos em 3D. É considerado o impacto que diferentes designs, geometrias e áreas de sobreposição causam quando aplicados em aderentes de PLA fabricado por FDM. Os resultados mostram que a introdução de degraus equivalentes na área de sobreposição melhora a capacidade de carga e aumenta a carga de fratura quando comparado com as restantes geometrias analisadas (geometria com degrau central mais comprido e geometria com degrau central mais curto). Esta diferença deve-se à repartição da carga pelas diferentes secções de ligação o que permite aumentar a resistência global da junta. Foi desenvolvido um modelo de elementos finitos (MFE) para simular o desempenho das juntas, que confirmou os resultados experimentais.

Tabela 6 - Ensaio experimentais realizados em juntas adesivas de FA (continuação)

Öztürk et al. [116]	Este artigo investiga a forma como a carga de rotura e o comportamento de juntas de sobreposição simples de policarbonato produzidas por FDM variam com a alteração dos ângulos de impressão (0°, 45° e 90°), o comprimento de sobreposição (12,5 e 25 mm) e a espessura dos aderentes. A influência destes parâmetros de impressão 3D no comportamento mecânico das juntas de policarbonato é investigada por meio de ensaios de tração. Os resultados mostraram que a rigidez da junta aumenta com o uso de ângulos de impressão e aumento da espessura dos aderentes, o que mostra que a distribuição de tensões no adesivo é influenciada pelos parâmetros geométricos.
----------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.3.6.2. Modelação numérica

A modelação numérica surge da necessidade de tornar as análises das ligações mais expeditas, assim como dos custos associados a aquisição de certos adesivos, materiais aderentes e até mesmo equipamentos para realizar as análises. Como tal, as simulações numéricas tornaram-se uma alternativa para estes estudos, como se verifica através dos estudos da Tabela 7.

Tabela 7 - Artigos sobre modelação numérica realizados em juntas adesivas de FA

Referência Bibliográfica	Descrição do trabalho
Khosravani et al. [117]	Este artigo analisa o comportamento de fratura de juntas adesivas fabricadas por FA em FDM. Para a impressão dos aderentes é utilizado PETG com diferentes parâmetros de impressão e espessuras de adesivo, para determinar o seu efeito na integridade estrutural das juntas. Foi realizado um estudo numérico no <i>software</i> Abaqus® no qual se desenvolveu um modelo de elementos finitos que foi comparado com os resultados experimentais. Os resultados mostraram que a espessura de 0,2 mm apresenta o melhor desempenho.
Öztürk et al. [116]	Este estudo é um complemento do artigo apresentado na Tabela 7, que analisa numericamente as juntas de sobreposição simples. A análise numérica foi realizada com o auxílio do <i>software</i> Abaqus® e MEF. Onde se apresenta uma nova abordagem ao integrar o modelo de zona coesiva em aderentes com o critério de escoamento de Hill. A carga experimental de rotura foi de 1586 N para uma junta de 12,5 mm a 90° e de 4115 N para uma junta de 25,4 mm a 0°. A comparação das cargas de rotura experimentais e de MEF das juntas mostrou diferenças máximas e mínimas de 11,98% e 1,34%, respetivamente.

Tabela 7 - Artigos sobre modelação numérica realizados em juntas adesivas de FA (continuação)

Khosravani et al. [102]	Este estudo é um complemento do artigo apresentado na Tabela 7, no qual se realiza uma análise numérica desenvolvida através de um modelo 3D de elementos finitos com o objetivo de verificar os resultados experimentais obtidos e estudar a distribuição de tensões e comportamento da junta à rotura coesiva. Através da análise numérica, os autores verificaram que as tensões máximas ocorrem com espessuras de adesivo superiores e concluíram que 0,2 mm era a condição que resistia a mais carregamento, em simultâneo foi validado o modelo numérico através da concordância com os resultados experimentais.
------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

3. Desenvolvimento

No subcapítulo 3.1, são abordadas todas as etapas necessárias para a boa realização do trabalho experimental e demonstrados os resultados obtidos através dos modos de rotura, das curvas $P-\delta$, da $K_{máx}$ e energia de rotura. Posteriormente é abordada, no subcapítulo 3.2, a preparação dos modelos numéricos, a formulação de modelo coesivos triangular, a determinação dos parâmetros coesivos e, por fim, a comparação entre resultados numéricos e experimentais.

3.1. Trabalho experimental

3.1.1. Determinação das propriedades dos aderentes

A seleção e combinação dos parâmetros utilizados na impressão dos aderentes apresenta um papel fundamental na qualidade das propriedades obtidas em componentes impressos por FDM. Deste modo, foi necessário definir os parâmetros de impressão para posteriormente realizar ensaios nos materiais impressos com a finalidade de comprovar as propriedades obtidas. Para estes testes foram impressos quatro provetes *bulk* de cada material selecionado, segundo a norma de fabrico e ensaio ASTM D638 [118] para materiais plásticos rígidos e semirrígidos do Tipo I. As dimensões dos provetes encontram-se representadas na Figura 23.

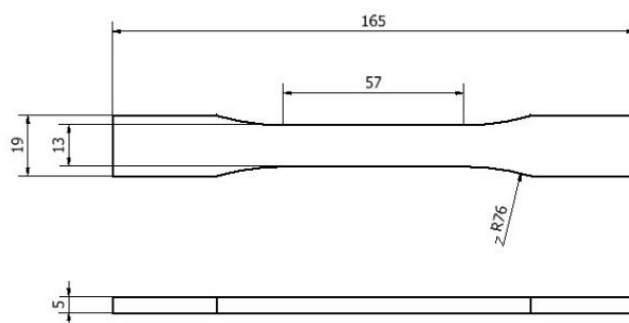


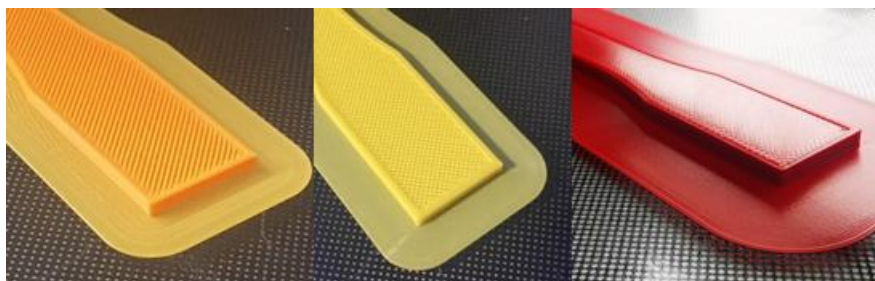
Figura 23 - Dimensões do provete típico para materiais plásticos rígidos e semirrígidos do Tipo I

Para a escolha dos materiais de impressão foram considerados os materiais mais conhecidos e mais utilizados comercialmente em impressões por FDM, designadamente o PLA, o PETG e o ABS. As propriedades dos materiais podem ser consultadas no Anexo A. As escolhas dos parâmetros de impressão utilizados encontram-se descritos na Tabela 8. Por sua vez, a impressão dos provetes de ABS foi realizada por uma entidade externa, pelo que pode haver ligeiras oscilações em alguns parâmetros devido ao facto de o material ABS ter sido impresso numa impressora diferente das restantes.

Tabela 8 - Propriedades de impressão para os diferentes aderentes

Materiais/Características	PLA	PETG	ABS
Altura da camada	0,2 mm		
Densidade de Enchimento	50 %		
Espessura da linha	0,4 mm		
Espessura da parede exterior	1,2 mm		
Espessura das camadas de base/topo	0,8 mm		
Espessura do extrusor	0,4 mm		
Mesa de adesão	Vidro Carborundum		
Modelo da impressora	Ender 3 Max	Ender 6	
Padrão de enchimento	Retilíneo		
Temperatura da mesa de adesão	60°C	80°C	70°C
Temperatura de extrusor	215°C	230°C	230°C
Velocidade de impressão	75 mm/s	75 mm/s	120 mm/s

Após finalizada a seleção dos materiais de impressão, deu-se início ao fabrico dos provetes *bulk* através da elaboração do modelo CAD com auxílio do *software* Solidworks®, que deu origem ao ficheiro STL utilizado no *slicer* Ultimaker Cura®. No *slicer* foram implementadas as condições de impressão como se encontram representadas na Tabela 8, pelo que foi possível retirar o tempo e material necessário em cada impressão. Após este procedimento, o modelo foi transferido para a impressora e foi dado início à impressão dos provetes *bulk*, que após a sua conclusão apresentaram o seguinte formato representado na Figura 24.

Figura 24 - Impressão de provetes *bulk*: a) PLA laranja; b) PETG amarelo e c) ABS vermelho

Foram realizados ensaios à tração aos provetes impressos com o auxílio da máquina de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 (Figura 25) do Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP. Esta máquina é operada com auxílio do *software* TRAPEZIUM X para registo e controlo de dados. A máquina possui uma célula de carga com capacidade de 100 kN, responsável por medir a força exercida durante os testes de tração. Para os ensaios, os provetes foram fixados com auxílio a amarras de cunha, de forma a evitar qualquer deslizamento durante os ensaios. A medição das deformações longitudinais foi realizada através de um extensómetro mecânico de contacto, com um comprimento-base de 50 mm, cuidadosamente colocado na zona útil dos provetes. Antes de cada ensaio, procedeu-se à calibração do equipamento, ao estabelecer o deslocamento inicial como zero e garantir uma distância de 115 mm entre as amarras. A velocidade de ensaio foi mantida constante a 5 mm/min. Com base no conhecimento prévio do comportamento dos materiais, o extensómetro foi removido após 0,5 mm de extensão. Os

dados recolhidos com o extensómetro permitiram a determinação do E , enquanto os dados obtidos após a sua remoção possibilitaram o cálculo das propriedades de resistência, nomeadamente a tensão de rotura. Os provetes foram solicitados até à rotura, que ocorreu sempre na zona útil dos mesmos. Após a realização de todos os ensaios recorreu-se a uma folha de cálculo preparada para analisar e retirar o valor de E , a tensão limite elástico, a tensão de rotura e o alongamento máximo de todos os ensaios.



Figura 25 - Shimadzu Autograph AG-X 100 [119]

As propriedades mecânicas obtidas por meio do ensaio de tração foram determinadas com base na norma EN ISO 527-1 [120]. O valor de E foi calculado através da equação (1), onde $\Delta\sigma$ [MPa] representa a variação da tensão e $\Delta\varepsilon$ a variação da deformação, ambas medidas para um ε entre 0,05% e 0,25%.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

Para este cálculo, foram extraídos dos gráficos gerados durante o ensaio os valores de tensão correspondentes às deformações de 0,05% e 0,25%, que correspondem à região linear da curva tensão-deformação. Já o limite de elástico a 0,2% (designado por $R_{p0,2}$) foi determinado traçando-se uma linha paralela ao trecho inicial da curva (região elástica), intercetando-a no ponto correspondente a uma deformação de 0,2%. A interseção entre esta linha e a curva experimental define a $R_{p0,2}$. A tensão máxima nominal ($\sigma_{m\acute{a}x}$) foi obtida através da equação (2), onde $P_{m\acute{a}x}$ [N] representa a força máxima suportada pela amostra e A [mm²] corresponde à sua área inicial transversal.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad (2)$$

A equação (3) apresenta a tensão real (σ_{real}) e tem por base a relação entre a força aplicada (F) e a secção transversal instantânea (A_{inst}) do aderente. Esta pode também ser expressa em função da $\sigma_{m\acute{a}x}$ e da área inicial da secção (A_0), ajustada pela deformação lateral:

$$\sigma_{real} = \frac{F}{A_{inst}} = \sigma_{m\acute{a}x} \times \frac{A_0}{A_{inst}} \quad (3)$$

Desenvolvimento

A variação da geometria do aderente com a deformação lateral (ε_{lat}) é considerada na determinação do comprimento (t) e largura (b) da secção deformada, usando as equações (4):

$$b = b_0 \times (1 + \varepsilon_{lat}); t = t_0 \times (1 + \varepsilon_{lat}), \quad (4)$$

A ε_{lat} é obtida através do produto de ε e ν ou, em função da tensão nominal (σ) e de E :

$$\varepsilon_{lat} = \varepsilon \times \nu = \frac{\sigma}{E} \nu \quad (5)$$

Com base nas equações anteriores, é possível obter uma expressão geral para a σ_{real} que considera a redução da área da secção transversal provocada pela deformação lateral, conforme apresentado na equação (6):

$$\sigma_{real} = \sigma_{máx} \times \frac{A_0}{A_0 \times (1 + \varepsilon_{lat})^2} = \frac{\sigma_{máx}}{\left(1 - \frac{\sigma}{E} \nu\right)^2} \quad (6)$$

Além disso, foi registado o valor da deformação máxima ($\varepsilon_{máx}$), correspondente à deformação máxima atingida pelo provete na rotura. A tensão real a 0,2% ($\sigma_{R0,2}$) foi calculada com auxílio da equação (7), obtida a partir da dedução direta da equação (6). Os ν utilizados no decorrer deste trabalho foram retirados do trabalho de Ribeiro et al. [121]. Estas propriedades encontram-se representadas na Tabela 9.

$$\sigma_{R0,2} = \frac{\sigma_{0,2}}{\left(1 - \frac{\nu \times \sigma_{0,2}}{E}\right)^2} \quad (7)$$

Tabela 9 - Propriedades mecânicas para os diferentes aderentes (adaptado de [121, 122])

Mat		$P_{máx}$ [N]	$\varepsilon_{máx}$ [mm]	$Rp_{0,2}$ [MPa]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\sigma_{R0,2}$ [MPa]	$\varepsilon_{máx}$ [%]	$\sigma_{0,05\%}$	$\sigma_{0,25\%}$	E [MPa]	ν [123]
PLA	Média	1418,79	2,48	32,07	35,5	32,29	2,06	1,23	5,94	2353,74	0,36
	Desvio Padrão	16,40	0,11	2,53	0,6	2,58	0,09	0,19	0,14	39,03	
	CoV [%]	1,16	4,59	7,90	1,93	7,98	4,29	15,45	2,32	1,66	
PETG	Média	1016,98	3,98	17,15	25,28	17,32	3,77	0,58	3,31	1362,01	0,4
	Desvio Padrão	19,06	0,96	0,17	0,6	0,17	0,98	0,05	0,24	2101,05	
	CoV [%]	1,92	24,08	1,01	2,37	0,99	26,02	9,00	7,21	7,42	
ABS	Média	917,43	5,28	20,11	22,30	20,30	5,27	0,94	4,06	1559,02	0,37
	Desvio Padrão	17,11	0,15	0,97	0,69	1,00	0,61	0,11	0,15	128,73	
	CoV [%]	1,87	2,89	4,84	3,09	4,95	11,53	11,38	3,74	8,26	

Com base na análise dos dados obtidos na Figura 26, observa-se que o PLA demonstrou um comportamento essencialmente elástico até ao ponto de rotura. Este tipo de resposta caracteriza-se por uma relação linear entre a força aplicada e o deslocamento até que ocorra a rotura. Entre os materiais avaliados, o PLA destacou-se pela tensão de rotura mais elevada, em simultâneo como as menores deformações no momento da rotura. Além disso, foi o material que evidenciou maior rigidez, conforme revelado pelos valores mais elevados de E .

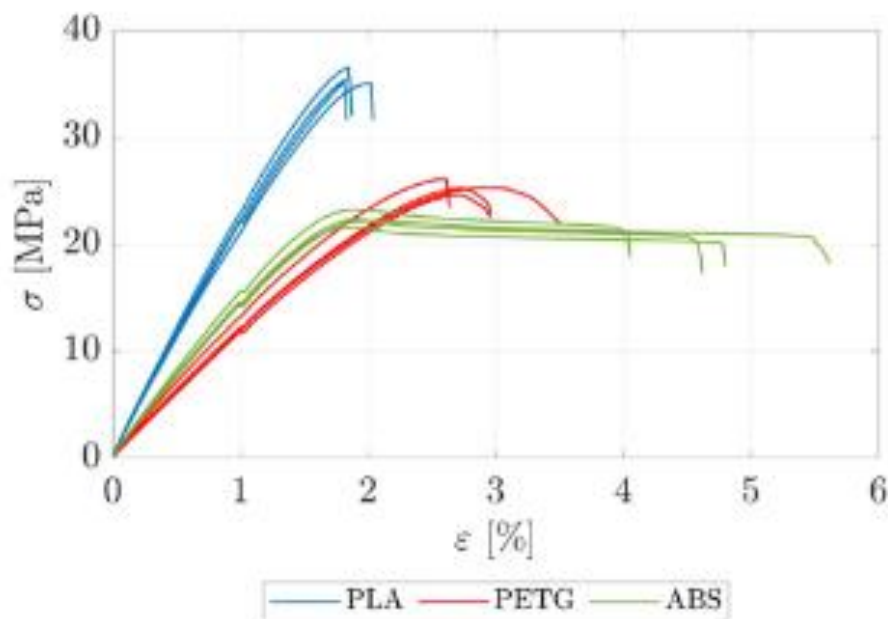


Figura 26 - Curvas σ - ϵ dos provetes *bulk* do material PLA, ABS e PETG [121]

Relativamente ao PETG, verificou-se que dois dos provetes exibiram uma resposta elástica seguida de rotura imediata ao atingir o pico de carga. Por outro lado, os restantes apresentaram deformação plástica antes da rotura. Embora este tenha sido o segundo material com maior resistência ao carregamento, o PETG revelou-se o menos rígido dos três analisados, com um E inferior. O ABS, por sua vez, foi o material com menor capacidade de suportar carga até à rotura. Em termos de rigidez, situou-se entre o PLA e o PETG, resultado de menores deformações para cargas semelhantes às observadas no PETG.

3.1.2. Geometria das juntas

Para a análise do comportamento das juntas compostas pelos adesivos e aderentes mencionados, foram consideradas 4 juntas de cada comprimento de sobreposição para cada um dos 3 tipos de juntas (Figura 27), nomeadamente as juntas *SLJ*, as juntas em *SCARF* e junta em *STEP*. Na Tabela 10 encontram-se representadas as dimensões e características de cada tipo de junta, onde L_T representa a distância entre as punções inferiores, L_{TI} a distância entre as punções superiores, L_O , t_A a espessura da camada adesiva, t_P a espessura dos aderentes, α o ângulo que o adesivo possui face ao aderente e b a largura da junta.

Desenvolvimento

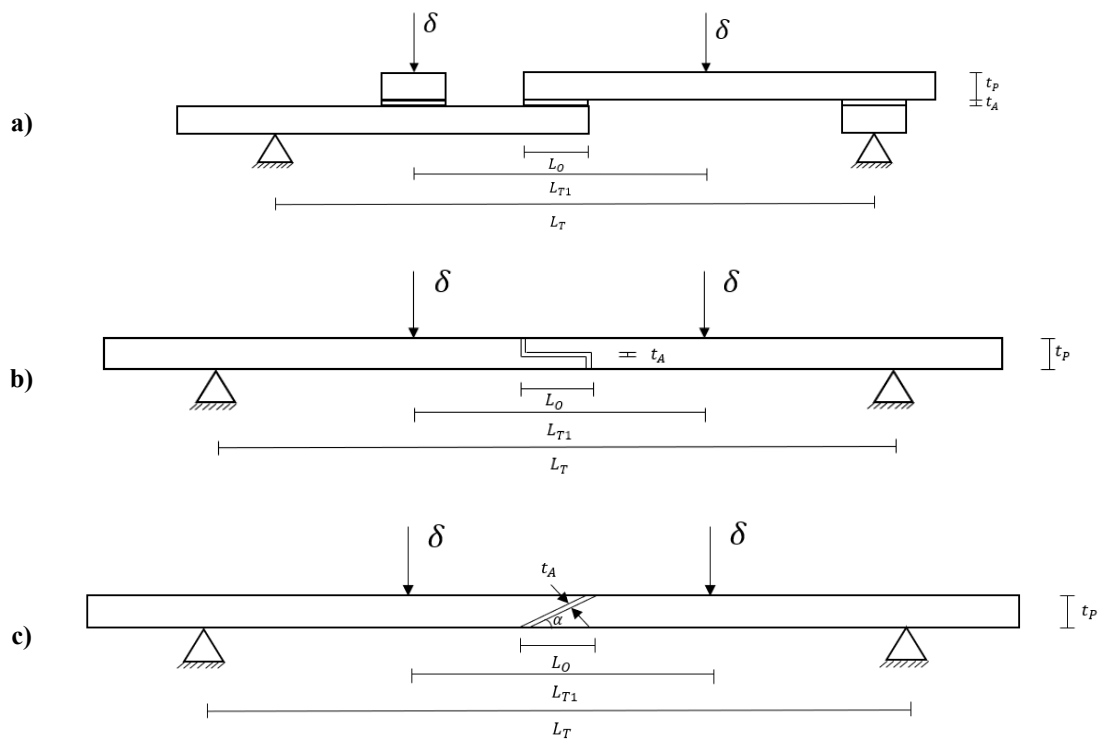


Figura 27 - Diferentes geometrias de junta: a) *SLJ*; b) *STEP*; c) *SCARF*

Tabela 10 - Parâmetros aplicados em diferentes tipos de juntas

	Geometria (Figura 28)	L_r [mm]	L_{r1} [mm]	L_0 [mm]	t_A [mm]	t_P [mm]	α [°] (Figura 28)	b [mm]
<i>SLJ</i>	a)	180	30	5	0,2	5	-	25,4
				10				
				20				
<i>STEP</i>	b)	180	30	5	0,2	5	-	25,4
				10				
				20				
<i>SCARF</i>	c)	180	30	5	0,2	5	90	25,4
				10			28,85	
				20			13,9	

Na Figura 28 encontram-se representadas as diferentes geometrias de juntas *SCARF* utilizadas para garantir L_0 de 5, 10 e 20 mm.

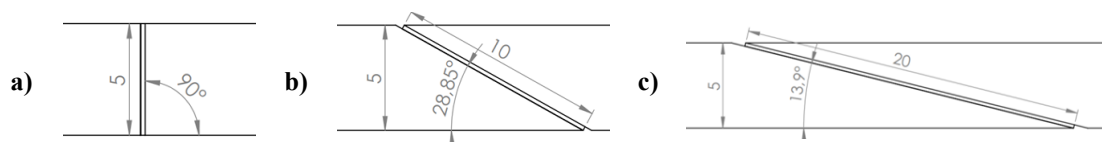


Figura 28 - Geometrias *SCARF* com os respectivos valores de L_0 : a) $L_0=5$ mm; b) $L_0=10$ mm; c) $L_0=20$ mm

3.1.3. Adesivos utilizados

Após a seleção dos materiais que constituem os materiais dos aderentes utilizados, foram os selecionados dois adesivos responsáveis pela adesão das juntas, o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752, dois adesivos estruturais com comportamentos diferentes.

O adesivo Araldite® 2015 da marca Huntsman (Figura 29) caracteriza-se por ser um adesivo epóxico de alta resistência com um comportamento dúctil [124]. A sua aplicação é feita através uma pistola com auxílio de um bico que permite uma mistura homogênea da resina com o endurecedor (ambos presentes na embalagem).



Figura 29 - Adesivo Araldite® 2015 e pistola de aplicação [125]

O adesivo Sikaforce® 7752 FRW L60 da marca Sika (Figura 30) caracteriza-se pela elevada ductilidade e flexibilidade. Porém, quando comparado com o adesivo Araldite® 2015, este apresenta algumas diferenças, nomeadamente no modo de aplicação, que passa a ser por espátula, e na sua mistura, realizada manualmente. O adesivo é adquirido em dois recipientes separados, sendo o recipiente A a resina e o B o endurecedor, componentes estes misturados com uma razão mássica de 5:1, respetivamente.



Figura 30 - Adesivo Sikaforce® 7752 FRW L60 da marca Sika®[126]

Na Tabela 11 é possível visualizar e comparar as propriedades de ambos os adesivos, obtidas em trabalhos anteriores [124, 127].

Tabela 11 - Propriedades dos adesivos [124, 127]

Propriedades/Material	Araldite® 2015	Sikaforce® 7752
Razão mássica resina/endurecedor	1/1	5/1
Tempo de cura	10 h a 23°C	48 h a temperatura ambiente
Módulo de Young, E [GPa]	1,85 ± 0,21	0,49 ± 0,09
Coefficiente de Poisson, ν	0,33	0,30
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	12,63 ± 0,61	3,24 ± 0,48
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	21,63 ± 1,61	11,48 ± 0,25
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	4,77 ± 0,15	19,18 ± 1,40
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	0,56 ± 0,21	0,19 ± 0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	14,60 ± 1,30	5,16 ± 1,14
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	17,90 ± 1,80	10,17 ± 0,61
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	43,90 ± 3,40	54,82 ± 6,38
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	0,43 ± 0,02	2,36 ± 0,17
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	4,70 ± 0,34	5,71 ± 0,47

3.1.4. Processo de fabrico

Para a realização dos ensaios à flexão das juntas adesivas, foi necessário fabricar um total de 216 juntas. Este número provém da combinação dos 3 aderentes × 2 adesivos × 3 geometrias de junta (*SLJ*, *STEP*, *SCARF*) × 3 comprimentos de sobreposição (5; 10; 20) × 4 juntas por cada condição. Para o fabrico das 216 juntas, foi necessário imprimir um total de 432 aderentes (2 aderentes por junta) com as mesmas condições de impressão definidas para os provetes *bulk* de cada material, mencionadas no capítulo 3.1.1, o que criou a necessidade de um plano de fabrico de modo a auxiliar e otimizar o tempo despendido na fabricação dos mesmos. Neste plano de fabrico ficou definido que, por sessão, apenas iria ser trabalhada a combinação de 1 material com 1 adesivo, o que permitiu fabricar 216 juntas em 6 sessões (36 juntas cada). Em cada sessão, foi realizada a preparação das faces do aderente (lixagem e limpeza), com auxílio dos materiais indicados na Tabela 12, para aumentar a rugosidade, eliminar sujidade e remover pequenas falhas que pudessem surgir durante a impressão dos aderentes.

Tabela 12 - Preparação das faces dos aderentes

Materiais/Processo	Lixagem	Limpeza
<i>PLA</i>	lixa de grau 80	Álcool isopropílico
<i>PETG</i>	lixa de grau 80	Acetona
<i>ABS</i>	lixa de grau 80	Álcool isopropílico

Posteriormente ao processo de lixagem e limpeza deu-se início à aplicação dos fios de cobre de 0,2 mm de diâmetro que controlam a espessura do adesivo ao longo da área de sobreposição e a aplicação do adesivo propriamente dito (Figura 31).



Figura 31 - Aplicação de adesivo Araldite® 2015

Como já referido anteriormente, o adesivo Araldite® 2015 não necessita de nenhum tipo de mistura manual antes da sua aplicação, enquanto o adesivo Sikaforce® 7752 necessita da mistura manual antes da aplicação nos provetes, como se pode ver na Figura 32.



Figura 32 - Preparação da mistura homogénea dos componentes

Em seguida, as juntas foram fixadas com o auxílio de molas de compressão (Figura 33). A fixação manteve-se durante todo o processo de cura de modo a garantir que os aderentes se mantinham alinhados e não ocorriam deslizamentos que podiam cancelar a validade dos resultados dos ensaios.



Figura 33 - Sessão de preparação de juntas PETG com Araldite® 2015

3.1.5. Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão realizados às juntas adesivas consistem em ensaios de flexão em quatro pontos, como se pode visualizar na seguinte Figura 34, com uma distância de 180 mm entre os pontos inferiores e 30 mm entre os pontos superiores, efetuados a uma velocidade de 1 mm/min. Estes ensaios foram realizados na mesma máquina utilizada para os provetes *bulk* dos adesivos e aderente, e foram realizados até a rotura das juntas. Deste modo, foi possível obter todos os dados necessários que, juntamente com o auxílio de folhas de cálculo Excel®, permitiram o cálculo da força máxima, rigidez máxima e energia de rotura.

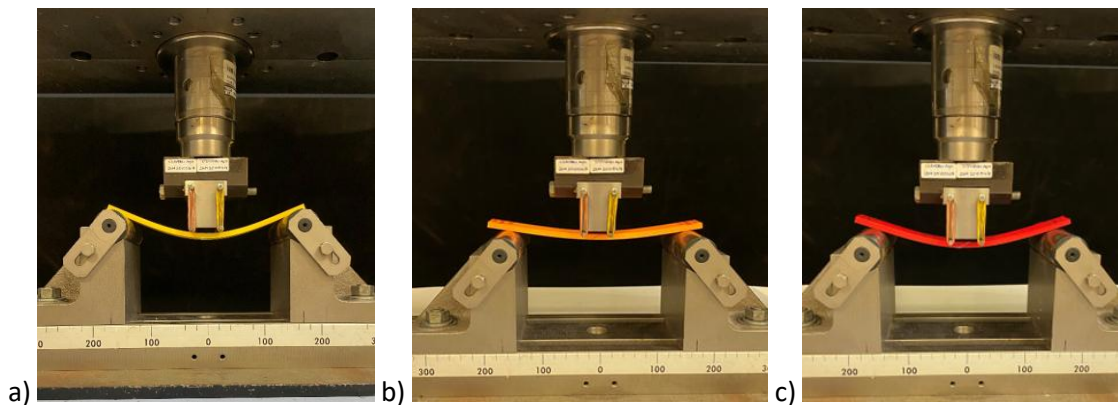


Figura 34 - Ensaio a flexão de juntas SCARF: a) PLA; b) PETG; c) ABS

3.1.6. Resultados

Neste capítulo pretende-se abordar os resultados obtidos nos ensaios experimentais à flexão realizados nas juntas adesivas com aderente impressos.

3.1.6.1. Modos de rotura

Os modos de rotura das juntas adesivas testadas são distintos em função do material aderente, tipo de adesivo, do L_0 e geometria do adesivo. Pela análise da Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 é possível constatar que a rotura predominante para $L_0=5\text{mm}$ é a rotura coesiva do adesivo, o que permitiu concluir que a resistência de ligação entre o aderente e o adesivo é superior à resistência do adesivo. Porém, L_0 para $L_0=10$ e 20 mm , o modo de rotura pelo aderente tornou-se mais frequente, o que significa que a resistência do aderente não foi suficiente para suportar a carga aplicada e a resistência interna do adesivo conseguiu superar as cargas aplicadas.

Nas juntas de PLA, observou-se que, de um modo geral, as roturas são mais recorrentes no adesivo, embora em juntas de geometria *STEP* ou com L_0 maiores ($L_0=20\text{mm}$) a rotura tenha lugar nos aderentes. Nas juntas compostas por PETG ou ABS, a rotura ocorre no aderente, com a exceção das juntas com $L_0=5\text{ mm}$ das geometrias *SCARF* e *SLJ*, casos em que se regista a rotura pelo adesivo, com ambos os adesivos.

Tabela 13 - Modos de rotura em juntas *SLJ*








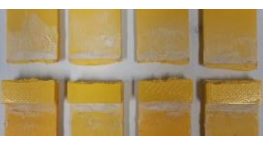










Mat.		<i>L₀</i>		
		5	10	20
PLAZ	Araldite® 2015	 4 Coesiva	 4 Coesiva	 3 Coesiva + 1 Aderente
	Sikaforce® 7752	 4 Coesiva	 4 Coesiva	 4 Coesiva
PETG	Araldite® 2015	 4 Coesiva	 4 Aderente	 4 Aderente
	Sikaforce® 7752	 4 Coesiva	 4 Coesiva	 4 Aderente
ABS	Araldite® 2015	 4 Coesiva	 4 Coesiva	 4 Aderente
ABS	Sikaforce® 7752	 4 Coesiva	 4 Aderente	 4 Aderente

Tabela 14 - Modos de rotura em juntas *SCARF*


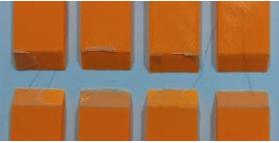

Mat.		<i>L₀</i>		
		5	10	20
PLA	Araldite® 2015	 4 Coesiva	 4 Coesiva	 4 Aderente

Tabela 14 - Modos de rotura em juntas SCARF (continuação)


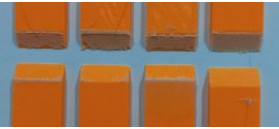






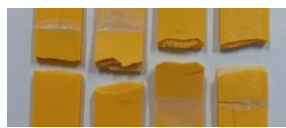

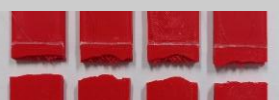



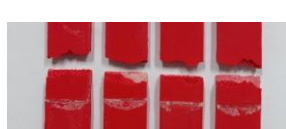
PLA	Sikaforce® 7752	 4 Coesiva	 4 Coesiva	 2 Coesiva+ 2 Aderente
	Araldite® 2015	 4 Coesiva	 4 Aderente	 4 Aderente
PETG	Sikaforce® 7752	 4 Coesiva	 4 Aderente	 4 Aderente
ABS	Araldite® 2015	 4 Coesiva	 4 Aderente	 4 Aderente
	Sikaforce® 7752	 4 Coesiva	 4 Aderente	 4 Aderente

Tabela 15 - Modos de rotura em juntas STEP








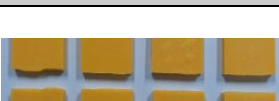

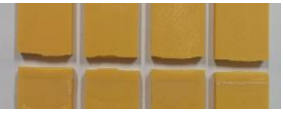


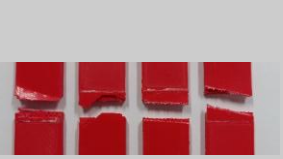



Mat.	PLA	L_0		
		5	10	20
PLA	Araldite® 2015	 3 Aderente + 1 Coesiva	 3 Aderente + 1 Coesiva	 3 Aderente + 1 Coesiva
	Sikaforce® 7752	 4 Coesiva	 4 Coesiva	 4 Coesiva
PETG	Araldite® 2015	 4 Aderente	 4 Aderente	 4 Aderente

Tabela 15 - Modos de rotura em juntas *STEP* (continuação)

PETG	Sikaforce® 7752			
		4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente
		ABS	Araldite® 2015	
4 Aderente	4 Aderente			4 Aderente
Sikaforce® 7752				
		4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente

3.1.6.2. Curvas $P-\delta$

Neste subcapítulo apresentam-se as curvas $P-\delta$ para os diferentes tipos de adesivos e aderentes, a partir das quais é possível estimar a força máxima, $P_{máx}$, o deslocamento associado, assim como a rigidez, definida como k [N/mm], e a energia de rotura [kN.mm]. No seguimento desta análise, são representadas as curvas $P-\delta$ para as diferentes geometrias, em função do material que constitui o aderente, do adesivo e do L_0 . Para facilitar a compreensão do estudo, o adesivo Araldite®2015 será designado por “2015” e o Sikaforce®7752 por “7752”. As cores das curvas nos gráficos representam diferentes valores de L_0 : azul para $L_0=5$ mm, amarelo para $L_0=10$ mm e vermelho para $L_0=20$ mm. Considera-se que as oscilações encontradas entre juntas que possuem o mesmo adesivo, o mesmo aderente e o mesmo L_0 são resultado de pequenos defeitos de fabrico dos aderentes e/ou das juntas, desvios na geometria das juntas, pequenos desalinhamentos no ensaio e falta de homogeneidade nos materiais.

Na Figura 35, os gráficos a) e b) apresentam as curvas $P-\delta$ para juntas com geometria *SLJ*, de aderente PLA com adesivo 2015 e 7752, respetivamente, em diferentes L_0 . Verifica-se que, nas juntas de adesivo 2015, o aumento do L_0 se traduz num aumento de $P_{máx}$ tal como nas juntas com o adesivo 7752. A principal diferença entre ambos os adesivos verifica-se nos deslocamentos à rotura: nas juntas com o adesivo 2015 ocorre uma rotura coesiva no adesivo, o que justifica o aumento do deslocamento à rotura com o aumento do L_0 . No caso das juntas com o adesivo 7752, este comportamento não se verifica para $L_0=20$ mm, na medida em que a resistência do aderente é atingida antes da rotura coesiva do adesivo.

A Figura 36 apresenta as curvas $P-\delta$ para juntas com geometria *SLJ*, com aderente em PETG e adesivos 2015 e 7752, respetivamente, para diferentes valores de L_0 . Verifica-se que, nas juntas com o adesivo 2015, o aumento de L_0 se traduz tipicamente num aumento de $P_{máx}$, tal como nas juntas com o adesivo 7752. No entanto, há exceções: as juntas com $L_0=10$ e 20 mm, com o adesivo 2015, e as juntas com $L_0=20$ mm com o adesivo 7752, sofreram rotura no aderente.

Desenvolvimento

Nestes casos, não se observou uma variação significativa no deslocamento à rotura em relação ao L_0 anterior.

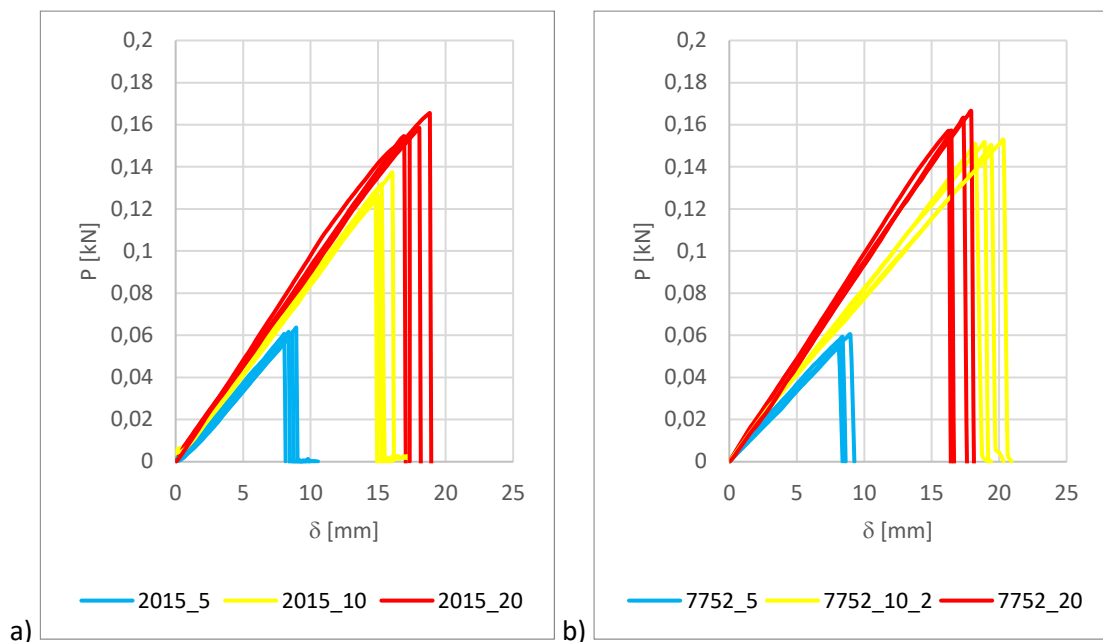


Figura 35 - Curvas P - δ das juntas SLJ com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752

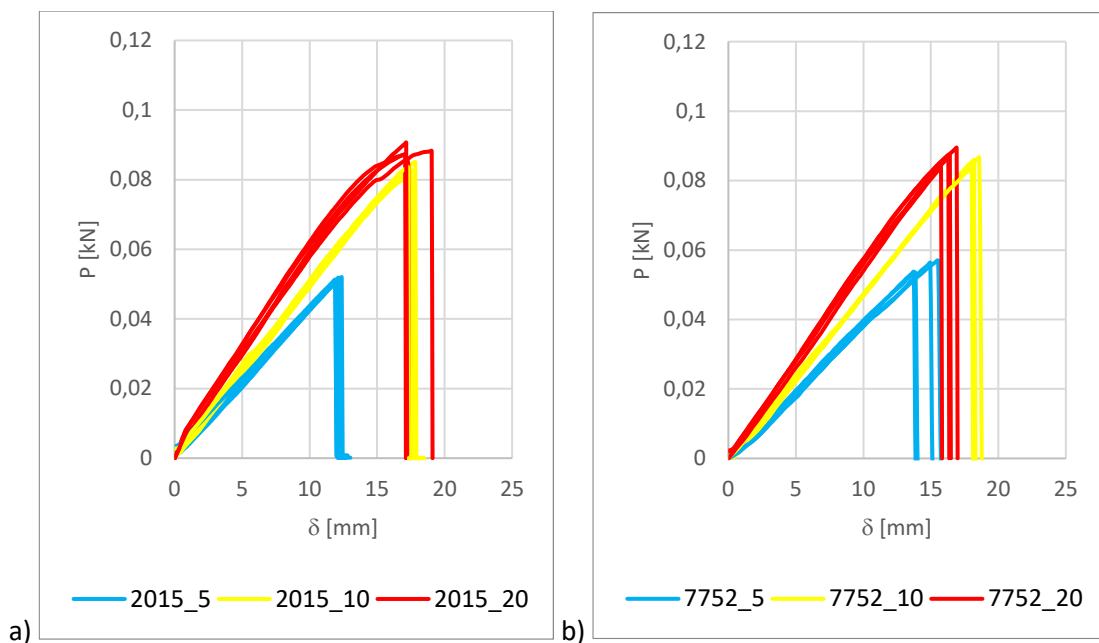


Figura 36 - Curvas P - δ das juntas SLJ com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752

Na Figura 37 a) e b) apresentam-se as curvas P - δ para juntas com geometria SLJ , com aderente em ABS e adesivos Araldite®2015 e Sikaforce®7752, respetivamente, para diferentes valores de L_0 . Verifica-se que, nas juntas com o adesivo 2015, o aumento de L_0 se traduz num aumento de $P_{máx}$, tal como nas juntas com o adesivo 7752. No entanto, registam-se exceções: as juntas com $L_0=10$ e 20 mm, com o adesivo 7752, e as juntas com $L_0=20$ mm com o adesivo 2015, sofreram rotura no aderente, não apresentando variações significativas no deslocamento à rotura relativamente ao L_0 anterior.

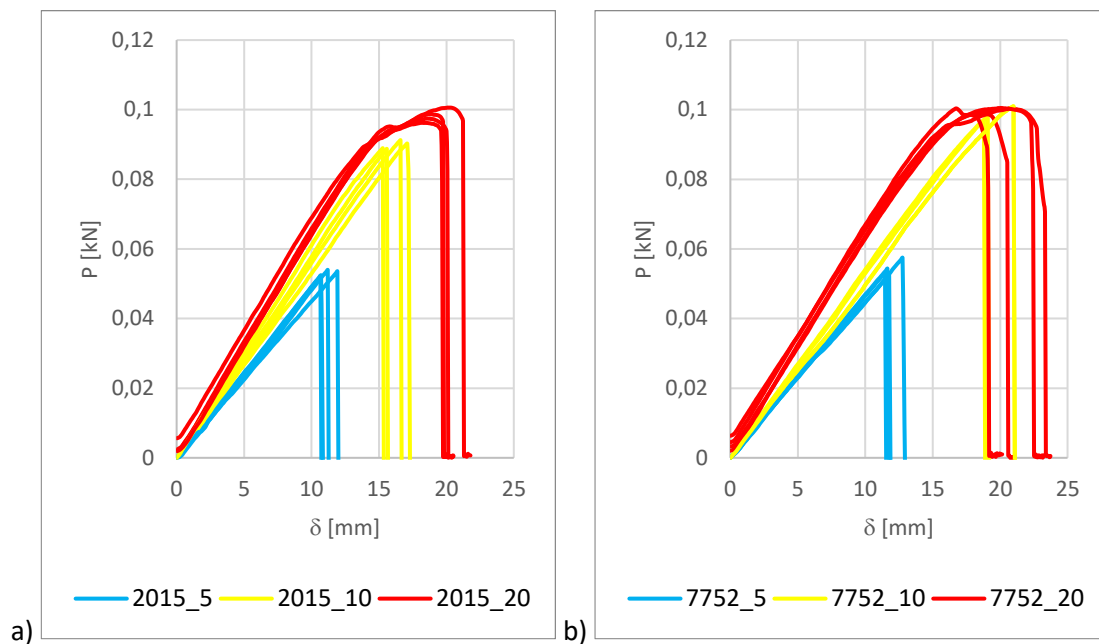


Figura 37 - Curvas P - δ das juntas SLJ com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752

Com a análise da Tabela 16, Figura 38 e Tabela 17, verifica-se que as juntas SLJ aumentam a sua resistência com o aumento do L_0 , para ambos os adesivos. As juntas com aderente em PLA apresentam uma resistência superior face aos restantes materiais, enquanto as juntas com aderente em PETG evidenciam a menor resistência, o que se justifica pelas propriedades mecânicas mais reduzidas deste material. Verifica-se ainda que a rigidez das juntas com o adesivo 7752 é ligeiramente superior à das juntas com o adesivo 2015, exceto nos casos de PETG para $L_0=20$ mm e PLA para $L_0=5$ mm.

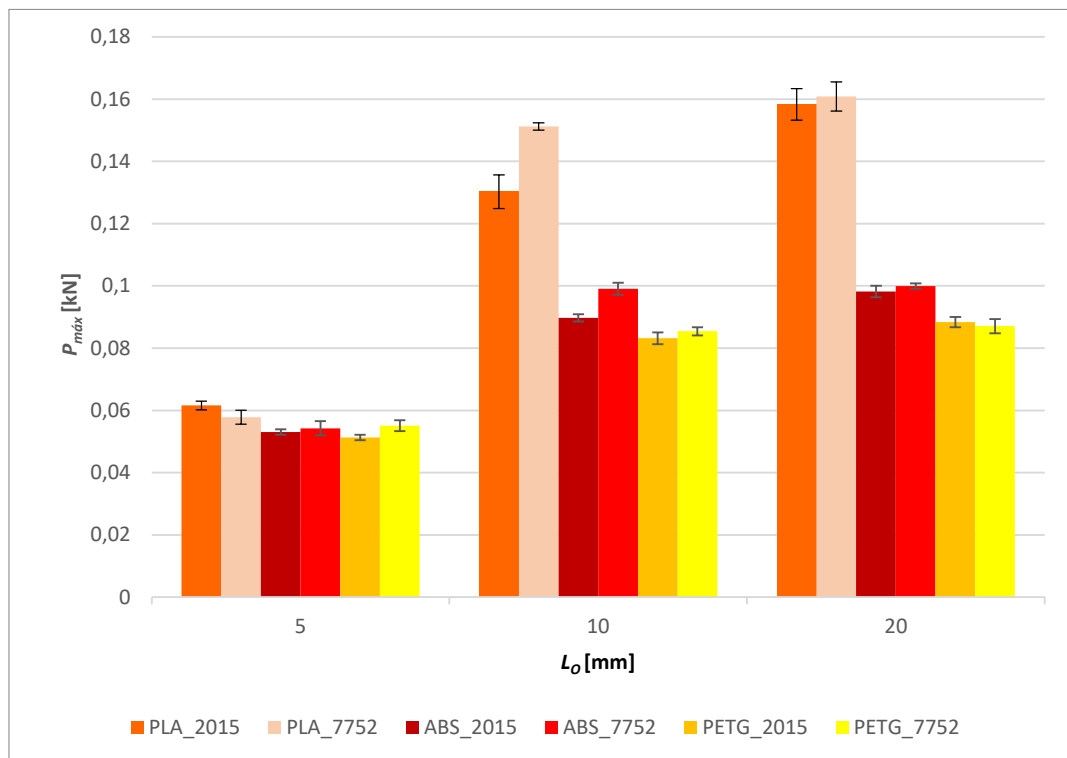
Com base na análise referida no parágrafo anterior, conclui-se que o valor de $P_{máx}$ das juntas aumenta de forma mais acentuada entre L_0 de 5 e 10 mm, do que entre L_0 de 10 e 20 mm.

- Nas juntas de PLA com adesivo 2015, registou-se um aumento de $P_{máx}$ de **111,5%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **21,6%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento foi de **161,6%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **6,4%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de PETG com o adesivo 2015, o aumento de $P_{máx}$ foi de **62,2%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **6,2%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, observou-se um aumento de **55,0%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **19,0%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de ABS com o adesivo 2015, verificou-se um aumento de **69,2%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **9,5%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento foi de **55,0%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de apenas **0,9%** entre $L_0=10$ e 20 mm.

Observou-se que as juntas de PLA apresentaram, de forma consistente, os valores mais elevados de $P_{máx}$, o que demonstra uma maior capacidade de resistência à carga antes da rotura. Em seguida, surgem as juntas ABS, que, embora com desempenho inferior ao aderente PLA, revelam uma resistência considerável. Por fim, as juntas de PETG registaram os valores mais baixos de $P_{máx}$, entre os três materiais testados.

Tabela 16 - Modos de roturas nas juntas *SLJ*

Materiais		L_o		
		5	10	20
PLA	2015	4 Coesiva	4 Coesiva	3 Coesiva + 1 Aderente
	7752	4 Coesiva	4 Coesiva	4 Coesiva
PETG	2015	4 Coesiva	Aderente	4 Aderente
	7752	4 Coesiva	4 Coesiva	4 Aderente
ABS	2015	4 Coesiva	4 Coesiva	4 Aderente
	7752	4 Coesiva	4 Aderente	4 Aderente

Figura 38 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o [mm] por adesivo e aderente para as juntas *SLJ*Tabela 17 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o para as juntas *SLJ*

Aderente	Adesivo	2015			7752		
	L_o [mm]	5,00	10,00	20,00	5,00	10,00	20,00
PLA	Média	61,57	130,24	158,36	57,81	151,22	160,88
	Desvio Padrão	1,43	5,39	5,07	2,22	1,18	4,67
	CoV [%]	2,32	4,14	3,20	3,84	0,78	2,91
PETG	Média	51,30	83,19	88,33	55,10	85,42	87,06
	Desvio Padrão	0,91	1,88	1,65	1,77	1,31	2,33
	CoV [%]	1,77	2,25	1,87	3,21	1,53	2,68
ABS	Média	53,03	89,74	98,23	54,25	99,06	99,94
	Desvio Padrão	0,86	1,18	1,86	2,30	1,95	0,86
	CoV [%]	1,61	1,31	1,89	4,25	1,97	0,86

A Figura 39 apresenta, nos gráficos a) e b) as curvas $P-\delta$ para juntas com geometria SCARF, de aderente PLA com adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para diferentes valores L_0 . Verifica-se que, nas juntas com os dois adesivos, o aumento de L_0 se traduz num aumento da $P_{m\acute{a}x}$, sendo as roturas maioritariamente coesivas. Nas juntas com aderente PETG e ABS para $L_0=20$ mm, para ambos os adesivos, registou-se rotura no aderente devido a atingir o limite de resist\encia dos aderentes antes do adesivo. Na Figura 40, os gr\aficos a) e b) apresentam as curvas $P-\delta$ para juntas com geometria SCARF, com aderente em PETG e adesivos 2015 e 7752, respetivamente, para diferentes valores de L_0 . Verifica-se que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ e L_0 s\ao pr\oximos entre os adesivos, com exce\c\ao das juntas com $L_0=5$ mm, que sofreram rotura no adesivo. Nas restantes configura\c\oes, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ mant\em-se semelhantes, o que se justifica pelo facto de as respetivas juntas terem apresentado rotura no aderente.

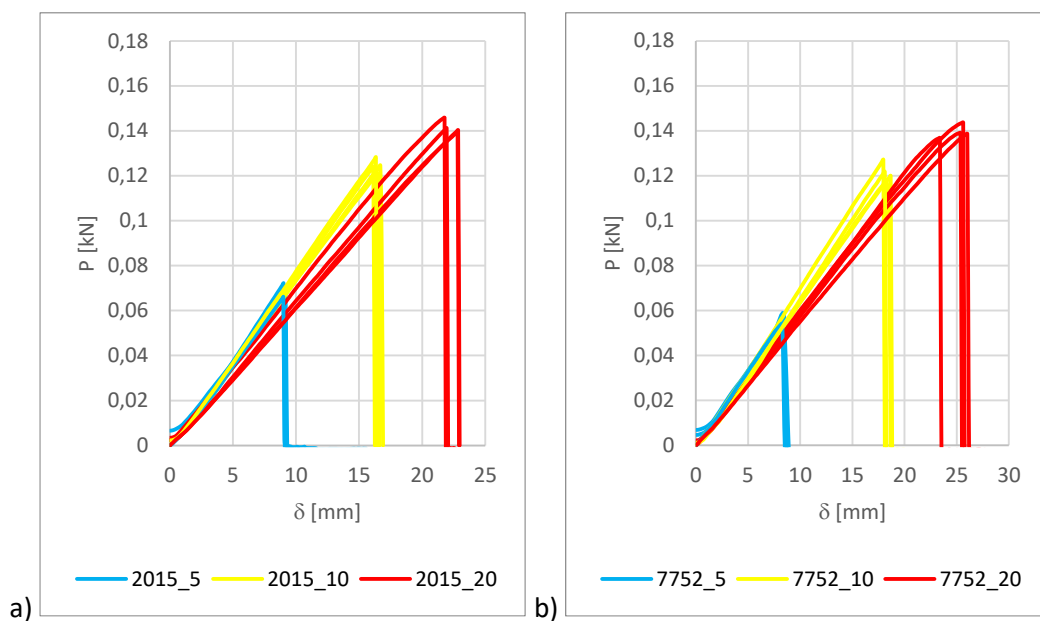


Figura 39 - Curvas $P-\delta$ das juntas SCARF com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752

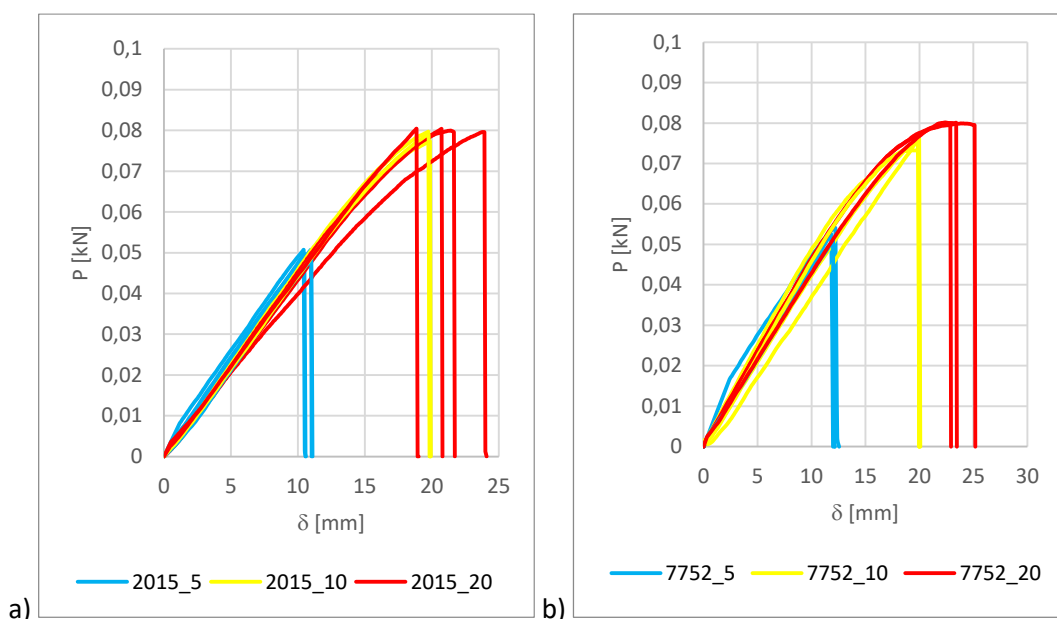


Figura 40 - Curvas $P-\delta$ das juntas SCARF com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752

Desenvolvimento

Na Figura 41, os gráficos a) e b) apresentam as curvas $P-\delta$ para juntas com geometria *SCARF*, com aderente em ABS e adesivos 2015 e 7752, respetivamente, para diferentes valores de L_0 . Verifica-se que, para ambos os adesivos, nas juntas com $L_0=10$ e 20 mm, a rotura ocorre no aderente, pelo que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ são semelhantes e as variações no deslocamento à rotura são pouco significativas.

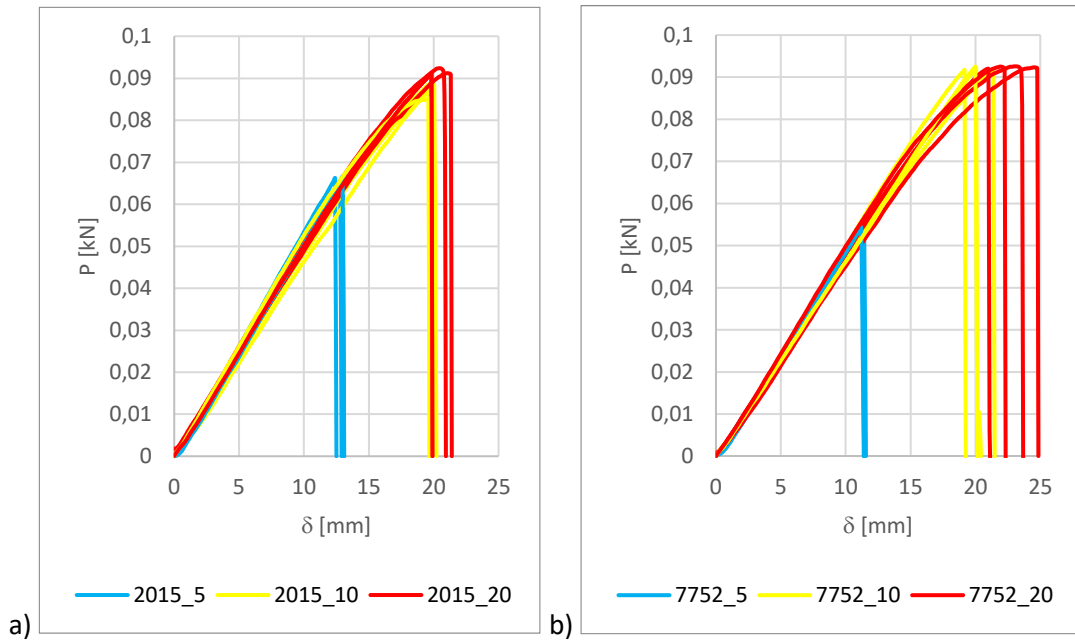


Figura 41 - Curvas $P-\delta$ das juntas *SCARF* com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752

Com a análise da Tabela 18, Figura 42 e da Tabela 19, verifica-se que as juntas *SCARF* aumentam a sua resistência com o incremento do L_0 , para ambos os adesivos. As juntas com aderente em PLA apresentam uma resistência superior face aos restantes materiais, enquanto as de PETG evidenciam a menor resistência, o que se justifica pelas propriedades mecânicas inferiores deste último. Verifica-se ainda que a rigidez das juntas com o adesivo 2015 é, de forma geral, ligeiramente superior às juntas com adesivo 7752, com exceção dos casos de juntas com aderente em ABS para $L_0=10$ e 20 mm.

Conclui-se também que o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ é mais acentuado quando se comparam as juntas com $L_0=10$ mm face às de $L_0=5$ mm, do que quando se comparam as de $L_0=20$ mm face às de $L_0=10$ mm. Este comportamento deve-se ao modo de rotura no adesivo das juntas com $L_0=5$ mm, enquanto as juntas com $L_0=10$ e 20 mm sofrem rotura no aderente. A exceção verifica-se nas juntas com aderente em PLA, nas quais apenas se observa rotura no aderente apenas para $L_0=20$ mm, sendo este o motivo pelo qual estas juntas apresentam um aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ superior ao das juntas fabricadas com os restantes materiais.

Com base na análise referida no parágrafo anterior, verificou-se que:

- Nas juntas com aderente em PLA e adesivo 2015, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ aumentou **80,94%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e **13,83%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento foi de 120,41% entre $L_0=5$ e 10 mm, e de 14,95% entre $L_0=10$ e 20 mm;

- Nas juntas com aderente em PETG, registou-se, com o adesivo 2015, um aumento de **57,22%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e de **2,17%** entre $L_o=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o $P_{m\acute{a}x}$ aumentou **44,72%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e **6,55%** entre $L_o=10$ e 20 mm;
- Nas juntas com aderente em ABS e com o adesivo 2015, um aumento de **33,36%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e de **4,68%** entre $L_o=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ foi de **69,23%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e de apenas **0,39%** entre $L_o=10$ e 20 mm.

Observou-se que as juntas de PLA apresentaram, de forma consistente, os valores mais elevados de $P_{m\acute{a}x}$, o que demonstra uma maior capacidade de resist\ancia \a carga antes da rotura. Em seguida, surgem as juntas de ABS e de PETG que registaram os valores mais baixos de $P_{m\acute{a}x}$, entre os tr\es materiais testados.

Tabela 18 - Modos de roturas na juntas SCARF

Materiais		L_o		
		5	10	20
PLA	2015	4 Coesiva	4 Coesiva	4 Aderente
	7752	4 Coesiva	4 Coesiva	2 Coesiva+ 2 Aderente
PETG	2015	4 Coesiva	4 Aderente	4 Aderente
	7752	4 Coesiva	4 Aderente	4 Aderente
ABS	2015	4 Coesiva	4 Aderente	4 Aderente
	7752	4 Coesiva	4 Aderente	4 Aderente

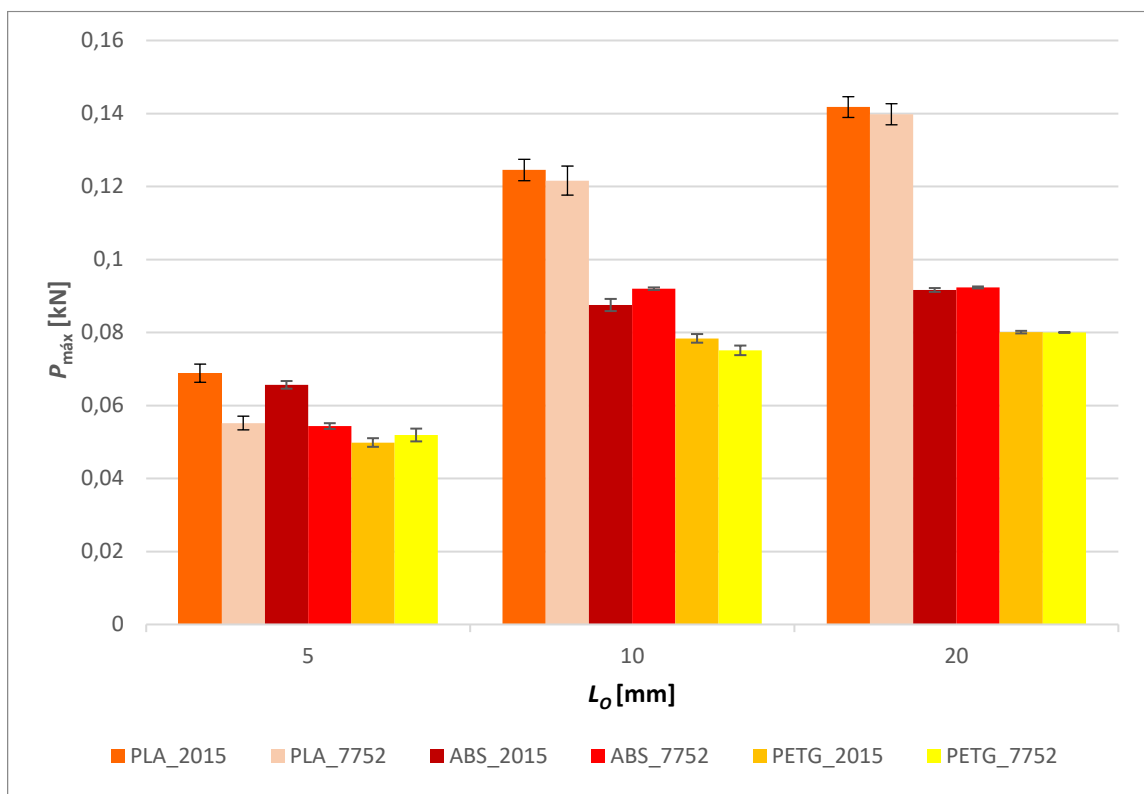
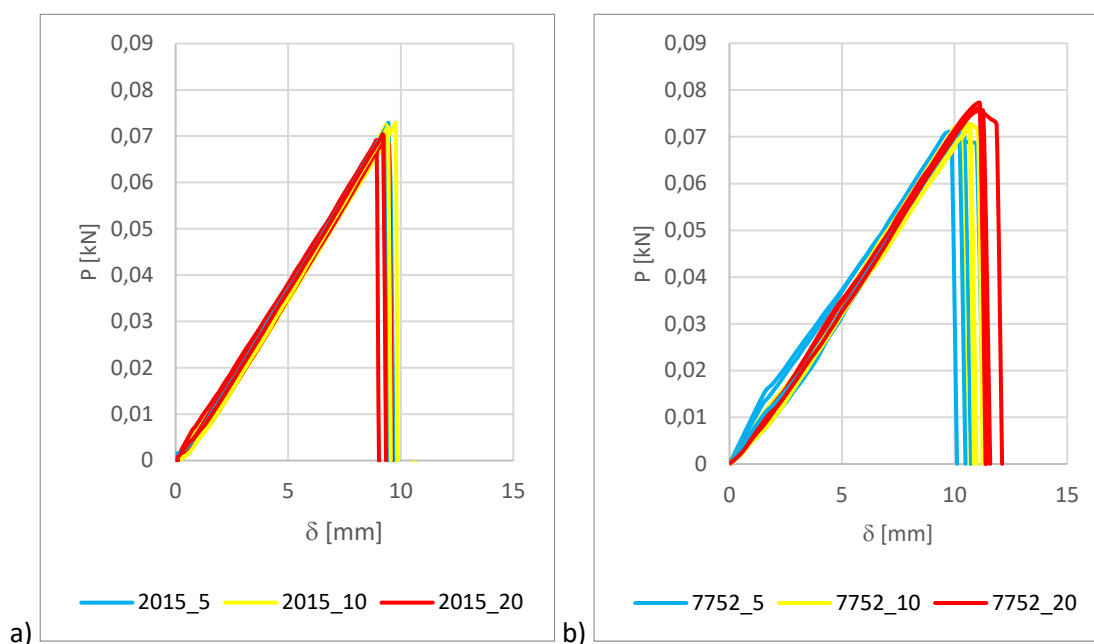


Figura 42 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] em função de L_o [mm] por adesivo e aderente para as juntas SCARF

Tabela 19 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o para as juntas SCARF

Aderente	Adesivo	2015			7752		
	L_o [mm]	5,00	10,00	20,00	5,00	10,00	20,00
PLA	Média	68,83	124,55	141,77	55,18	121,62	139,81
	Desvio Padrão	2,51	2,93	2,82	1,86	3,96	2,91
	CoV [%]	3,65	2,35	1,99	3,38	3,26	2,08
PETG	Média	49,86	78,39	80,09	51,90	75,11	80,03
	Desvio Padrão	1,14	1,14	0,38	1,74	1,32	0,11
	CoV [%]	2,29	1,46	0,47	3,34	1,76	0,14
ABS	Média	65,65	87,56	91,65	54,36	91,99	92,35
	Desvio Padrão	1,05	1,66	0,55	0,79	0,33	0,27
	CoV [%]	1,60	1,89	0,60	1,46	0,36	0,29

A Figura 43 apresenta, nos gráficos a) e b), as curvas $P-\delta$ para juntas com geometria *STEP*, com aderente em PLA e adesivos 2015 e 7752, respetivamente, para diferentes valores de L_o . Verifica-se que, nas juntas com o adesivo 2015, os valores de $P_{máx}$ são semelhantes para todos os L_o , o que resulta das roturas no aderente em todos os casos. Já nas juntas com o adesivo 7752, as roturas são coesivas no adesivo, e $P_{máx}$ apresenta pequenas variações com o aumento do L_o .

Figura 43 - Curvas $P-\delta$ das juntas *STEP* com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752

Na Figura 44, os gráficos a) e b) apresentam as curvas $P-\delta$ para juntas com geometria *STEP*, com aderente em PETG e adesivos 2015 e 7752, respetivamente, para diferentes valores de L_o . Verifica-se que, em ambas as configurações, os valores de $P_{máx}$ são semelhantes para todos os L_o , o que resulta do facto da rotura ter ocorrido sempre no aderente. No entanto, nas juntas com o adesivo 2015, observou-se um maior deslocamento à rotura, bem como valores de $P_{máx}$ consideravelmente superiores aos obtidos com o adesivo 7752.

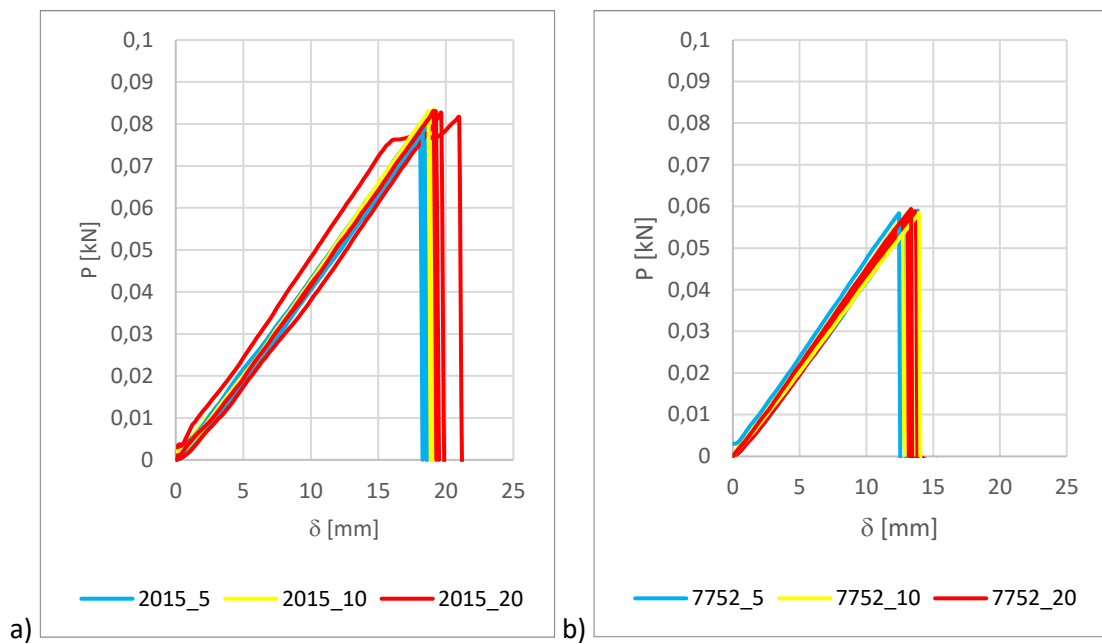


Figura 44 - Curvas P - δ das juntas $STEP$ com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752

Na Figura 45, os gráficos a) e b) apresentam as curvas P - δ para juntas com geometria $STEP$, com aderente em ABS e adesivos 2015 e 7752, respetivamente, para diferentes valores de L_0 . Verifica-se que, para ambos os adesivos, as juntas apresentam valores semelhantes de $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamento à rotura para todos os L_0 . Este comportamento resulta de que todas as roturas ocorreram no aderente.

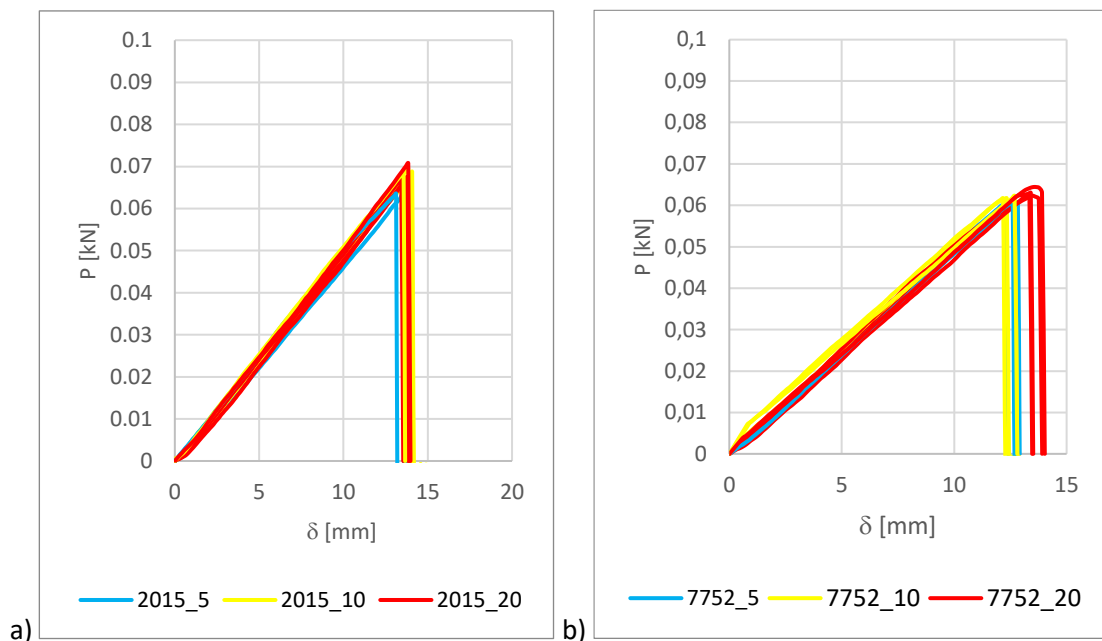


Figura 45 - Curvas P - δ das juntas $STEP$ com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752.

Com a análise da Tabela 20, Figura 46 e Tabela 21, verifica-se que as juntas do tipo $STEP$ apresentam valores de $P_{m\acute{a}x}$ consistentes para os diferentes L_0 . Este comportamento deve-se ao facto de todas as juntas terem fraturado no aderente, independentemente do L_0 , com exceção das juntas em PLA com o adesivo 7752 que, ao romperem sistematicamente pelo adesivo,

conseguiram apresentar aumentos no valor de $P_{m\acute{a}x}$. Conclui-se também que as juntas com aderente em PETG e adesivo 2015 apresentam a maior resistência em compara o com as restantes configura es, enquanto as juntas com PETG e adesivo 7752 registam os valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais baixos entre os diferentes materiais e adesivos analisados.

Tabela 20 - Modos de roturas nas juntas STEP

Materiais		L_o		
		5	10	20
PLA	2015	3 Aderente + 1 Coesiva	3 Aderente + 1 Coesiva	3 Aderente + 1 Coesiva
	7752	4 Coesiva	4 Coesiva	4 Coesiva
PETG	2015	4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente
	7752	4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente
ABS	2015	4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente
	7752	4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente

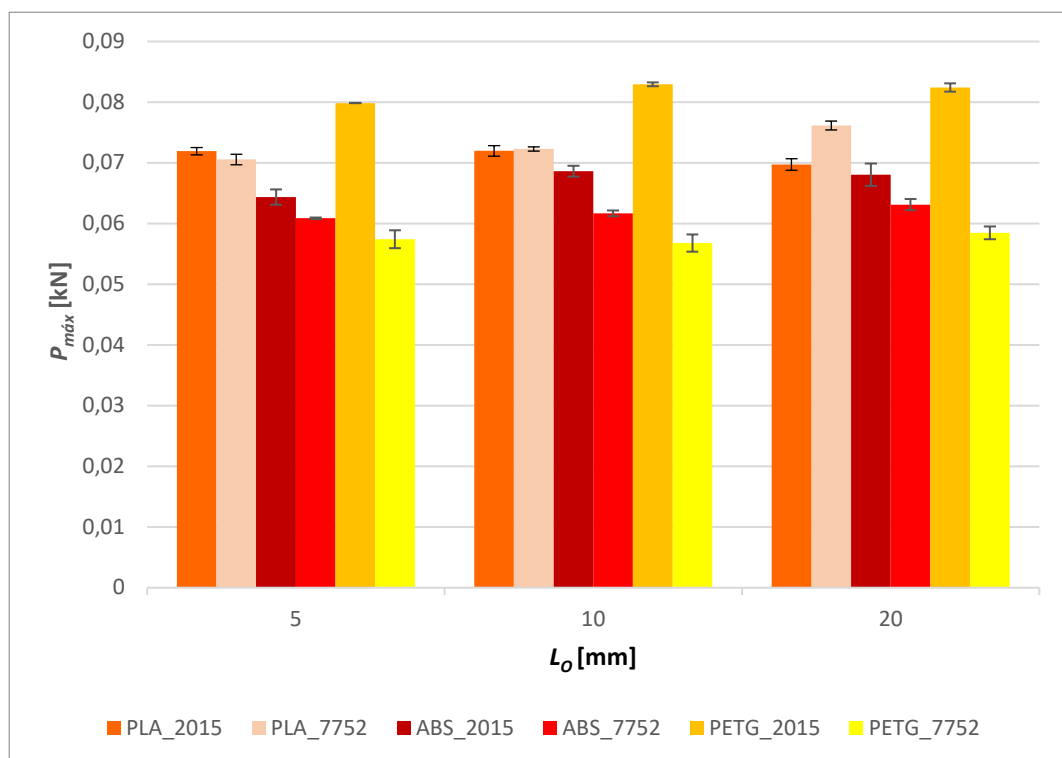


Figura 46 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] em função de L_o [mm] por adesivo e aderente para as juntas STEP

Com base na análise apresentada, verificou-se que:

- Nas juntas com aderente em PLA, verificou-se que, com o adesivo 2015, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ aumentou **0,08%** entre $L_o=5$ e 10 mm, seguido de um decréscimo de **3,12%** entre $L_o=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, registou-se um aumento de **2,46%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e de **5,32%** entre $L_o=10$ e 20 mm;
- Nas juntas com aderente em PETG, o adesivo 2015 resultou num aumento de $P_{m\acute{a}x}$ de **3,89%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e diminui **0,68%** entre $L_o=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752,

observou-se um decréscimo de **1,13%** entre $L_0=5$ e 10 mm, seguido de um aumento de **2,98%** entre $L_0=10$ e 20 mm;

- Nas juntas com aderente em ABS, verificou-se que, com o adesivo 2015, $P_{máx}$ diminuiu **6,22%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e **0,85%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, registou-se um aumento de **1,33%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **2,34%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Verificou-se que as juntas de PETG com adesivo 2015 apresentaram consistentemente os valores mais elevados de $P_{máx}$, seguidas pelas juntas de PLA, as juntas de ABS e, por último, pelas de PETG com adesivo 7752. As juntas de PETG com adesivo 7752 foram as únicas, entre as juntas com geometria STEP, a evidenciar rotura coesiva no adesivo, o que indica menor resistência, dado que, nas restantes, o desempenho é condicionado pelas propriedades mecânicas dos aderentes (rotura pelo aderente).

Tabela 21 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_0 para as juntas STEP

Aderente	Adesivo	2015			7752		
	L_0 [mm]	5,00	10,00	20,00	5,00	10,00	20,00
PLA	Média	71,91	71,96	69,72	70,54	72,28	76,12
	Desvio Padrão	0,62	0,88	0,96	0,87	0,33	0,73
	CoV [%]	0,87	1,22	1,38	1,24	0,46	0,96
PETG	Média	79,85	82,95	82,39	57,40	56,76	58,45
	Desvio Padrão	0,03	0,31	0,68	1,46	1,41	1,04
	CoV [%]	0,04	0,38	0,83	2,55	2,49	1,79
ABS	Média	64,34	68,61	68,02	60,85	61,66	63,11
	Desvio Padrão	1,27	0,90	1,84	0,12	0,49	0,92
	CoV [%]	1,97	1,32	2,71	0,20	0,79	1,45

Das diferentes juntas estudadas, a junta com maior $P_{máx}$ foi a junta *SLJ* com aderente PLA e adesivo 7752 para $L_0=20$ mm. Por outro lado, o valor mínimo de $P_{máx}$ foi registado na junta *SCARF*, com aderente em PETG e adesivo 2015, para $L_0=5$ mm. Em função das propriedades mecânicas dos diferentes materiais, seria que as juntas que possuíssem o maior $P_{máx}$ fossem as juntas de PLA seguidos de ABS e PETG, não se verificou. Contudo, nas juntas *STEP* o material PETG apresentou valores de $P_{máx}$ mais elevados do que os restantes materiais, seguindo-se das juntas construídas com PLA e ABS. Nas juntas *STEP* ao contrário das restantes, o PLA tende a romper antecipadamente devido à existência de picos de tensão nos aderentes na zona do degrau devido à variação brusca de geometria.

3.1.6.3. Rigidez máxima

A rigidez das juntas foi obtida através do cálculo do declive das curvas $P-\delta$, apresentadas no capítulo 3.1.6.2, enquanto estas se encontram em regime elástico. Para a realização deste cálculo, recorreu-se à equação (8), segundo a qual se efetuou a divisão da variação da força no intervalo elástico da junta (ΔF) pela variação do deslocamento correspondente ($\Delta \delta$). A rigidez máxima foi determinada com base nos primeiros incrementos dos ensaios experimentais, nos

quais ΔF apresenta valores elevados e os δ são ainda reduzidos, permitindo assim uma estimativa mais precisa da rigidez em regime elástico.

$$K = \left(\frac{\Delta F}{\Delta \delta} \right) = \frac{F_2 - F_1}{\delta_2 - \delta_1} \quad (8)$$

As flutuações nos valores de rigidez (decréscimos seguidos de aumentos pontuais) podem ser atribuídas à variabilidade estatística, provocada por pequenos defeitos de fabrico dos aderentes e/ou das juntas, diferenças na geometria das juntas, pequenos desalinhamentos no ensaio, falta de homogeneidade nos materiais e pela imprecisão de medição de F e δ .

Com base na análise da Figura 47 e da Tabela 22 verifica-se que, nas juntas *SLJ*, a rigidez aumenta com o aumento do L_o , ou seja, com o aumento da área de ligação. Este comportamento deve-se à maior resistência da zona ligada com o aumento do L_o . Conclui-se ainda que as juntas com maior rigidez são as constituídas por PLA, seguidas das de ABS e, por fim, das de PETG. A rigidez das juntas com o adesivo 2015 é ligeiramente superior à observada para as juntas com o adesivo 7752 devido à maior rigidez do primeiro.

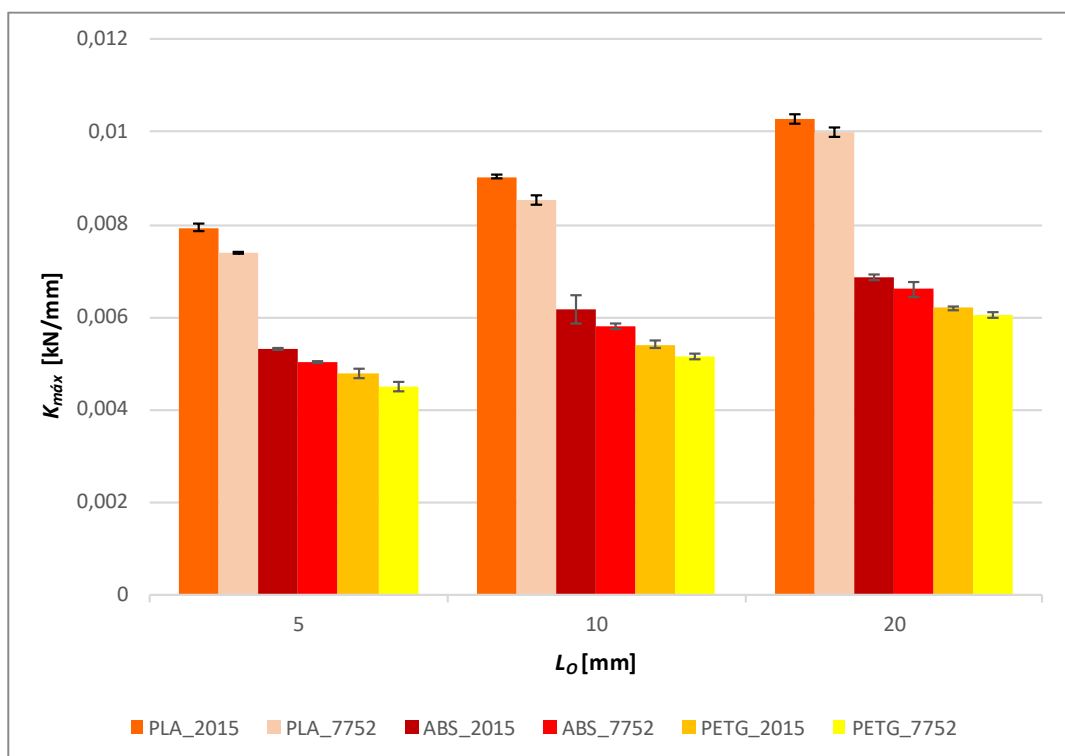


Figura 47 - Valores médios de $K_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas *SLJ*

- Nas juntas de PLA com adesivo 2015, registou-se um aumento de $K_{m\acute{a}x}$ de **13,93%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e de **13,93%** entre $L_o=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento foi de **15,47%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e de **17,31%** entre $L_o=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de PETG com o adesivo 2015, o aumento de $K_{m\acute{a}x}$ foi de **12,71%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e de **14,71%** entre $L_o=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, observou-se um aumento de **14,26%** entre $L_o=5$ e 10 mm, e de **17,74%** entre $L_o=10$ e 20 mm;

- Nas juntas de ABS com o adesivo 2015, verificou-se um aumento de **16,14%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **11,28%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento foi de **15,06%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de apenas **14,45%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- As juntas de PLA apresentaram, de forma consistente, os valores mais elevados de $K_{m\acute{a}x}$. Em seguida, surgem as juntas ABS, que, embora com desempenho inferior ao das juntas compostas por PLA, revelam uma rigidez considerável. Por fim, as juntas de PETG registaram os valores mais baixos de $K_{m\acute{a}x}$, entre os três materiais testados.

Tabela 22 - Valores médios de $K_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 para as juntas *SLJ*

Aderente	Adesivo	2015			7752		
	L_0 [mm]	5,00	10,00	20,00	5,00	10,00	20,00
PLA	Média	7,93	9,03	10,29	7,38	8,53	10,00
	Desvio Padrão	0,09	0,04	0,10	0,03	0,09	0,10
	CoV [%]	1,14	0,45	0,93	0,45	1,02	0,99
PETG	Média	4,79	5,40	6,20	4,50	5,14	6,06
	Desvio Padrão	0,10	0,08	0,04	0,11	0,05	0,06
	CoV [%]	2,17	1,40	0,65	2,39	0,91	1,03
ABS	Média	5,31	6,16	6,86	5,03	5,79	6,61
	Desvio Padrão	0,04	0,32	0,05	0,02	0,06	0,16
	CoV [%]	0,66	5,13	0,77	0,46	1,07	2,49

Com base na análise da Figura 48 e da Tabela 23, verifica-se que, nas juntas *SCARF*, a rigidez se mantém praticamente constante em função de L_0 , com exceção da ligeira redução observada na rigidez das juntas em PLA para $L_0=20$ mm. A uniformidade da rigidez decorre da não variação da resistência das juntas com a aplicação da carga de flexão com a mudança de L_0 entre os limites estipulados. Conclui-se que as juntas com maior rigidez são as constituídas por PLA, seguidas das de ABS e, por fim, das de PETG. De forma geral, a rigidez das juntas com o adesivo 2015 é ligeiramente superior à das juntas com o adesivo 7752. A variação da rigidez tanto com o aderente como com o adesivo está naturalmente associada às diferenças de rigidez.

Com base na análise referida, verificou-se que:

- Nas juntas de PLA com adesivo 2015, registou-se um decréscimo de $K_{m\acute{a}x}$ de **2,27%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um decréscimo de **14,83%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o decréscimo foi de **0,47%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **10,84%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de PETG com o adesivo 2015, o decréscimo de $K_{m\acute{a}x}$ foi de **1,57%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de **0,09%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, observou-se um aumento de **2,23%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **0,73%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de ABS com 2015, verificou-se um decréscimo de **2,19%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de **0,20%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o decréscimo foi de **2,85%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de **2,31%** entre $L_0=10$ e 20 mm.

Desenvolvimento

Observou-se que as juntas de PLA apresentaram, de forma consistente, os valores mais elevados de $K_{m\acute{a}x}$, seguidas das juntas ABS, e por fim, as juntas de PETG. Concluiu-se também que, com o aumento de L_o , houve uma transição gradual para roturas no aderente, particularmente com o adesivo 2015, o que reflete uma eficácia da ligação adesiva. O PETG, por outro lado, revelou uma tendência mais acentuada para roturas no aderente à medida que L_o aumenta, o que está em consonância com a sua menor resistência. O ABS apresentou um comportamento intermédio, com predominância de roturas coesivas apenas para L_o mais baixos e com roturas no aderente em L_o superiores, independentemente do adesivo utilizado.

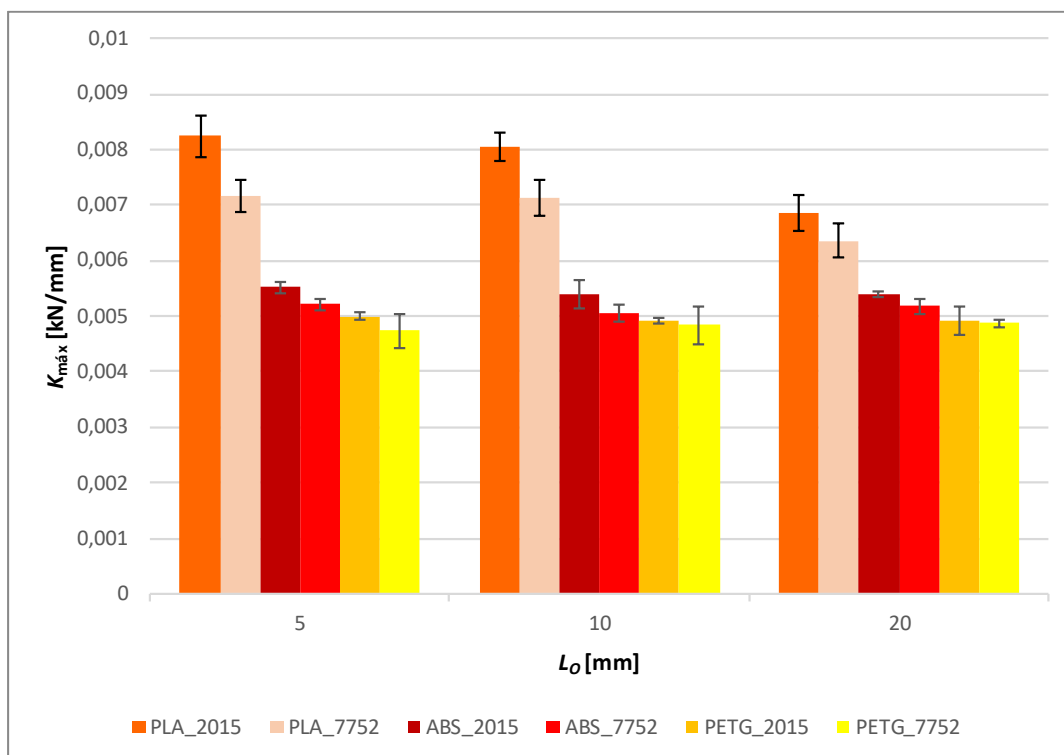


Figura 48 - Valores médios de $K_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas SCARF

Tabela 23 - Valores médios de $K_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_o para as juntas SCARF

Aderente	Adesivo	2015			7752		
	L_o [mm]	5,00	10,00	20,00	5,00	10,00	20,00
PLA	Média	8,25	8,06	6,87	7,16	7,13	6,35
	Desvio Padrão	0,38	0,25	0,33	0,29	0,32	0,31
	CoV [%]	4,64	3,12	4,81	4,09	4,49	4,87
PETG	Média	5,00	4,92	4,93	4,73	4,84	4,87
	Desvio Padrão	0,06	0,06	0,26	0,30	0,35	0,07
	CoV [%]	1,19	1,22	5,23	6,37	7,15	1,36
ABS	Média	5,52	5,40	5,41	5,21	5,06	5,18
	Desvio Padrão	0,11	0,26	0,05	0,11	0,15	0,13
	CoV [%]	1,96	4,77	0,86	2,02	3,06	2,56

Com base na análise da Figura 49 e da Tabela 24, é de mostrar que, nas juntas STEP, a rigidez se mantém praticamente constante para os diferentes valores de L_0 . Verifica-se que as juntas fabricadas em PLA apresentam os valores mais elevados de rigidez, seguidas pelas de ABS e, por último, pelas de PETG. Este comportamento está relacionado com as propriedades mecânicas intrínsecas de cada material: o PLA possui um módulo de elasticidade mais elevado e menor deformabilidade plástica, o que lhe confere maior resistência inicial à deformação. O ABS apresenta um comportamento intermédio, enquanto o PETG apresenta um módulo de elasticidade inferior, o que o torna mais deformável e, conseqüentemente, menos rígido. De forma global, observa-se também que as juntas adesivas com o adesivo 2015 apresentam rigidez ligeiramente superior às juntas com o adesivo 7752, devido à rigidez superior do adesivo.

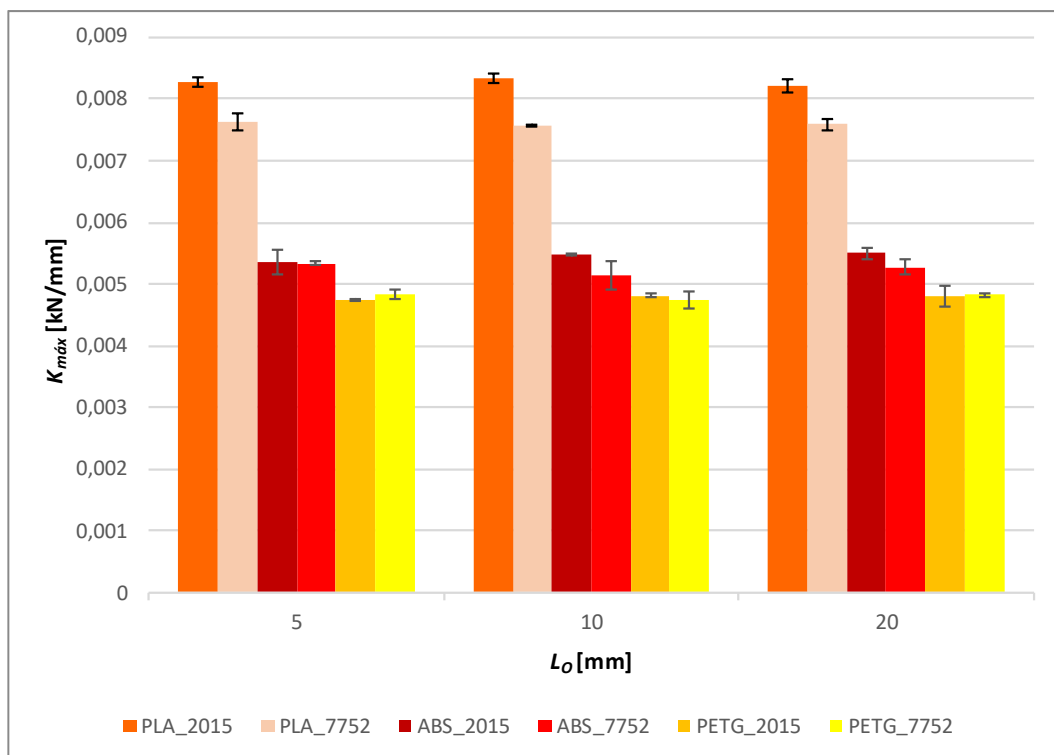


Figura 49 - Valores médios de $K_{máx}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para as juntas STEP

Com base na análise descrita, verificou-se que:

- Nas juntas de PLA com 2015, registou-se um aumento de $K_{máx}$ de **0,66%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um decréscimo de **1,50%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o 7752, o decréscimo foi de **0,73%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de **0,34%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de PETG com 2015, o aumento de $K_{máx}$ foi de **1,29%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e o decréscimo de **0,73%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o 7752, observou-se um decréscimo de **2,01%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de **1,70%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de ABS com o adesivo 2015, verificou-se um aumento de $K_{máx}$ de **2,07%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **0,40%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o decréscimo foi de **3,58%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de apenas **2,55%** entre $L_0=10$ e 20 mm;

- Observou-se que as juntas de PLA apresentaram, de forma consistente, os valores mais elevados de $K_{m\acute{a}x}$. Em seguida, surgem as juntas ABS e as juntas de PETG que registaram os valores mais baixos de $K_{m\acute{a}x}$, entre os tr\^es materiais testados.

Tabela 24 - Valores m\^edios de $K_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em fun\^c\~ao de L_o para as juntas *STEP*

Aderente	Adesivo	2015			7752		
		L_o [mm]	5,00	10,00	20,00	5,00	10,00
PLA	M\^edia	8,28	8,33	8,21	7,62	7,57	7,59
	Desvio Padr\~ao	0,08	0,07	0,10	0,14	0,02	0,09
	CoV [%]	0,96	0,88	1,22	1,78	0,33	1,16
PETG	M\^edia	4,75	4,81	4,81	4,84	4,74	4,82
	Desvio Padr\~ao	0,11	0,06	0,06	0,09	0,13	0,04
	CoV [%]	2,38	1,34	1,22	1,79	2,76	0,84
ABS	M\^edia	5,37	5,48	5,50	5,33	5,14	5,27
	Desvio Padr\~ao	0,20	0,02	0,10	0,03	0,23	0,13
	CoV [%]	3,79	0,29	1,84	0,61	4,52	2,43

Das diferentes juntas testadas, a junta que obteve o $K_{m\acute{a}x}$ mais elevado foi obtida na junta *SLJ* com aderente PLA e adesivo 2015 para $L_o = 20$ mm. Por outro lado, o valor m\^inimo de $K_{m\acute{a}x}$ foi registado na junta *STEP*, com aderente em PETG e adesivo 7752, para $L_o = 10$ mm. De forma geral, as juntas que apresentaram maiores valores de $K_{m\acute{a}x}$ foram as do tipo *STEP*. No entanto, observa-se que, nas juntas *STEP* e *SCARF*, o aumento do L_o tende a provocar uma ligeira diminui\~c\~ao da rigidez. Em contraste, nas juntas *SLJ*, verifica-se que a rigidez aumenta com L_o .

3.1.6.4. Energia de rotura

A energia de rotura corresponde \^a quantidade de energia absorvida por um material at\^e ao momento em que ocorre a rotura. Este par\^ametro est\^a diretamente relacionado com a sua ductilidade, tenacidade e capacidade de absor\~c\~ao de energia antes da rotura [128]. Nesta an\^alise, os valores da energia de rotura foram determinados atrav\^es da utiliza\~c\~ao da equa\~c\~ao (9), que representa a \^area sob as curvas $P-\delta$, at\^e ao ponto de rotura.

$$\text{energia de rotura} = \sum_{i=0}^n P_n * (\delta_n - \delta_{n-1}) \quad (9)$$

Em que:

- P_n \^e o valor da for\~ca no ponto n da curva;
- δ_n \^e o deslocamento correspondente ao ponto n;
- δ_{n-1} \^e o deslocamento no ponto anterior (n-1).

Com base na an\^alise da Figura 50 e da Tabela 25 verifica-se que, nas juntas *SLJ*, para ambos os adesivos, a energia de rotura aumenta com o acr\^escimo do L_o . Conclui-se ainda que as juntas

com maior energia de rotura são constituídas por aderente de PLA, seguidas de ABS e, por fim, de PETG. De forma geral, a rigidez das juntas com o adesivo 2015 é ligeiramente inferior às 7752, com a exceção das juntas de PETG com adesivo 2015 que absorveu mais energia do que as juntas de PETG com o adesivo 7752.

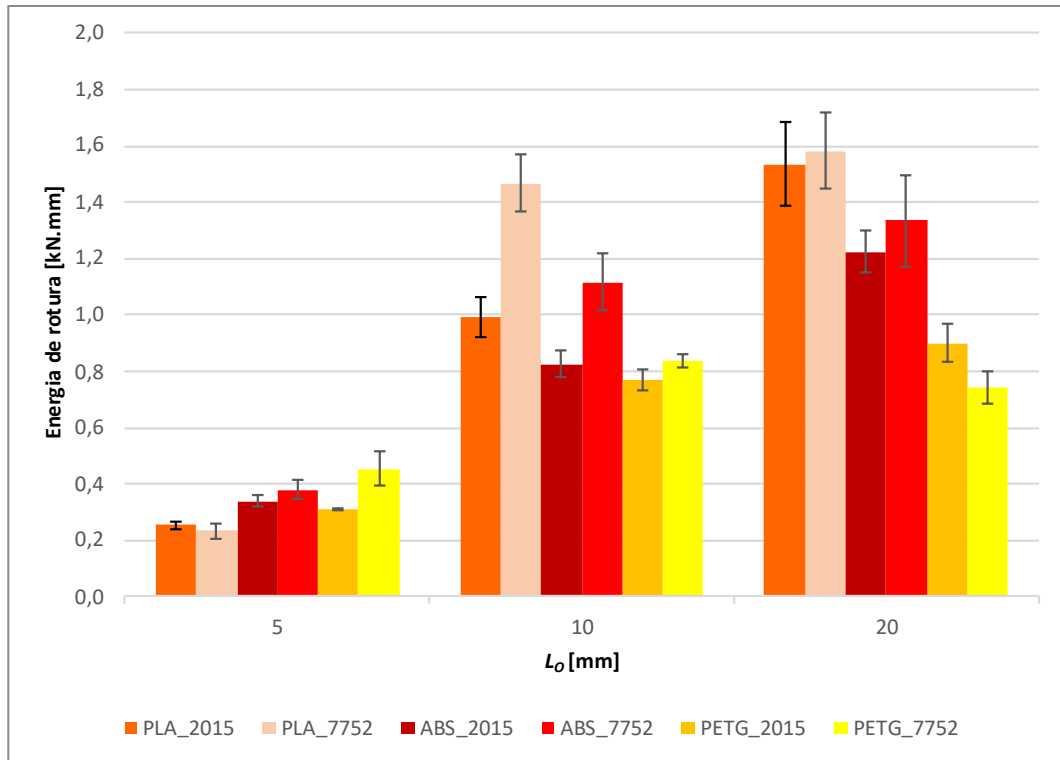


Figura 50 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para as juntas *SLJ*

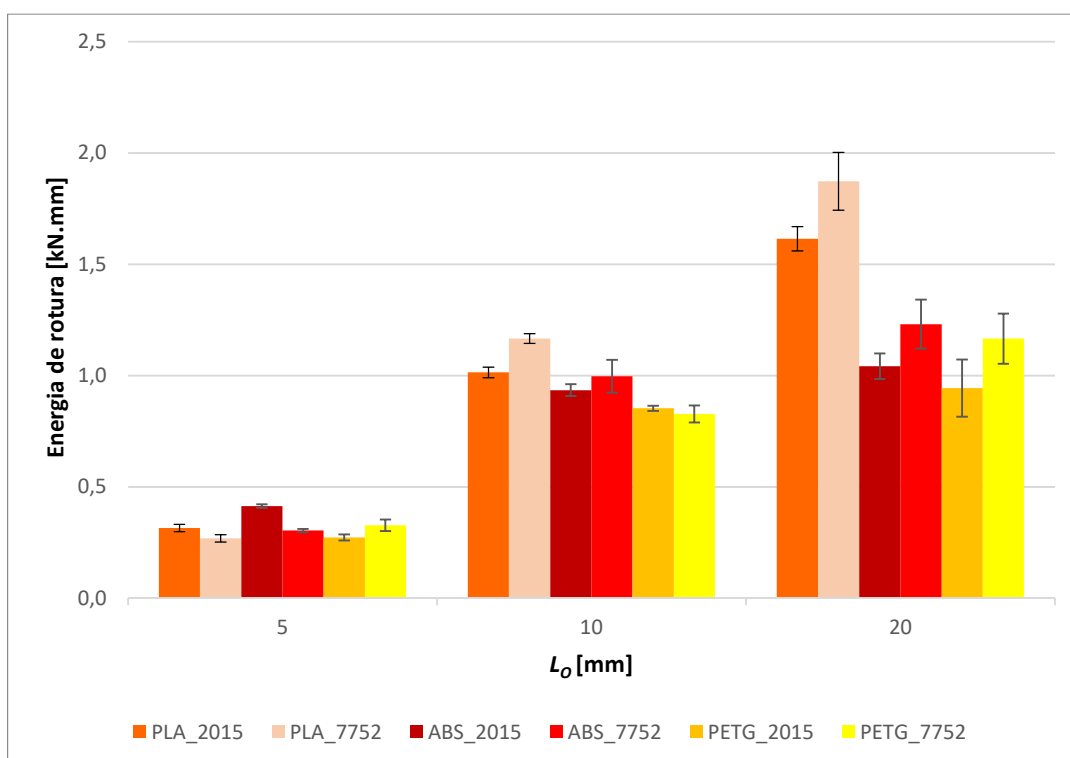
Com base na análise referida no parágrafo anterior, verificou-se que:

- Nas juntas de PLA com adesivo 2015, registou-se um aumento de energia de rotura de **291,00%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **54,82%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento foi de **524,16%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **7,90%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de PETG com 2015, o aumento de energia de rotura foi de **145,76%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e **16,73%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o 7752, observou-se um aumento de **84,78%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um decréscimo de **11,20%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de ABS com 2015, verificou-se um aumento de energia de rotura de **143,63%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **48,38%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o 7752, o aumento foi de **193,33%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de apenas **19,46%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Observou-se que as juntas de PLA apresentaram, para $L_0=10$ e 20 mm, os valores mais elevados de energia de rotura, seguidos das juntas de ABS, e por fim, as juntas de PETG. Nas juntas de PLA com $L_0=10$ mm e adesivo 7752 verificou-se um aumento de absorção de energia, o que se encontra relacionado com a plastificação significativa do aderente antes de ocorrer a rotura. Nas juntas que possuem $L_0=5$ mm, o aderente que possui uma maior absorção de energia é o PETG, seguido do ABS, e por fim o PLA.

Tabela 25 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_0 para as juntas *SLJ*

Aderente	Adesivo	2015			7752		
	L_0 [mm]	5,00	10,00	20,00	5,00	10,00	20,00
PLA	Média	0,25	0,99	1,54	0,23	1,47	1,58
	Desvio Padrão	0,01	0,07	0,15	0,03	0,10	0,14
	CoV [%]	4,59	7,25	9,54	10,93	6,88	8,62
PETG	Média	0,31	0,77	0,90	0,45	0,84	0,74
	Desvio Padrão	0,00	0,04	0,07	0,06	0,02	0,06
	CoV [%]	0,63	5,16	7,53	13,26	2,67	7,87
ABS	Média	0,34	0,83	1,23	0,38	1,12	1,34
	Desvio Padrão	0,02	0,05	0,07	0,04	0,10	0,16
	CoV [%]	5,80	5,71	5,98	9,39	9,04	12,17

Com base na análise da Figura 51 e da Tabela 26, verifica-se que, nas juntas *SCARF*, para ambos os adesivos, a energia de rotura aumenta com o acréscimo do L_0 . Conclui-se ainda que as juntas com maior energia de rotura são constituídas por PLA, seguidas de ABS e, por fim, de PETG. De forma geral, a rigidez das juntas com o adesivo 2015 e $L_0=10$ e 20 mm é ligeiramente inferior às 7752, com a exceção das juntas constituídas por PLA e PETG com $L_0=5$ mm, nas quais o adesivo 2015 absorveu mais energia que o adesivo 7752.

Figura 51 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para as juntas *SCARF*

Com base na análise referida no parágrafo anterior, verificou-se que:

- Nas juntas de PLA com adesivo 2015, registou-se um aumento de energia de rotura de **221,92%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **59,28%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento foi de **334,83%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **60,59%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de PETG com o adesivo 2015, o aumento de energia de rotura foi de **212,85%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **10,61%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, observou-se um aumento de **152,95%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **41,02%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de ABS com o adesivo 2015, verificou-se um aumento de **125,85%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **11,48%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento foi de **228,21%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de apenas **23,51%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Observou-se que as juntas de PLA apresentaram, para $L_0=10$ e 20 mm, os valores mais elevados de energia de rotura, seguidos, das juntas de ABS, e por fim, as juntas de PETG. Nas juntas que possuem $L_0=5$ mm, o aderente que possui uma maior absorção de energia é o ABS, seguido do PETG e por PLA com capacidades de absorção de energia bastante semelhantes.

Tabela 26 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_0 para as juntas SCARF

Aderente	Adesivo	2015			7752		
	L_0 [mm]	5,00	10,00	20,00	5,00	10,00	20,00
PLA	Média	0,32	1,01	1,62	0,27	1,17	1,87
	Desvio Padrão	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02	0,13
	CoV [%]	5,33	2,35	3,38	6,07	1,89	6,95
PETG	Média	0,27	0,85	0,94	0,33	0,83	1,17
	Desvio Padrão	0,01	0,01	0,13	0,03	0,04	0,11
	CoV [%]	5,01	1,32	13,65	7,85	4,62	9,65
ABS	Média	0,41	0,93	1,04	0,30	1,00	1,23
	Desvio Padrão	0,01	0,03	0,06	0,01	0,07	0,11
	CoV [%]	1,99	2,87	5,53	2,46	7,35	8,95

Com base na análise da Figura 52 e da Tabela 27 verifica-se que, nas juntas *STEP*, para ambos os adesivos, as energias de rotura se mantêm aproximadamente constantes com o acréscimo do L_0 , com exceção nas juntas compostas por PETG e adesivo 2015, que apresentam um acréscimo na energia de rotura com o aumento do L_0 . Embora todas as roturas tenham ocorrido no aderente, observa-se que o aumento do L_0 promove uma maior deformação global da junta antes da rotura, o que resulta num acréscimo da energia absorvida. Este efeito é particularmente visível no caso do PETG, devido à sua elevada deformabilidade e ao facto de o adesivo 2015, sendo mais resistente, transferir mais eficazmente as cargas para o aderente ao longo da zona de sobreposição, o que conduz a uma rotura mais progressiva e energeticamente mais dispendiosa. De forma geral, as juntas com maior energia de rotura são as constituídas por PETG, seguidas pelas de ABS e, por fim, pelas de PLA. A energia de rotura das juntas com o adesivo 2015 é inferior à do adesivo 7752, com exceção das juntas de PLA, nas quais o adesivo 2015 absorve mais energia que o 7752. A combinação de PETG com o adesivo 2015 apresenta

valores de energia de rotura significativamente superiores aos demais casos, especialmente para $L_0=20$ mm. Este comportamento pode ser justificado pela forma das curvas $P-\delta$, que mostram um $P_{máx}$ elevado acompanhado por um deslocamento considerável até à rotura, e resulta da combinação da tenacidade e rigidez moderada do adesivo 2015, que permite uma transferência de cargas progressiva e eficiente ao longo da zona de sobreposição, e aumenta a dissipação energética antes da rotura. A maior ductilidade do PETG permite maior deformação antes da rotura, o que aumenta a dissipação de energia. O 2015, com elevada tenacidade e alguma flexibilidade, contribui para absorver mais energia até à rotura, mesmo em modos de rotura aderente que, no caso do PETG, ocorrem a $P_{máx}$ mais elevadas e com maior alongamento.

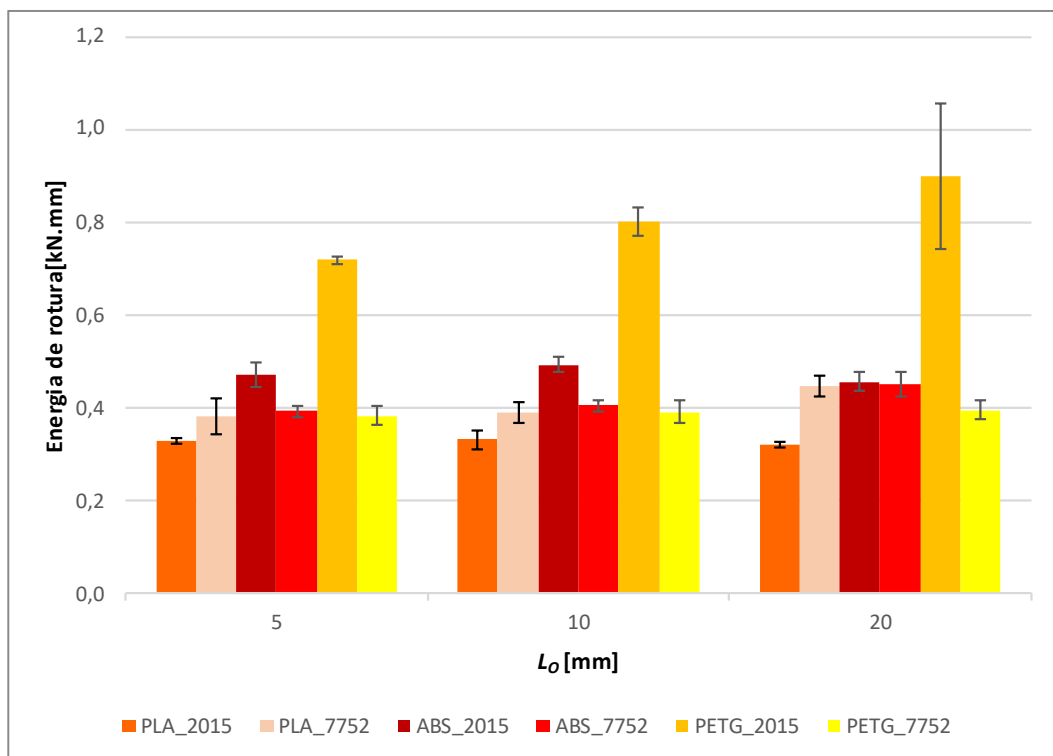


Figura 52 - Valores médios de energia de rotura [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para as juntas *STEP*

Com base na análise realizada, verificou-se que:

- Nas juntas de PLA com 2015, registou-se um aumento de energia de rotura de **0,70%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **3,0%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o 7752, o aumento foi de **2,38%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de **14,79%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de PETG com o adesivo 2015, o aumento de energia de rotura foi de **15,42%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **14,40%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, observou-se um aumento de **2,20%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **0,86%** entre $L_0=10$ e 20 mm;
- Nas juntas de ABS com o adesivo 2015, verificou-se um aumento de **4,42%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um decréscimo de **7,53%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Com o adesivo 7752, o aumento foi de **2,82%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de apenas **11,14%** entre $L_0=10$ e 20 mm;

- Observou-se que as juntas de PETG apresentaram, de forma consistente, os valores mais elevados de energia de rotura, seguidos das juntas de ABS, e por fim, as juntas de PLA. Este comportamento está relacionado com a maior flexibilidade do PETG, que lhe confere uma maior capacidade de δ antes da rotura, permitindo-lhe dissipar mais energia durante o ensaio. Para além disso, as juntas PETG com adesivo 2015 revelaram os valores mais elevados de energia de rotura entre todos os casos analisados, o que se justifica com as propriedades mecânicas do adesivo 2015 (maior capacidade de alongamento), assim como pela flexibilidade intrínseca do PETG, enquanto material aderente. Esta combinação resulta numa junta adesiva mais tolerante à δ , com maior capacidade de absorção de energia, o que favorece significativamente a resistência global da ligação face à rotura.

Tabela 27 - Valores médios de energia de rotura [kJ.mm] em função de L_0 para as juntas STEP

Aderente	Adesivo	2015			7752		
	L_0 [mm]	5,00	10,00	20,00	5,00	10,00	20,00
PLA	Média	0,33	0,33	0,32	0,38	0,39	0,45
	Desvio Padrão	0,01	0,02	0,01	0,04	0,02	0,02
	CoV [%]	2,39	5,74	1,82	10,31	5,44	5,02
PETG	Média	0,78	0,90	1,03	0,38	0,39	0,40
	Desvio Padrão	0,01	0,05	0,19	0,02	0,03	0,02
	CoV [%]	1,85	4,98	18,12	5,29	6,61	4,94
ABS	Média	0,47	0,49	0,46	0,39	0,40	0,45
	Desvio Padrão	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03
	CoV [%]	5,59	3,55	4,29	3,12	3,09	5,95

Através de uma análise aos resultados obtidos para as diferentes juntas analisadas, verifica-se que as juntas SCARF de PLA e adesivo 7752 apresentam os valores mais elevados de absorção de energia, seguidas pelas juntas de PETG e, por fim, de ABS. Verificou-se também que o adesivo 7752, de um modo geral, proporciona uma maior absorção de energia, o que era previsível dado o seu comportamento mais flexível e dúctil, em contraste com o adesivo 2015, que é caracterizado como um adesivo mais rígido e menos dúctil. No entanto, em algumas exceções observou-se o contrário, ou seja, uma maior absorção de energia com o adesivo 2015. Este comportamento pode ser justificado pela forma das curvas P - δ , que revelam uma maior δ . Apesar de a fratura ocorrer de forma abrupta no caso do adesivo 2015, observa-se uma absorção de energia significativa até ao ponto de máxima carga, mesmo com menor ductilidade. Em contraste, o adesivo 7752 apresenta, em alguns casos, uma transição mais gradual após $P_{máx}$, o que favorece uma dissipação adicional de energia. Assim, apesar de o adesivo 2015 ser mais rígido, a sua resposta elástica inicial combinada com uma resistência ao carregamento progressivo favorece a dissipação de energia na junta, contribuindo para uma ligação globalmente mais eficiente.

3.2. Trabalho numérico

Neste subcapítulo, é abordada a vertente numérica deste trabalho, que se pretende replicar os ensaios experimentais e avaliar a eficácia da aplicação de MDC na previsão da resistência de juntas adesivas com aderentes fabricados por impressão 3D. As simulações foram realizadas com o auxílio do *software* Abaqus®, versão 2021. Este programa, baseia-se em MEF e dispõe de uma interface intuitiva que inclui um módulo dedicado à modelação de zonas coesivas com elementos triangulares. Seguidamente, descrevem-se as condições assumidas na modelação numérica, bem como as características do MDC triangular adotado. Posteriormente, apresentam-se os modos de rotura observados nas juntas, assim como a análise da sua resistência, rigidez e capacidade de absorção de energia.

3.2.1. Preparação dos modelos numéricos

A construção dos modelos numéricos no Abaqus® obedeceu a um conjunto de passos lógicos fundamentais para a definição das geometrias, propriedades dos materiais (adesivo e aderentes), malhas, cargas aplicadas para posteriormente analisar o comportamento das juntas, conforme descrito de seguida:

1. Passo *Part*;
2. Passo *Property*;
3. Passo *Assembly*;
4. Passo *Step*;
5. Passo *Load*;
6. Passo *Mesh*;
7. Passo *Job*;
8. Passo *Results*.

O 1º passo (*Part*) corresponde à definição do modelo de peça, do seu comportamento e dos elementos a utilizar. Para os casos de estudo em análise, optou-se pela modelação das juntas com modelos 2D do tipo deformável, modeladas com elementos sólidos, conforme ilustrado na Figura 53. Posteriormente, foram desenhadas as geometrias correspondentes a cada junta adesiva. Optou-se por representar os aderentes e o adesivo como um único corpo contínuo (ver Figura 54), em vez de os modelar separadamente. De seguida, procedeu-se à modelação 2D dos punções, definidos como corpos *Discrete Rigid*. Conforme ilustrado na Figura 55, o punção inferior está representado em a), e o punção superior em b). Esta abordagem permite simplificar o modelo, mantendo, no entanto, a precisão dos resultados obtidos.

As geometrias adotadas na modelação mantêm as dimensões utilizadas nos ensaios experimentais, conforme especificado na Tabela 10. Esta correspondência tem como objetivo assegurar que os resultados da simulação numérica reproduzam, com o maior rigor possível, os dados experimentais.

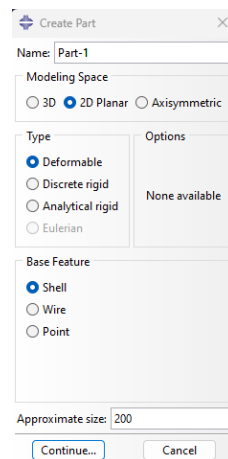


Figura 53 - Definição do tipo de elemento no programa Abaqus®

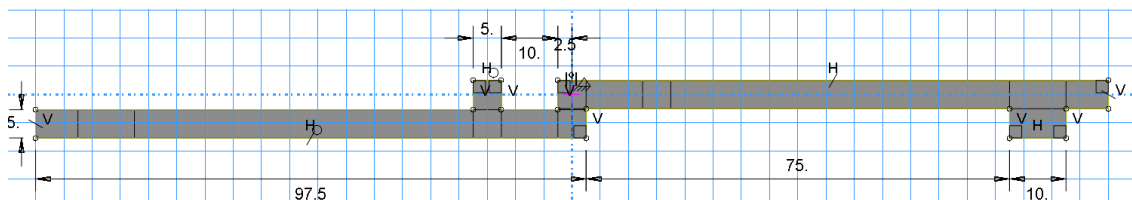


Figura 54 - Desenho 2D do provete com a geometria SLJ e $L_0=5$ mm

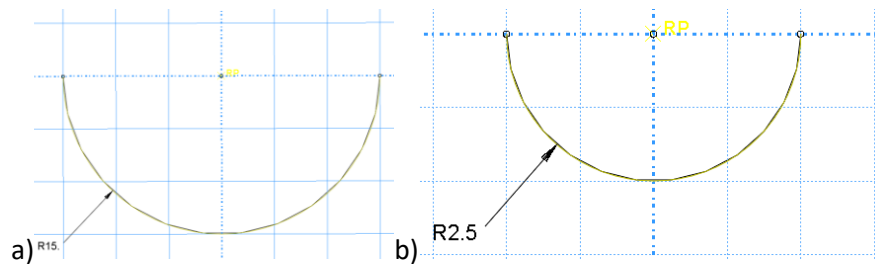


Figura 55 - Desenho 2D dos punções: a) punção inferior; b) punção superior

Com as geometrias definidas, procede-se à sua divisão em partições, uma etapa essencial que permite, numa fase posterior, a atribuição de propriedades e comportamentos distintos a cada região. Desta forma, é possível distinguir claramente o adesivo dos aderentes.

No 2º passo (*Property*), foram atribuídas as propriedades mecânicas a cada partição previamente definida. O adesivo foi representado por elementos coesivos com lei de dano triangular. As propriedades elásticas incluem a definição do módulo de Young e do módulo de corte. Para a iniciação do dano em regime de modo misto, foi adotado o critério “*Quads Damage*”, o qual requer a especificação das tensões máximas admissíveis à tração e ao corte. A rotura em modo misto foi modelada através de um critério energético linear, sendo necessário fornecer os valores de tenacidade à fratura em tração (G_{IC} , em N/mm) e em corte (G_{IIC} , em N/mm).

Relativamente aos aderentes, as suas propriedades foram divididas entre a componente elástica e a plástica. Na fase elástica, considerou-se um comportamento isotrópico, com a definição do módulo de Young e do coeficiente de Poisson. Para efeitos de simplificação da modelação numérica, foi assumido um comportamento perfeitamente plástico após a tensão

Desenvolvimento

de cedência. As propriedades específicas dos aderentes encontram-se resumidas na Tabela 9. Embora modelos mais sofisticados e propriedades adicionais possam proporcionar uma maior aproximação ao comportamento real, os parâmetros adotados revelaram-se adequados para uma boa correspondência com os resultados experimentais, em grande parte graças à modelação de camadas de adesivo por elementos coesivos.

Após a definição das propriedades dos materiais, foram criadas as secções correspondentes ao adesivo e aos aderentes, às quais se associaram os respetivos parâmetros mecânicos. Conforme ilustrado na Figura 56, o adesivo foi tratado como um material coesivo, enquanto os aderentes foram considerados sólidos homogêneos. Nesta fase, foi também definida a largura de cada partição (25,4 mm). Por fim, as secções foram atribuídas às respetivas partições do modelo geométrico, o que garante que cada região do modelo apresente as propriedades mecânicas adequadas. A Figura 57 ilustra este processo, destacando que a partição assinalada a vermelho corresponde à secção do adesivo.

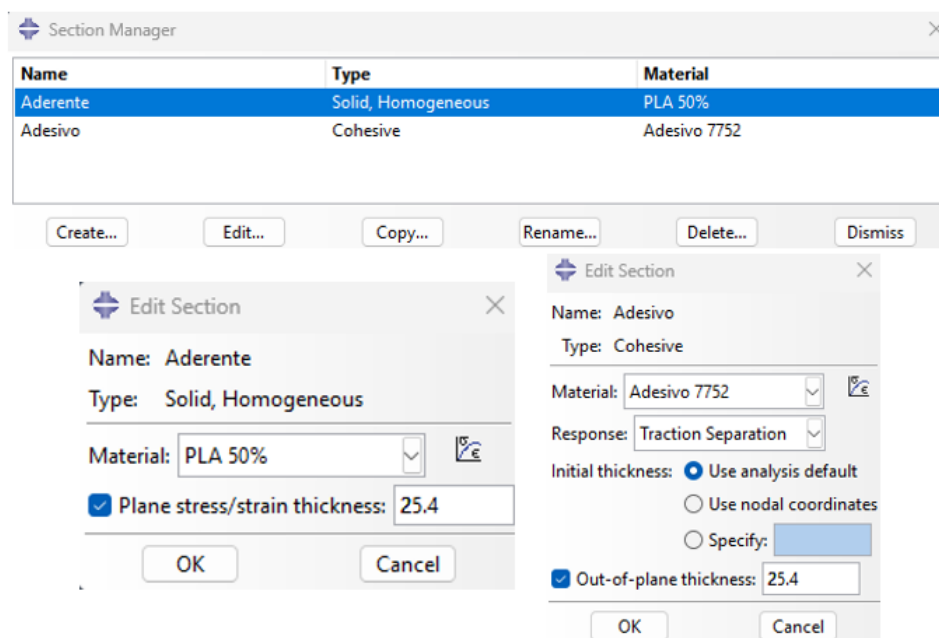


Figura 56 - Propriedades atribuídas no Abaqus®

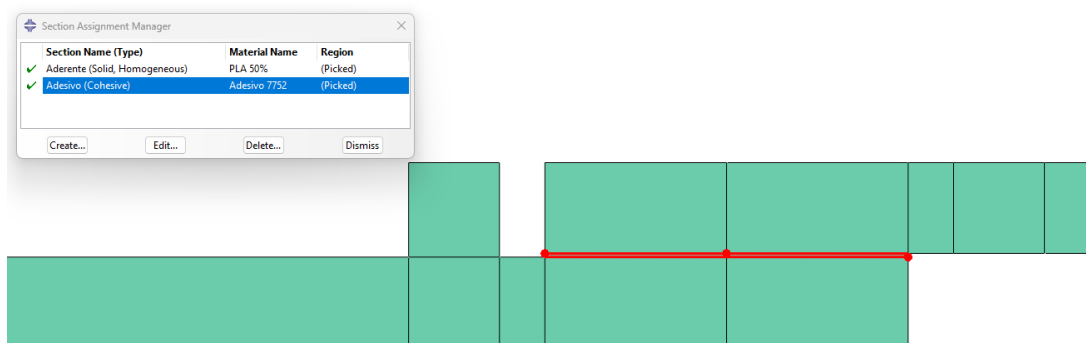


Figura 57 - Secção atribuída como adesivo

No 3º passo (*Assembly*), foi realizada a montagem dos diferentes componentes do modelo. Tanto os punções inferiores como os superiores foram inseridos duas vezes, uma vez que é necessário um punção em cada extremidade inferior da junta adesiva (apoios inferiores), de modo a simular o apoio da mesma, e dois punções no centro da junta, de modo a aplicar as cargas em ambos os lados (punções superiores). No caso dos punções inferiores, após a sua inserção, estes foram rodados e transladados de forma a se posicionarem corretamente relativamente à geometria da junta. Os punções superiores, por sua vez, foram apenas transladados para a posição adequada, uma vez que a sua orientação original já correspondia à configuração pretendida. Esta etapa assegura a correta disposição espacial dos corpos rígidos, permitindo representar fielmente as condições de contorno e carregamento observadas nos ensaios experimentais.

No 4º passo (*Step*), foram definidos os parâmetros computacionais necessários para a execução da simulação numérica. Tendo em conta que a análise experimental realizada corresponde a um ensaio estático, foi selecionado, neste módulo, o tipo de análise "*Static, General*". Adicionalmente, foram configurados o número de incrementos e o tamanho inicial dos mesmos. Conforme ilustrado na Figura 58, optou-se por um valor elevado para o número máximo de incrementos, com o objetivo de evitar a interrupção prematura da simulação devido à ultrapassagem do limite máximo permitido. Definiu-se também um tamanho inicial e máximo de incremento de 0,01, correspondente a 1% da carga total do passo, o que garante um controlo rigoroso da evolução da análise, enquanto o valor mínimo foi fixado em $1e^{-20}$, o que permite que o Abaqus® reduza o incremento a níveis extremamente pequenos em casos de elevada dificuldade de convergência, o que evita a interrupção prematura do cálculo. Por fim, foram definidos os *sets* correspondentes aos deslocamentos e às forças de reação, o que permite a extração das curvas $P-\delta$, com o suporte dos parâmetros de *output* selecionados, nomeadamente *SDEG* (degradação do adesivo) e *STATUS* (estado do elemento). O parâmetro *SDEG* representa o grau de degradação do adesivo, variando entre 0 e 1, onde 0 corresponde a um elemento intacto e 1 indica que o dano no elemento está totalmente desenvolvido, ou seja, o adesivo perdeu completamente a sua capacidade de resistência. Por sua vez, o parâmetro *STATUS* indica o estado atual de cada elemento, assumindo o valor 0 quando o elemento está ativo e funcional, e o valor 1 quando se encontra rompido ou inativo. Este parâmetro é utilizado não apenas para controlar a representação gráfica dos elementos no software Abaqus®, permitindo a sua remoção visual assim que perdem a capacidade resistente, mas também para definir o comportamento numérico do modelo, uma vez que os elementos com *STATUS* = 1 deixam de contribuir para o cálculo do equilíbrio interno e da rigidez global da estrutura. Desta forma, o parâmetro *STATUS* permite acompanhar tanto a evolução física da rotura como a progressão numérica do dano ao longo do carregamento, facilitando a interpretação e validação dos resultados.

Desenvolvimento

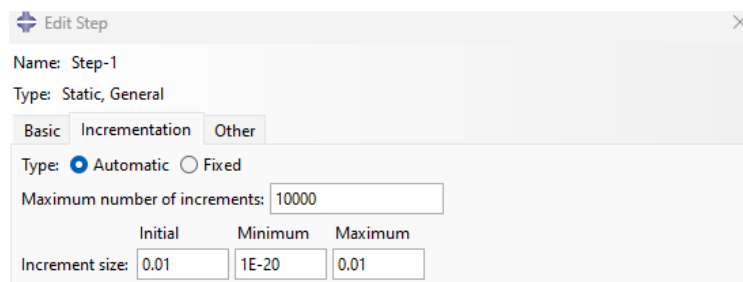


Figura 58 - Definição dos incrementos no Abaqus®

No 5º passo (*Load*), foram definidas as condições fronteira do modelo numérico (Figura 59) com o objetivo de reproduzir, de forma fiel, as restrições de movimento aplicadas nos ensaios experimentais previamente realizados. As restrições impostas ao modelo consistem em:

- Encastramento dos punções de suporte que contactam com a face inferior do provete;
- Aplicação de um deslocamento vertical com restrição dos graus de liberdade horizontal e rotação nos punções superiores em contacto com o modelo;
- Restrição ao deslocamento horizontal do provete, aplicada num ponto do aderente inferior em posição intermedia no comportamento do provete.

Esta configuração assegura a representação precisa do comportamento experimental, o que garante a coerência entre o modelo numérico e os dados obtidos em laboratório.

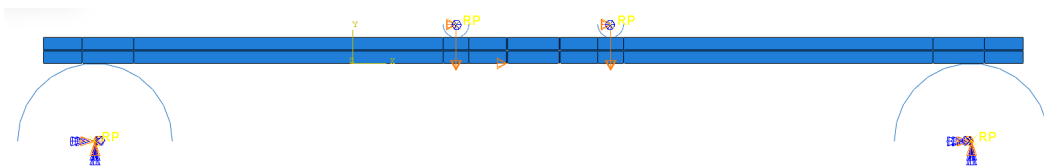


Figura 59 - Condições fronteira aplicadas

No 6º passo (*mesh*), foram geradas e refinadas as malhas associadas às partições definidas nas etapas anteriores (Figura 60). A malha aplicada às regiões correspondentes ao adesivo foi do tipo *sweep*, enquanto nas zonas do aderente utilizou-se uma malha do tipo *structured*, com partições organizadas em direções vertical e horizontal. É importante destacar que as extremidades da zona de ligação correspondem às zonas de maior concentração de tensões. Por este mesmo motivo, nestas áreas foi aplicado um refinamento mais rigoroso da malha, ao contrário do que ocorre na zona central da junta e nas demais regiões do provete, onde as tensões são menos intensas e, conseqüentemente, a malha é menos densa. Na zona de contacto entre os punções e a junta, foi definida uma malha estruturada mais refinada, composta por um total de 100 elementos, de forma a garantir uma discretização adequada numa região crítica. Esta zona apresenta uma elevada concentração de tensões, resultante do esmagamento localizado da junta pelos punções, pelo que se torna, essencial garantir uma malha mais densa para assegurar a precisão na previsão do comportamento mecânico local e a correta representação das interações de contacto.

No 7º passo (*job*), foram definidos os recursos computacionais alocados à simulação, incluindo o nome do *job*, o número de CPUs utilizadas e os parâmetros de execução. Concluída esta configuração, deu-se início à execução da simulação.

No 8º passo (*results*), após a conclusão da simulação, procedeu-se ao tratamento dos dados com vista à obtenção das curvas $P-\delta$. Para tal, foi somado o valor das reações verticais nos punções de suporte, responsáveis pelo apoio do provete, e extraído os valores de deslocamento vertical no RP de um dos punções superiores. Com base nestes dados, foram geradas as curvas $P-\delta$, que foram posteriormente exportadas para o Excel® para uma análise mais detalhada. Este procedimento permitiu avaliar o comportamento mecânico das juntas adesivas simuladas, em comparação com os resultados experimentais.

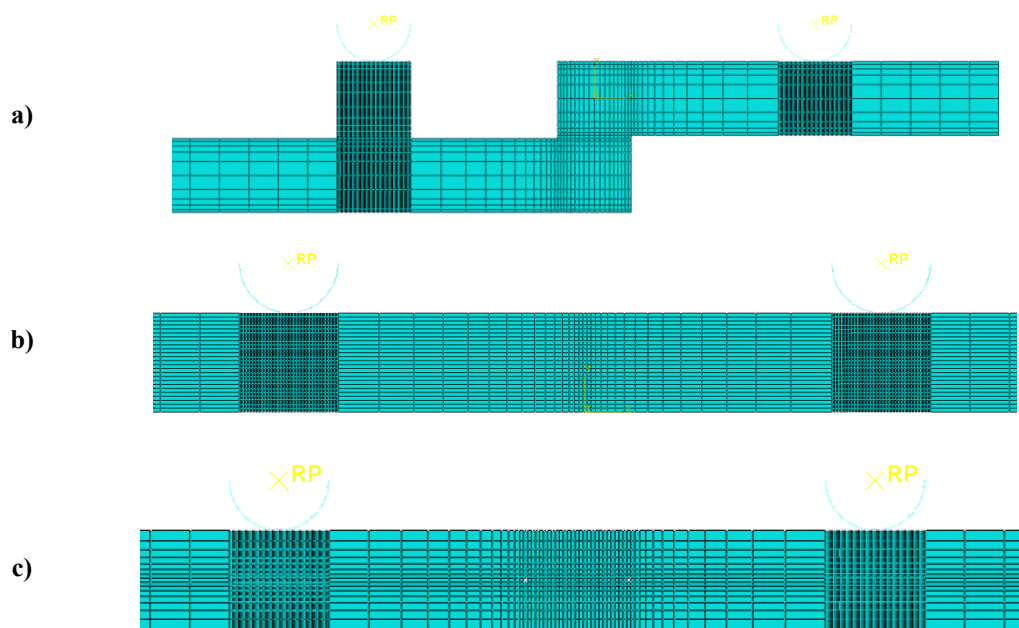


Figura 60 - Malhas aplicadas para geometria a) *SLJ*, b) *SCARF* e c) *STEP* com L_0 de 5 mm

3.2.2. Modelo coesivo triangular

Com a possibilidade de se adotarem diferentes leis coesivas, a lei triangular foi selecionada neste trabalho, destacando-se pela sua simplicidade, dado o reduzido número de parâmetros necessários, e pela sua capacidade de fornecer resultados precisos em grande parte das situações [129]. Este tipo de modelo pode ser formulado em duas ou três dimensões (2D ou 3D). Na abordagem bidimensional (modelação utilizada), ilustrada na Figura 61, podem ser analisados dois cenários principais: o modo puro e o modo misto. O modo puro corresponde a uma condição de carregamento exclusivamente em tração (modo I) ou corte (modo II). Sendo a propagação do dano descrita pela lei coesiva, o dano inicia quando a tensão correspondente atinge o valor crítico, seguido de uma redução gradual da rigidez até rotura total. A energia de fratura está associada à área sob a curva $P-\delta$ relativo para cada modo [130]. Neste caso, a iniciação e a evolução da fratura são determinadas por modelos que podem integrar critérios baseados em tensão para a iniciação e em energia de fratura para a propagação [131].

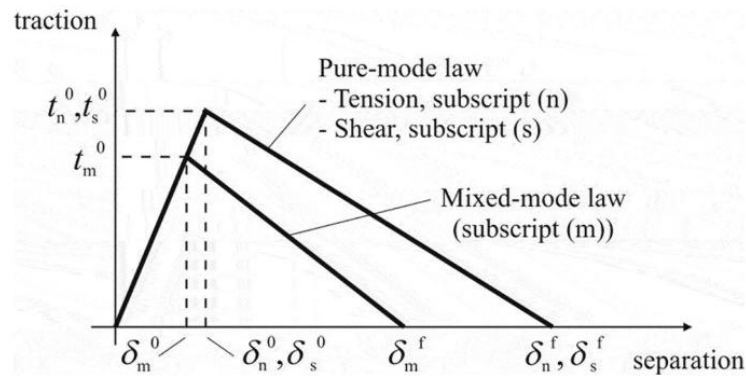


Figura 61 - Modelo coesivo triangular [131]

Nas simulações de juntas adesivas com camadas finas entre aderentes rígidos, a resposta mecânica dos elementos coesivos é governada por uma matriz constitutiva de rigidez, designada por K_{COH} , que estabelece a relação entre as tensões coesivas e as respetivas deformações antes da iniciação do dano. Esta matriz depende da formulação adotada e assume particular importância na representação do comportamento do adesivo.

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = K_{COH} * \varepsilon \quad (10)$$

Numa formulação contínua, utilizada para camadas adesivas de pequena espessura, é possível obter uma boa aproximação dos parâmetros de rigidez através das seguintes definições [132]:

$$K_{nn} = E \quad (11)$$

$$K_{ss} = G \quad (12)$$

$$K_{ns} = 0 \quad (13)$$

Quando se assume estes valores, o modelo coesivo consegue simular de forma realista a deformação da camada adesiva [132]. Por outro lado, quando se recorre a uma formulação local, adequada para representar fraturas com espessura nula, os coeficientes da matriz de rigidez são definidos com valores muito elevados. Esta abordagem visa eliminar deformações artificiais que poderiam ser introduzidas pelos elementos coesivos [133]. Os elementos coesivos estão sujeitos a componentes de tração normal e de corte tangencial, representadas por t_n e t_s , respetivamente. As deformações associadas são ε_n e ε_s , e resultam da cinemática do elemento. Em muitos casos, pode-se desprezar a contribuição das tensões de membrana, sobretudo quando o adesivo é muito fino e os aderentes apresentam elevada rigidez. A iniciação de dano nos elementos coesivos, em modo misto, pode ser descrita através de diferentes critérios. Um dos mais utilizados é o critério quadrático de tensões, expresso por:

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (14)$$

Neste critério, os parênteses de Macaulay $\langle \rangle$ indicam que apenas tensões de tração contribuem para o dano, sendo as tensões de compressão ignoradas. Quando esta condição é satisfeita, ou seja, quando se atinge a resistência coesiva equivalente em modo misto (t_{mo}), inicia-se o processo de degradação da rigidez, conhecido como amaciamento. A rotura completa entre os nós homólogos é governada por um critério energético linear, que depende da energia de fratura associada aos modos I (tração) e II (corte). Este critério é dado por:

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1 \quad (15)$$

Esta expressão estabelece a condição de rotura total com base na dissipação energética acumulada nos dois modos de rotura.

3.2.3. Determinação dos parâmetros coesivos

A determinação experimental dos parâmetros coesivos é um passo fundamental para representar com maior precisão o processo de rotura de uma ligação adesiva. Após a sua calibração, é necessária a validação dos resultados obtidos. Entre os parâmetros mais relevantes estudados na literatura encontram-se t_n^0 , t_s^0 , tenacidade de fratura à tração (G_{IC}) e tenacidade de fratura ao corte (G_{IIC}). Contudo, como referido por Lee et al. [134], a determinação de alguns destes valores, nomeadamente t_n^0 e t_s^0 , não segue ainda procedimentos padronizados, originando a aplicação de diferentes métodos de análise de dados. As principais abordagens utilizadas podem ser resumidas da seguinte forma:

- **Método de definição individual de parâmetros** - consiste na determinação isolada de cada parâmetro das leis coesivas através de ensaios experimentais adequados. Apesar de ser conceptualmente simples, este método apresenta limitações, dado que os valores obtidos em ensaios de adesivo maciço podem diferir dos registados em juntas adesivas. Tal discrepância resulta, em grande medida, do efeito do modo misto de propagação de fissuras e das restrições às deformações impostas pela reduzida espessura da camada adesiva entre os aderentes [135];
- **Método direto** - procura identificar a forma exata das leis coesivas a partir dos resultados de ensaios de fratura, recorrendo à diferenciação das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$, em que δ_n corresponde ao deslocamento à tração e δ_s ao de corte [135]. Neste contexto, os parâmetros G_{IC} e G_{IIC} , assumem particular relevância, uma vez que têm um impacto significativo na resposta global da ligação adesiva. Para a sua determinação, são preferidos os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE), embora a sua aplicação seja adequada apenas a adesivos de baixa ductilidade;
- **Método indireto** - assenta num processo iterativo de comparação entre previsões numéricas e resultados experimentais, ajustando-se os parâmetros até se obter uma concordância satisfatória. Este procedimento permite obter leis coesivas simplificadas adaptadas a condições específicas de estudo [22].

Independentemente da metodologia escolhida, os ensaios mais utilizados para determinar G_{IC} e G_{IIC} são, respetivamente, o **Double Cantilever Beam (DCB)** e o **End-Notched Flexure (ENF)**.

O ensaio DCB, descrito na norma ASTM D3433-99 [136], baseia-se num provete constituído por dois aderentes ligados por uma fina camada de adesivo, com uma fenda inicial introduzida numa extremidade. Esta configuração apresenta uma geometria simples e um fabrico acessível. No entanto, a obtenção de G_{IC} pode ser dificultada pela ocorrência de propagação instável da fenda, que compromete a medição rigorosa do seu comprimento [137]. Entre os métodos disponíveis para o cálculo deste parâmetro encontram-se os baseados na teoria de vigas, no comprimento equivalente e no integral-J [138]. Rice [139] desenvolveu uma formulação, obtida a partir do integral-J, que permite calcular G_{IC} em provetes DCB e estabelecer a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda [140].

O ensaio ENF consiste numa junta simplesmente apoiada nas extremidades, com uma pré-rotura de comprimento a_0 numa das extremidades, sendo a carga P aplicada a meio vão. Esta configuração promove a propagação da fissura sem separação visível entre os aderentes. Para assegurar a estabilidade da junta, a_0 deve ser, no mínimo, 70% do comprimento total L [141]. Tal como no ensaio DCB, a determinação de G_{IIC} exige a medição contínua do comprimento de fenda (a), tarefa dificultada pelo facto de não ocorrer abertura entre as faces, o que complica a observação direta.

3.2.3.1. Araldite® 2015

A caracterização do adesivo foi realizada através dos ensaios DCB e ENF, com o objetivo de determinar os valores de G_{IC} e G_{IIC} , através de métodos e teorias adequadas a cada caso [142]. Os resultados obtidos serviram de base para a definição de uma lei coesiva em modo puro, ajustada ao comportamento do material em estudo. Numa fase inicial, os valores de t_n^0 e t_s^0 foram estimados de forma aproximada, com base nas propriedades mecânicas conhecidas do adesivo. Posteriormente, a lei coesiva foi implementada no modelo numérico para os modelos DCB (tração) e ENF (corte), sem alterações nas dimensões utilizadas nos ensaios experimentais. Após isto, o refinamento dos valores de t_n^0 e t_s^0 realizou-se através de um procedimento de ajuste entre as curvas P - δ obtidas numericamente e as registadas experimentalmente. Este processo visou garantir que a lei coesiva final reproduzisse com elevada fidelidade o comportamento observado da camada de adesivo.

3.2.3.2. Sikaforce® 7752

À semelhança do adesivo 2015, os parâmetros coesivos do adesivo 7752 foram determinados utilizando uma abordagem semelhante. Para a caracterização da lei coesiva ao corte, recorreu-se a um método inverso e com uma metodologia comparável. A obtenção do valor de G_{IIC} foi realizada através de ensaios de fratura do tipo ENF, complementados com um processo de ajuste manual com o objetivo de estimar o valor de t_s^0 . Os dados considerados neste estudo correspondem às médias obtidas na investigação de Azevedo et al. [143], cujos resultados evidenciaram baixa dispersão entre provetes. O valor de G_{IC} foi calculado com base na média

dos resultados obtidos em múltiplos ensaios de fratura do tipo DCB. Quanto ao valor de t_n^0 , este foi estimado a partir da resistência média à tração de provetes maciços do adesivo.

A Tabela 28 apresenta a síntese dos parâmetros coesivos adotados para a simulações das camadas adesivas de adesivo 2015 e 7752.

Tabela 28 - Parâmetros coesivos utilizados para a simulação os adesivas 2015 e 7752 [127, 144]

Propriedades	2015	7752
Módulo de Young à tração, E [MPa]	1850	493,81
Módulo ao Corte, G [MPa]	560	187,75
Tensão coesiva à tração, t_n^0 [MPa]	21,63	11,48
Tensão coesiva ao corte, t_s^0 [MPa]	17,90	10,17
Tenacidade fratura à tração, G_{IC} [N/mm]	0,43	2,36
Tenacidade fratura ao corte, G_{IIC} [N/mm]	4,7	5,41

3.2.4. Resultados

Neste capítulo pretende-se abordar os resultados obtidos das simulações numéricas realizadas à flexão no *software* Abaqus® realizados nas juntas adesivas com aderente impressos.

3.2.4.1. Modos de rotura

Neste subcapítulo apresenta-se, para cada geometria, a análise da propagação do dano nas juntas até à ocorrência da rotura, bem como a comparação dos modos de rotura entre os resultados experimentais e numéricos. Através da utilização do *software* Abaqus®, foi possível acompanhar a evolução do dano tanto no adesivo como no aderente, o que permitiu identificar e caracterizar os principais modos de rotura, nomeadamente a rotura coesiva no adesivo e a rotura no próprio aderente. No final de cada subcapítulo relativo a cada geometria é apresentada uma tabela de síntese com os modos de rotura obtidos experimentalmente e numericamente. Nas colunas identificadas como “**Exp**” são indicados os modos de rotura registados nos ensaios experimentais, enquanto nas colunas “**Num**” estão representados os modos de rotura previstos pelas simulações numéricas. Esta organização permite a análise direta da correspondência entre os resultados experimentais e os obtidos por modelação numérica, o que facilita a identificação de concordâncias ou divergências no comportamento.

Geometria *SLJ*

Na Figura 62, é possível observar o desenvolvimento das tensões equivalentes de Von Mises ao longo da camada adesiva das juntas *SLJ* com aderente em PLA, adesivo 2015 e $L_0=20$ mm. Logo no início do carregamento (Figura 62 a), surgem zonas localizadas de concentração de tensões nas extremidades da camada adesiva. À medida que o carregamento aumenta (Figura 62 b), as zonas críticas intensificam-se e expandem-se para o interior da junta. Com a progressão do dano, a propagação das concentrações de tensão torna-se mais evidente, identificando a região crítica responsável pelo início do processo de rotura (Figura 62 c).

Desenvolvimento

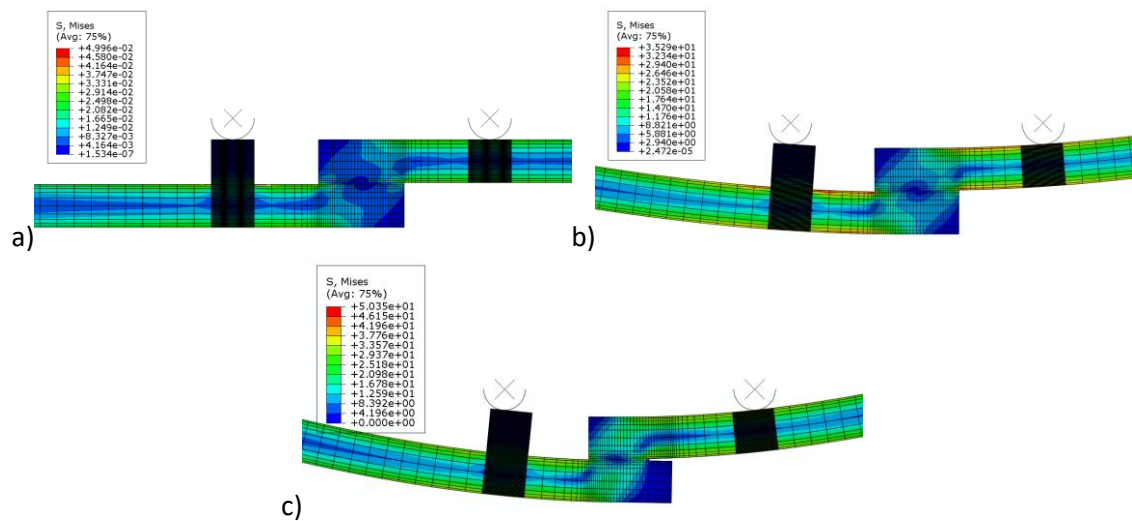


Figura 62 - Modo de propagação de tensões nas juntas *SLJ*: a) Início do carregamento; b) Intensificação e propagação das tensões; c) Início do processo de rotura

Na Figura 63 encontra-se representada a propagação do dano no adesivo das juntas *SLJ* com aderente em PLA, adesivo 2015 e $L_o=20$ mm. Inicialmente, não se registam danos significativos (Figura 63 a). Com a evolução do carregamento (Figura 63 b), ocorre o início da degradação do adesivo nas extremidades da junta, coincidente com as zonas de maior concentração de tensões. Por fim (Figura 63 c), o dano propaga-se em direção ao centro da junta adesiva, conduzindo à rotura final da ligação. Este comportamento confirma a elevada influência das extremidades da camada adesiva no processo de rotura, pois nestes pontos tende a ocorrer a iniciação da rotura [145]. No entanto, ao aumentar o L_o , observa-se uma tendência para o aumento da resistência. Este comportamento resulta do acréscimo da área de ligação efetiva, o que permite uma maior transferência de carga entre os aderentes antes da rotura. Este efeito é particularmente evidente em adesivos com comportamento mais dúctil, nos quais o aumento de L_o contribui para uma maior capacidade de carga final da junta.

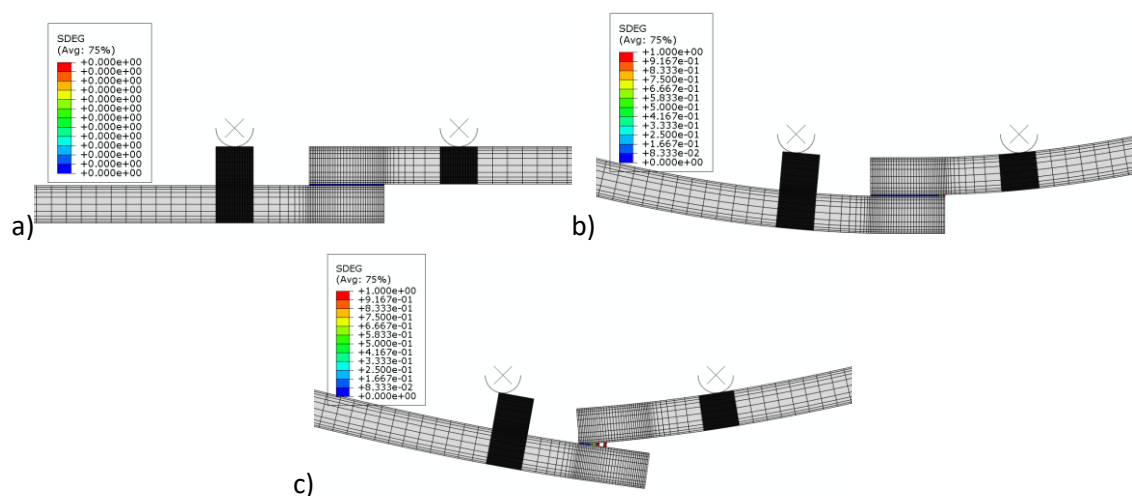


Figura 63 - Modo de propagação de dano no adesivo em juntas *SLJ*: a) Sem carregamento; b) Carregamento e propagação das tensões; c) Processo de rotura

A Tabela 29 apresenta os modos de rotura obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas *SLJ*, considerando os diferentes materiais de aderente, adesivos e L_0 .

Para as juntas em PLA, observa-se que tanto nos ensaios experimentais como nas simulações numéricas a rotura ocorre sempre de forma coesiva no adesivo, independentemente do valor de L_0 , no caso do adesivo 2015. Já com o adesivo 7752, a correspondência entre resultados mantém-se para $L_0=5$ e 10 mm, sendo que para $L_0=20$ mm se verifica numericamente uma rotura no aderente, enquanto experimentalmente a rotura permanece coesiva. No caso das juntas com PETG, os modos de rotura diferem consoante o adesivo utilizado. Com o adesivo 2015, a rotura é coesiva para $L_0=5$ mm, mas transita para rotura no aderente a partir de $L_0=10$ mm, tanto nos resultados experimentais como nos numéricos. Já com o adesivo 7752, observa-se uma correspondência até $L_0=10$ mm, que transita depois para rotura no aderente em $L_0=20$ mm, em ambos os casos. Relativamente às juntas em ABS, verifica-se que com o adesivo 2015 ocorre rotura coesiva para $L_0=5$ e 10 mm, mas em $L_0=20$ mm a rotura dá-se no aderente, coincidindo entre os dois métodos de análise. Para o adesivo 7752, a transição para rotura no aderente ocorre já em $L_0=10$ mm, o que mantém para $L_0=20$ mm, apresentando boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

De forma geral, a comparação entre os resultados mostra consistência entre o modelo numérico e os ensaios experimentais, sendo as principais divergências observadas para o adesivo 7752 em PLA, no qual a simulação prevê a ocorrência de rotura no aderente para $L_0=20$ mm, enquanto experimentalmente se manteve coesiva. A transição da rotura coesiva para o aderente ocorre quando a resistência do adesivo ultrapassa a resistência mecânica do aderente, fazendo com que a rotura ocorra fora da zona de sobreposição. Este fenómeno indica que a adesão foi eficaz ao ponto de transferir totalmente os esforços para o substrato, cuja capacidade estrutural pode ser limitada. Fatores como orientação das camadas, porosidade e qualidade da ligação entre filamentos podem comprometer a integridade do material.

Tabela 29 - Modos de rotura experimental vs. numérico das juntas *SLJ*

Materiais		L_0					
		5		10		20	
		Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num
PLA	2015	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva
	7752	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente
PETG	2015	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
	7752	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
ABS	2015	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
	7752	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente

Geometria SCARF

Na Figura 64 estão representadas as tensões equivalentes de Von Mises nas juntas *SCARF*, mais concretamente na junta de PLA com o adesivo 2015 e $L_0=10$ mm. Na subfigura a) observa-se a fase inicial da aplicação de carga. Em b) verifica-se que as tensões começam a concentrar-se na extremidade do chanfro e a propagação destas tensões ao longo da camada adesiva, com maior

Desenvolvimento

intensidade junto à linha de sobreposição. Já em c), as tensões atingem níveis mais elevados, estendendo-se para o interior do aderente, o que confirma que a geometria *SCARF* favorece uma distribuição gradual das sollicitações ao longo do comprimento de ligação.

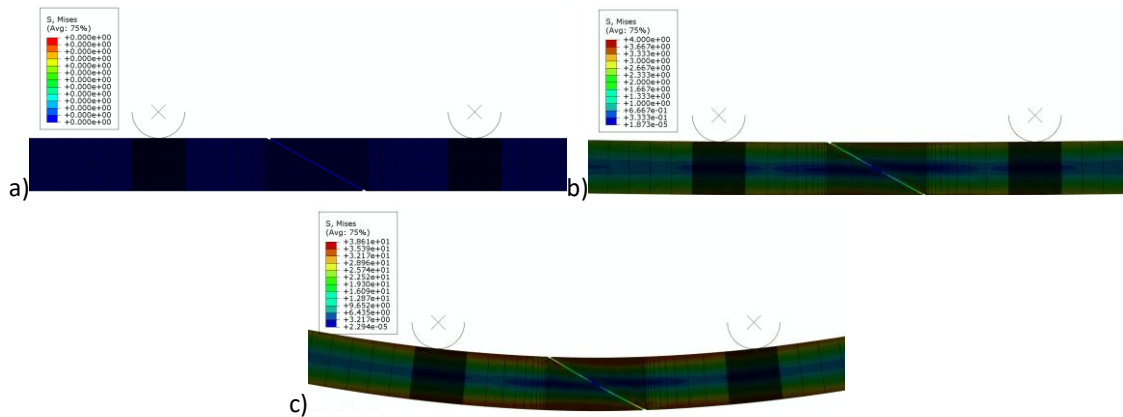


Figura 64 - Modo de propagação de tensões nas juntas *SCARF*: a) Fase anterior ao carregamento; b) Início do carregamento; c) Intensificação e propagação das tensões

A Figura 65 mostra a evolução do dano no adesivo na junta de PLA com o adesivo 2015 e $L_0=10$ mm. Na subfigura a) o dano inicia-se na extremidade da camada adesiva, ao longo da zona de maior concentração de tensões. Em b) a área danificada propaga-se ao longo do plano inclinado da junta, mantendo-se no adesivo. Finalmente, em c) observa-se a progressão do dano em direção ao interior do aderente, o que evidencia a possibilidade de rotura controlada pelo substrato, sobretudo para L_0 mais elevados.

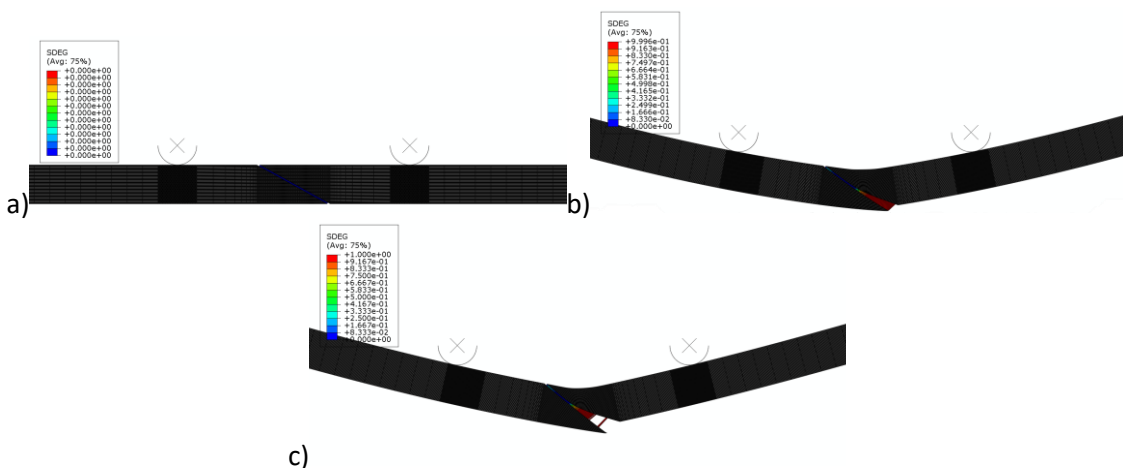


Figura 65 - Modo de propagação de dano no adesivo em juntas *SCARF* a) Fase anterior ao carregamento; b) Carregamento e propagação das tensões; c) Processo de rotura

A Tabela 30 apresenta a comparação entre os modos de rotura obtidos experimentalmente e por simulação numérica. Nas juntas de PLA, a rotura é coesiva para $L_0=5$ mm, mas altera para o aderente para $L_0=10$ e 20 mm, em ambos os adesivos. Já nas juntas de PETG revela-se a mesma tendência, com rotura coesiva apenas para $L_0=5$ mm e rotura no aderente para L_0 superiores. Nas juntas de ABS, tanto experimental como numericamente, os resultados são consistentes, na medida em que ocorre rotura coesiva apenas para $L_0=5$ mm, alterando-se depois para rotura no aderente.

De forma geral, os resultados demonstram que a geometria *SCARF* reduz significativamente as roturas no adesivo, promovendo principalmente roturas no aderente à medida que o L_o aumenta. Este comportamento confirma que a distribuição mais uniforme de tensões, transfere progressivamente as solicitações para o substrato, o que torna a sua resistência o fator determinante no modo de rotura.

Tabela 30 - Modos de rotura experimental vs. numérico das juntas *SCARF*

Materiais		L_o					
		5		10		20	
		Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num
PLA	2015	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente
	7752	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
PETG	2015	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
	7752	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
ABS	2015	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
	7752	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente

Geometria *STEP*

A Figura 66 mostra as tensões equivalentes de Von Mises nas juntas do tipo *STEP* com PLA, adesivo 2015 e $L_o=10$ mm. Inicialmente, não se registam danos significativos (Figura 66 a). Posteriormente, na Figura 66 b) observa-se que a distribuição de tensões não é uniforme ao longo da camada adesiva, registando-se concentrações significativas na zona do degrau (Figura 66 c). Esta acumulação de tensões favorece a iniciação do processo de dano nestas regiões críticas, influenciando diretamente o desempenho da junta.

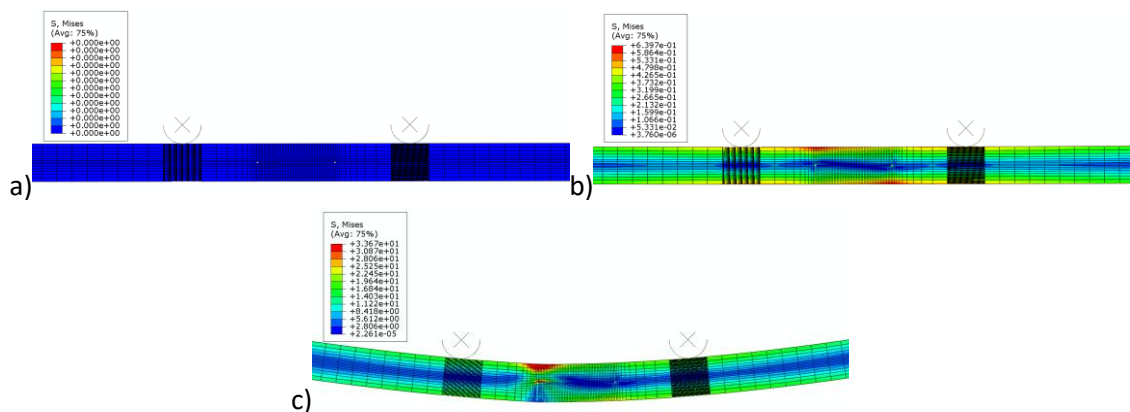


Figura 66 - Modo de propagação de tensões nas juntas *STEP*: a) Fase anterior ao carregamento; b) Início do carregamento; c) Intensificação e propagação das tensões

A análise da Figura 67 evidencia a evolução do dano no adesivo da junta *STEP*, com PLA, adesivo 2015 e $L_o=10$ mm. Inicialmente (Figura 67 a), o adesivo encontra-se intacto ($SDEG \approx 0$) e as tensões estão uniformemente distribuídas, sem indicações de rotura. Com o aumento da carga (Figura 67 b), surgem concentrações de tensão nas extremidades da camada adesiva, regiões mais suscetíveis, o que se reflete em aumento do dano ($SDEG > 0$) e indica os pontos críticos de rotura futura. Na etapa seguinte (Figura 67 c), o dano propaga-se em direção ao centro da junta,

Desenvolvimento

culminando na rotura completa do adesivo, com SDEG em 1, evidenciando a perda total de integridade estrutural. Esta sequência confirma a relevância da geometria da camada adesiva e da distribuição de tensões para a resistência final da ligação.

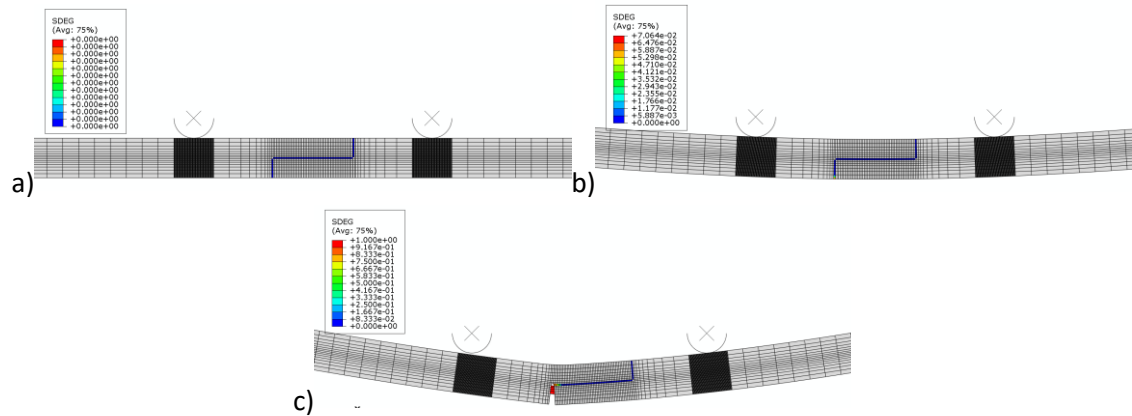


Figura 67 - Modo de propagação de dano no adesivo em juntas *STEP*: a) Fase anterior ao carregamento; b) Carregamento e propagação das tensões; c) Processo de rotura

A Tabela 31 resume a comparação entre os modos de rotura obtidos experimentalmente e os previstos numericamente para as juntas *STEP*. No caso do PLA com o adesivo 2015, a rotura apresenta-se de forma consistente pelo aderente em todos os L_o , tanto no estudo experimental como no numérico. Já com o adesivo 7752, as roturas para $L_o=5$ e 10 mm apresentam o mesmo modo de rotura, coesiva adesiva, porém verifica-se um comportamento distinto para $L_o=20$ mm, a rotura experimental surge como adesiva, enquanto o modelo numérico indica rotura aderente. Na junta de PETG, os resultados mostram roturas aderentes em todas as configurações analisadas, independentemente do adesivo e do L_o . Por fim, no ABS, tanto para o adesivo 2015 como para o 7752, os modos de rotura revelam uma elevada consistência entre os resultados experimentais e numéricos, com rotura aderente em todos os cenários. De forma geral, conclui-se que as juntas *STEP* tendem a apresentar maior incidência de roturas aderentes, em comparação com as *SCARF*. Estas roturas pelo aderente podem estar associadas à fragilização que a geometria *STEP* impõe nos aderentes com a redução de espessura a metade na zona sobreposição. As discrepâncias verificadas para o PLA com o adesivo 7752 podem estar associadas a imperfeições na preparação das juntas ou à maior sensibilidade destas configurações a defeitos locais.

Tabela 31 - Modos de rotura experimental vs. numérico das juntas *STEP*

Materiais		L_o					
		5		10		20	
		Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num
PLA	2015	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
	7752	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente
PETG	2015	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
	7752	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
ABS	2015	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
	7752	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente

3.2.4.2. Curvas $P-\delta$

Neste subcapítulo são apresentadas, para as diferentes geometrias, aderentes, adesivos e L_0 , as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente através de MDC. A posterior análise destas curvas permite avaliar a evolução do valor máximo de $P_{m\acute{a}x}$ em função do aumento de L_0 .

Na Figura 68 a) e b), encontram-se representadas as curvas $P-\delta$ das juntas SLJ com aderentes em PLA e adesivos 2015 e 7752 com diferentes L_0 . Observa-se, em ambos os adesivos, que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ aumenta significativamente com o incremento de L_0 . Para o adesivo 2015, encontra-se representado um aumento de **119,57%** entre o $L_0=5$ e 10 mm e de **18,92%** entre $L_0=10$ e 20 mm. O mesmo comportamento verifica-se para o adesivo 7752 um aumento de **161,17%** entre $L_0=5$ e 10 mm e de **6,39%** entre $L_0=10$ e 20 mm.

No que respeita ao δ de rotura, também se verifica um aumento progressivo com L_0 , ou seja, juntas com maiores L_0 suportam maiores δ antes da rotura. Na junta de aderente PLA com adesivo 7752 e $L_0=20$ mm, observa-se um aumento $P_{m\acute{a}x}$, mas também um aumento na rigidez da ligação e nas tensões localizadas nas extremidades da camada adesiva, que podem provocar uma rotura súbita no aderente, o que origina um δ inferior quando comparado a $L_0=10$ mm. Este comportamento pode ainda ser atribuído à combinação das propriedades do adesivo e do aderente, uma vez que a elevada rigidez do adesivo 7752, conjugada com a menor ductilidade do PLA, permite à junta resistir a cargas mais elevadas, mas compromete a sua capacidade de acomodar deformações, o que origina um deslocamento à rotura mais reduzido.

De forma geral, conclui-se que o aumento de L_0 conduz a uma maior resistência e a uma maior capacidade de deformação das juntas, e que o adesivo 7752 apresenta desempenho ligeiramente superior ao 2015, sobretudo para L_0 superiores, confirmando a sua maior eficiência na transferência de carga em juntas com PLA.

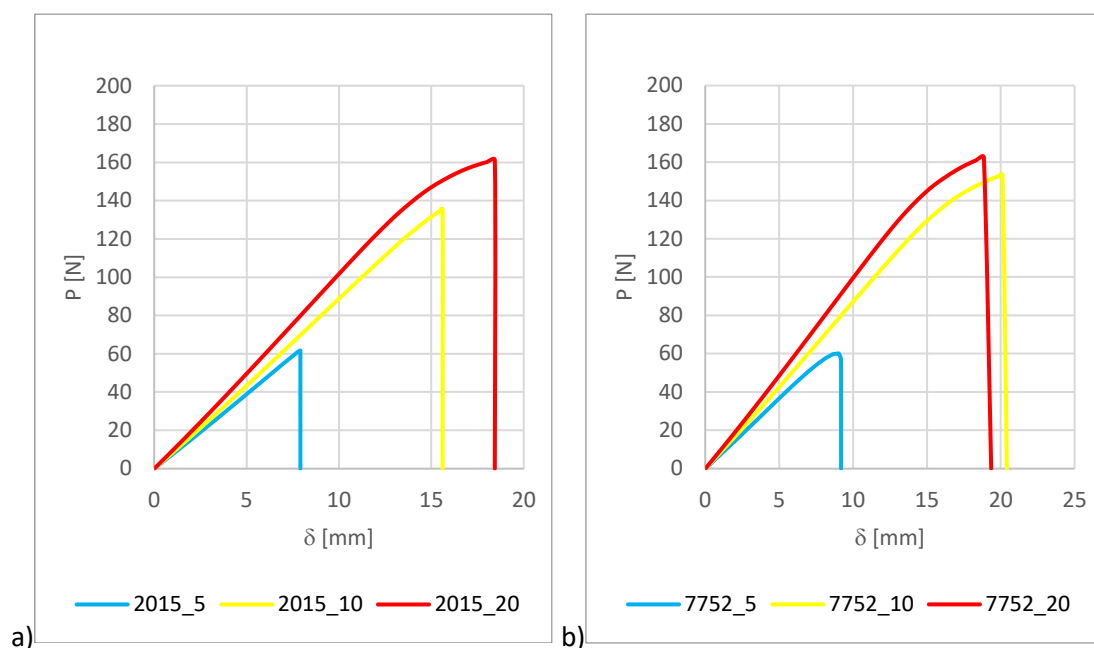


Figura 68 - Curvas $P-\delta$ numéricas das juntas SLJ com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752

Desenvolvimento

Na Figura 69 a) e b) apresentam-se as curvas P - δ das juntas SLJ com aderentes em PETG, com os adesivos 2015 e 7752, para diferentes L_0 . Em ambos os casos, verifica-se um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 . Para o adesivo 2015, observa-se uma varia\c{c}\~ao de aproximadamente **59,45%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de cerca de **7,61%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Por\~em no adesivo 7752, o crescimento relativo de $P_{m\acute{a}x}$ \c{e} de **50,75%** entre $L_0=5$ e 10 mm, e de **3,75%** entre $L_0=10$ e 20 mm.

Relativamente ao δ de rotura, nota-se uma tend\~encia crescente com o aumento de L_0 tal como para $P_{m\acute{a}x}$, o que traduz uma maior capacidade de deforma\c{c}\~ao antes da rotura. No entanto, verifica-se que, para $L_0=20$ mm, apesar do aumento do valor de $P_{m\acute{a}x}$, o δ \c{e} inferior ao observado para $L_0=10$ mm. Este comportamento pode estar associado \c{a} reduzida ductilidade global da combina\c{c}\~ao PLA e adesivo 7752, que resulta num comportamento mais fr\c{a}gil da junta \c{a} medida que a carga aumenta. Assim, embora o aumento de L_0 proporcione maior resist\~encia, a junta torna-se menos tolerante \c{a} deforma\c{c}\~ao, conduzindo a uma rotura mais s\~ubita, a menores δ \c{a} rotura e a uma menor dissipa\c{c}\~ao de energia.

De forma global, conclui-se que o aumento de L_0 melhora tanto a resist\~encia como a deforma\c{c}\~ao das juntas. Comparando os dois adesivos, observa-se que o 2015 tende a apresentar um desempenho ligeiramente superior face ao 7752, sobretudo para L_0 mais elevados, demonstrando maior efici\~encia na transfer\~encia de carga em juntas com PETG.

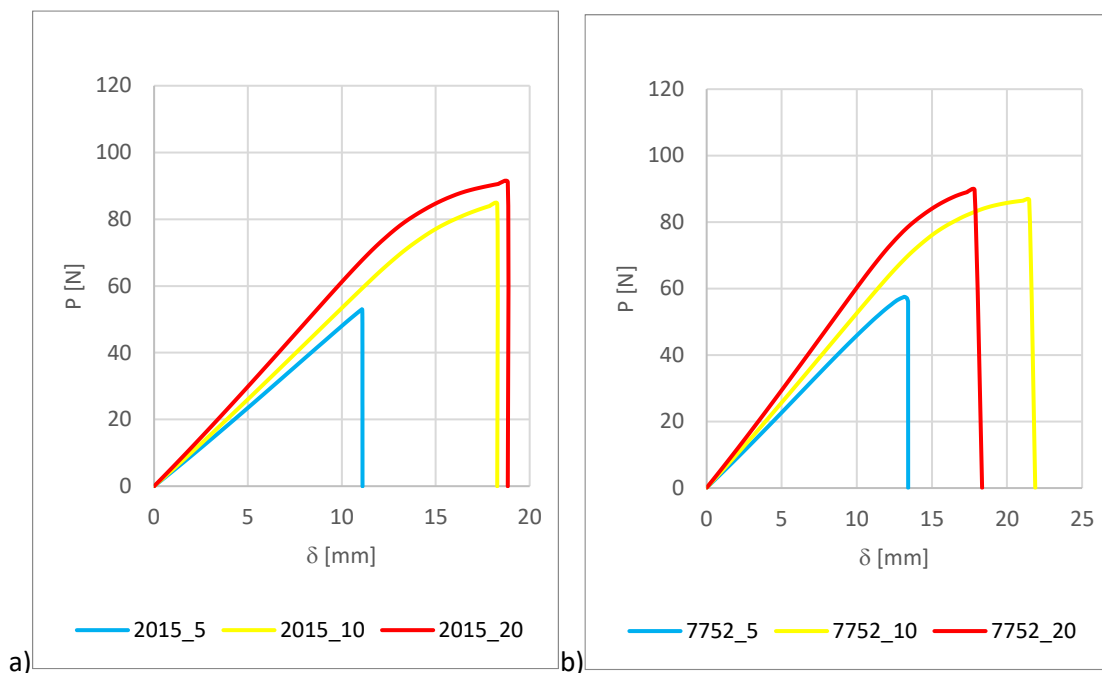


Figura 69 - Curvas P - δ num\c{e}ricas das juntas SLJ com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752

Na Figura 70 a) e b) apresentam-se as curvas P - δ das juntas SLJ com aderentes em ABS, para os adesivos 2015 e 7752 e diferentes L_0 . Em ambos os adesivos observa-se um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 . Para o 2015, verifica-se um acr\c{e}scimo de aproximadamente **69,24%** entre $L_0=5$ e 10 mm, seguido de um aumento de cerca de **13,91%** entre $L_0=10$ e 20 mm. No **7752**, o crescimento relativo de $P_{m\acute{a}x}$ \c{e} da ordem de **72,07%** entre $L_0=5$ e 10 mm e de **6,31%** entre $L_0=10$ e 20 mm.

Quanto ao δ de rotura, também se verifica um aumento progressivo com L_0 , ou seja, juntas com maiores L_0 suportam maiores δ antes da rotura, este comportamento é consistente com a maior área de ligação adesiva disponível.

Em *SLJ* com aderentes de ABS o aumento de L_0 melhora a resistência das juntas (valores superiores de $P_{máx}$), mas a capacidade de δ na rotura pode reduzir quando o modo rotura coesiva adesiva altera para rotura pelo aderente. A seleção de adesivo e L_0 deve, portanto, equilibrar resistência e capacidade de deformação, atendendo ao modo de rotura dominante em cada material.

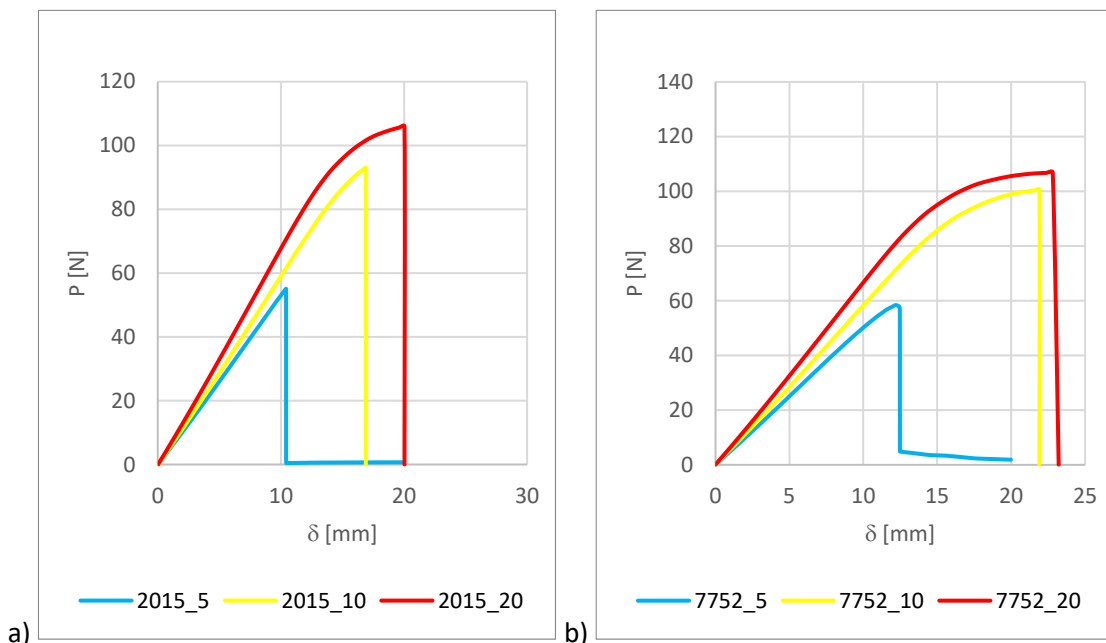


Figura 70 - Curvas P - δ numéricas das juntas *SLJ* com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752

Na Figura 71 a) e b) apresentam-se as curvas P - δ das juntas *SCARF* com aderentes em PLA, para os adesivos 2015 e 7752, respetivamente, com diferentes L_0 . Em ambos os casos, verifica-se um aumento de $P_{máx}$ com aumento de L_0 . Este acontecimento está associado à maior área de ligação o que provoca uma maior resistência na ligação.

Para o adesivo 2015, a variação relativa de $P_{máx}$ entre $L_0=5$ e 10 mm é de aproximadamente **76,64%**, e entre $L_0=10$ e 20 mm de **12,31%**. O modo de rotura para $L_0=5$ e 10 mm é coesivo adesivo, alterando-se para rotura pelo aderente em $L_0=20$ mm, o que proporciona um aumento da resistência, mas uma ligeira redução do deslocamento na rotura. Para o adesivo 7752, observa-se uma variação de $P_{máx}$ de **117,84%** entre $L_0=5$ e 10 mm e de **14,95%** entre $L_0=10$ e 20 mm. Neste caso, a rotura é coesiva adesiva para L_0 curtos e no aderente para $L_0=20$ mm, revelando um compromisso entre resistência acrescida e perda parcial de deformação.

Relativamente ao δ de rotura, verifica um aumento progressivo com o aumento do L_0 , ou seja, juntas com maiores L_0 suportam maiores δ antes da rotura, comportamento que se revela consistente com a maior área de ligação adesiva disponível.

Em juntas *SCARF* com aderentes de PLA, o aumento de L_0 permite a obtenção de $P_{máx}$ superiores, mas a capacidade de δ na rotura pode reduzir quando o modo rotura coesiva

Desenvolvimento

adesiva altera para rotura pelo aderente. A seleção de adesivo e L_0 possui um papel importante pois permitem o equilibrar a resistência e capacidade de deformação, com base no modo de rotura dominante em cada material.

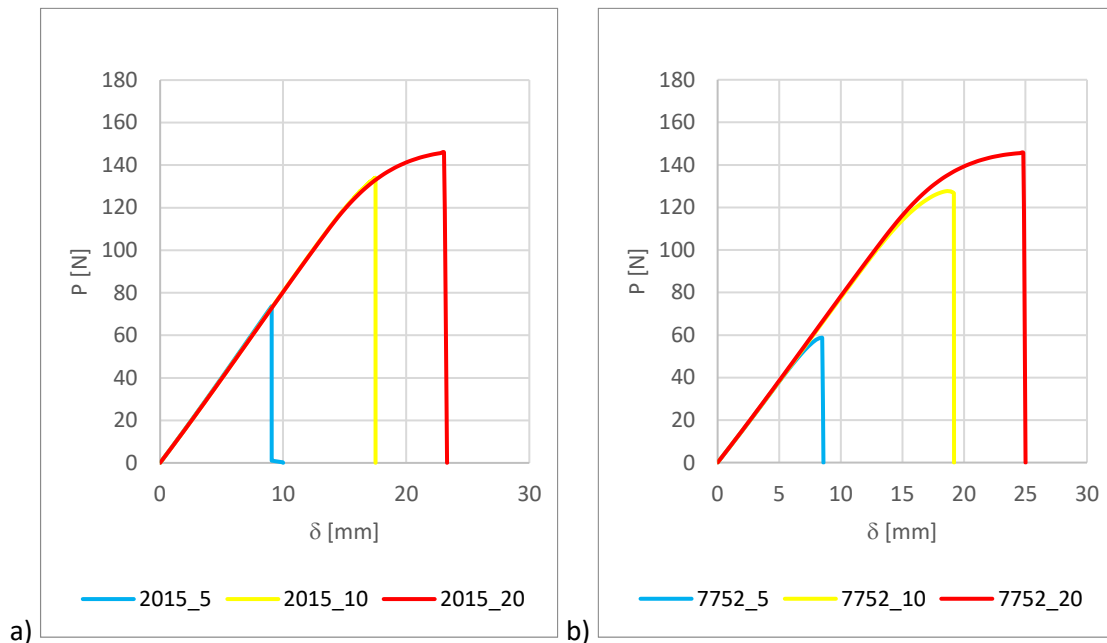


Figura 71 - Curvas P - δ numéricas das juntas SCARF com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752

A Figura 72 apresenta as curvas P - δ para as juntas SCARF com aderentes em PETG, e adesivos 2015 e 7752. Tal como nas juntas de PLA, o aumento de L_0 traduz-se num crescimento da $P_{m\acute{a}x}$.

Para o adesivo 2015, o acréscimo de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5$ e 10 mm é de **49,30%**, e entre $L_0=10$ e 20 mm de **-0,02%**. Por sua vez, para o adesivo 7752, estes incrementos são de **42,74%** e **1,11%**, respetivamente. Em ambos os adesivos, a rotura é coesiva apenas em $L_0 = 5$ mm, enquanto esta altera para rotura pelo aderente nos L_0 superiores.

O δ de rotura regista um aumento progressivo com L_0 , ou seja, juntas com maiores L_0 suportam maiores δ antes da rotura, o que se mostra consistente com a maior área de ligação adesiva.

Em juntas SCARF com aderentes de PETG, o aumento de L_0 permite a obtenção de $P_{m\acute{a}x}$ superiores, mas a capacidade de δ na rotura pode reduzir quando o modo rotura coesiva adesiva altera para rotura pelo aderente.

Na Figura 73 a) e b) encontram-se as representadas as curvas P - δ das juntas SCARF com aderentes em ABS, para os adesivos 2015 e 7752.

Para o adesivo 2015, a variação relativa de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5$ e 10 mm é de aproximadamente **28,90%**, e entre $L_0=10$ e 20 mm de **-0,08%**. Para o adesivo 7752, observa-se uma variação de $P_{m\acute{a}x}$ de **63,21%** entre $L_0=5$ e 10 mm e de **0,21%** entre $L_0=10$ e 20 mm.

A evolução com L_0 é consistente com os casos anteriores, com $P_{m\acute{a}x}$ mais elevados para L_0 maiores, devido à maior superfície de contacto e melhor distribuição de tensões. A rotura é apenas coesiva adesiva em $L_0=5$ mm, rompendo pelo aderente apenas em $L_0=10$ e 20 mm, em ambos os adesivos. Para $L_0=5$ mm, o comportamento da junta permite δ de rotura superiores.

Quando L_0 aumenta, a rigidez da junta cresce e as juntas de ABS apresentam um δ de rotura menor.

Nas juntas *SCARF* com aderentes de ABS, o aumento de L_0 conduz a um incremento nos valores de $P_{m\acute{a}x}$. No entanto, com o aumento de L_0 , verifica-se uma transi\c{c}o do modo de rotura coesiva no adesivo adesiva para rotura no pr\u00f3prio aderente, acompanhada por um acr\u00e9scimo de δ , o que indica uma maior resist\u00eancia de liga\u00e7\u00e3o do que do material base.

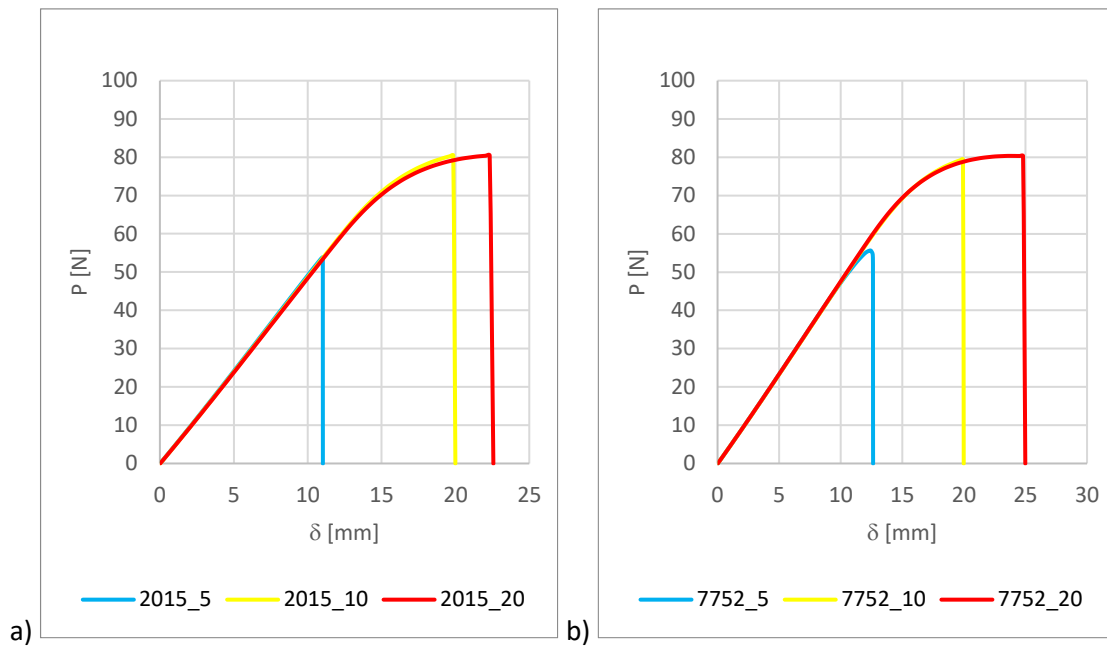


Figura 72 - Curvas P - δ num\u00e9ricas das juntas *SCARF* com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752

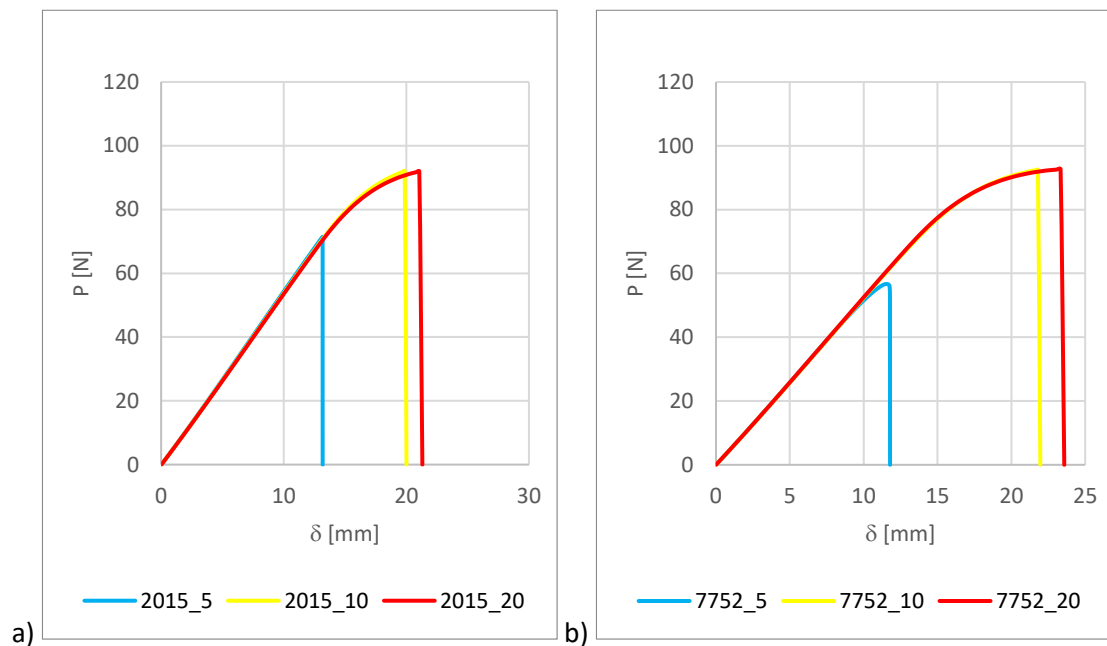


Figura 73 - Curvas P - δ num\u00e9ricas das juntas *SCARF* com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752

Na Figura 74 apresentam-se as curvas P - δ das juntas *STEP* com aderentes em PLA, para os adesivos 2015 e 7752, respectivamente, em diferentes L_0 . Para o adesivo 2015, a varia\u00e7\u00e3o

Desenvolvimento

relativa de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5$ e 10 mm é de **0,05%**, e entre $L_0=10$ e 20 mm de **-1,18%**. O modo de rotura pelo aderente predomina em todos os L_0 o que explica a rigidez e comportamento semelhante até à rotura, obtendo-se valores de δ de rotura semelhantes para os três L_0 . Já para o adesivo 7752, os ganhos de $P_{m\acute{a}x}$ são de **1,61%** entre $L_0=5$ e 10 mm e **7,71%** entre $L_0=10$ e 20 mm, mantendo-se sempre a rutura coesiva. Este tipo de rotura permite deslocamentos ligeiramente mais elevados e um aumento mais progressivo da carga até ao ponto máximo. De forma global, as juntas de PLA com adesivo 7752 revelam uma maior capacidade de deformação antes da rotura, enquanto o 2015, pela predominância de roturas no aderente, apresenta comportamento similar para todos os L_0 .

De forma global nota-se que, para todos os L_0 , as roturas tendem a ter origem no aderente, o que realça uma resistência bastante semelhante entre juntas com o mesmo adesivo e diferentes L_0 . No caso do adesivo 7752, a rotura ocorre no aderente apenas para $L_0=20$ mm, verificando-se roturas coesivas para L_0 menores. As variações percentuais de $P_{m\acute{a}x}$ demonstram que o efeito do aumento de L_0 é mais acentuado na transição de 10 mm para 20 mm, sendo menos expressivo entre 5 mm e 10 mm. A escolha do adesivo deve, portanto, equilibrar a necessidade de resistência máxima com a manutenção da rigidez e do modo de rotura.

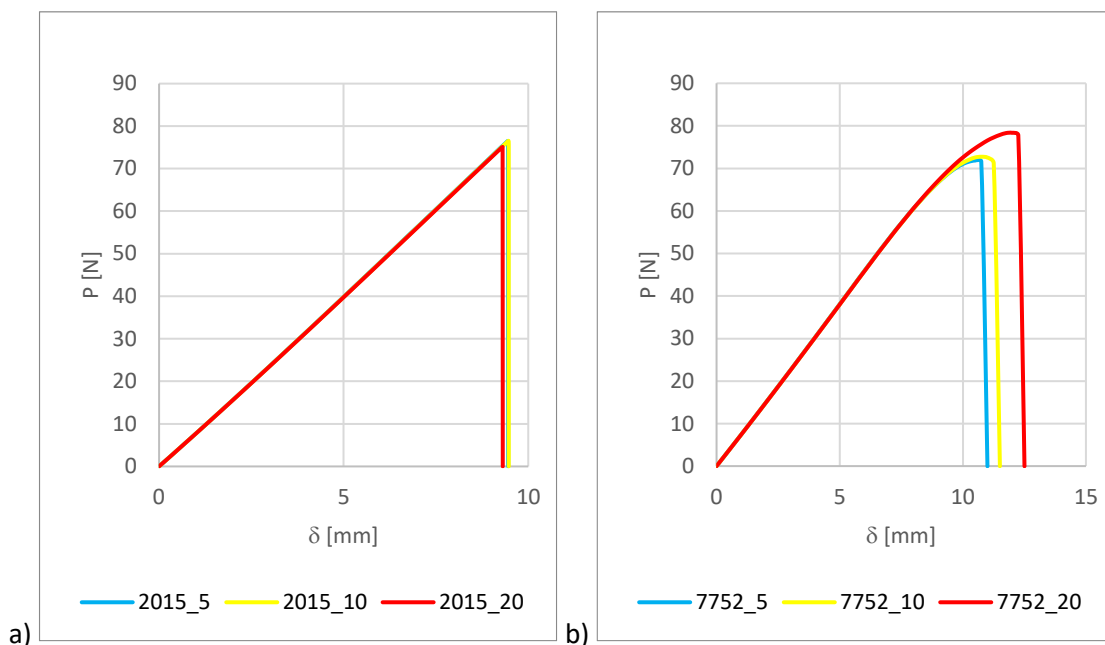


Figura 74 - Curvas P - δ numéricas das juntas *STEP* com PLA e adesivos a) 2015 e b) 7752

A Figura 75 encontram-se representadas as curvas P - δ das juntas *STEP* com aderentes em PETG e adesivos 2015 e 7752. Em ambos os casos, a rotura ocorre exclusivamente no aderente para todos os L_0 , o que condiciona a deformabilidade da junta e resulta em respostas muito semelhantes entre adesivos. Para o 2015, o acréscimo de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5$ e 10 mm é de **3,41%**, e entre $L_0=10$ e 20 mm de **-0,14%**; para o 7752, estes valores são de **0,33%** e **3,49%**, respetivamente. Embora a resistência aumente com L_0 , os deslocamentos na rutura permanecem praticamente constantes, evidenciando que o limite estrutural está no próprio aderente e não na camada adesiva.

Verifica-se uma tendência para a rotura ocorrer no aderente, o que indica que o aumento de L_0 não altera significativamente a resistência das juntas com o mesmo adesivo. Desta forma, a escolha do adesivo e do L_0 deve ser feita de forma a equilibrar os requisitos de desempenho mecânico e o tipo de rotura.

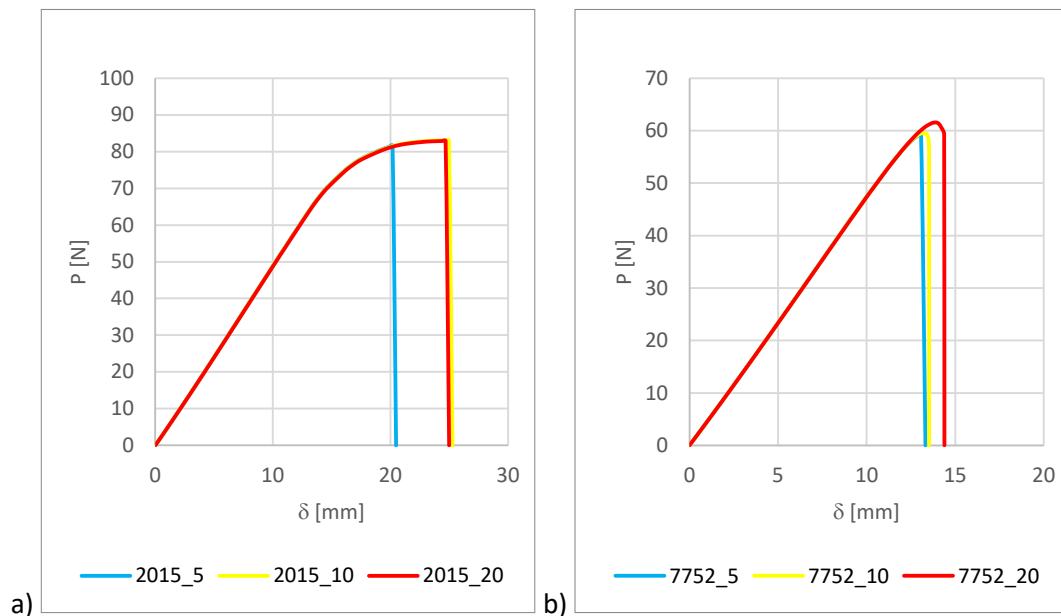


Figura 75 - Curvas P - δ numéricas das juntas *STEP* com PETG e adesivos a) 2015 e b) 7752

Na Figura 76 observam-se as curvas P - δ das juntas *STEP* com aderentes em ABS, e adesivos 2015 e 7752. Tal como no PETG, a rotura tem lugar no aderente em todos os L_0 . Para o 2015, o aumento de $P_{máx}$ de $L_0=5$ para 10 mm é de **-0,01%**, e de $L_0=10$ para 20 mm é de **-2,12%**; para o 7752, estas variações são de **0,65%** e **3,62%**, respectivamente. A resposta mecânica mantém-se praticamente linear até à rotura, com rigidez semelhante para todos os L_0 e sem aumento significativo no δ de rotura. No ABS, a rotura no aderente domina o desempenho global da junta, tornando menos relevante a escolha do adesivo para esta geometria.

No caso das juntas *STEP* com ABS, todas as roturas ocorreram pelo aderente, pelo que o aumento de L_0 não se traduz em ganhos significativos para o 2015, com o $P_{máx}$ e δ de rotura semelhantes. Por fim, no 7752 observa-se uma melhoria diminuta de $P_{máx}$ e δ de rotura com $L_0=20$ mm, devido ao desempenho global continuar limitado pela resistência do ABS.

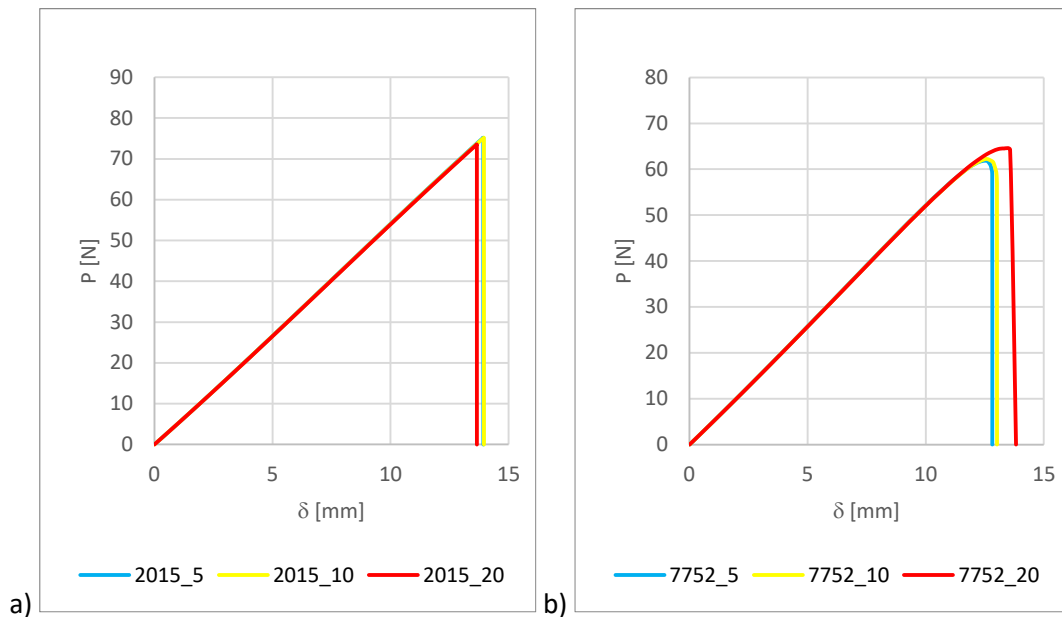


Figura 76 - Curvas P - δ numéricas das juntas *STEP* com ABS e adesivos a) 2015 e b) 7752

3.2.4.3. Rigidez máxima

Neste subcapítulo, encontram-se representados nas Figura 77, Figura 78 e Figura 79 os $K_{máx}$ das juntas numéricas *SLJ*, *SCARF* e *STEP*, respetivamente.

Na Figura 77 são apresentados os valores de $K_{máx}$ em função de L_0 para as juntas *SLJ*. Observa-se que, para todos os tipos de aderentes e adesivos, existe uma tendência de aumento de $K_{máx}$ com o aumento do L_0 . Com base na análise da figura, verificou-se que:

- Para as juntas de PLA com o adesivo 2015, o aumento de L_0 de 5 para 10 mm resulta num acréscimo de **13,23%** no valor de $K_{máx}$ e para a transição de L_0 de 10 para 20 mm verificou-se um aumento de **14,42%**. Como adesivo 7752, observa-se um aumento de **19,34%** entre 5 e 10 mm, seguido de um aumento de **14,44%** de 10 para 20 mm;
- Para o aderente PETG, com o adesivo 2015, verifica-se um acréscimo de **11,73%** de L_0 de 5 para 10 mm, mas uma redução de **4,80%** de 10 para 20 mm. No adesivo 7752, há um aumento de **14,95%** de 5 para 10 mm e **14,55%** até 20 mm. Estes resultados indicam que, na geometria *SLJ*, o aumento de L_0 melhora a rigidez inicial até certo ponto, sendo que comprimentos demasiado elevados podem conduzir a modos de rotura mais frágeis e redução do deslocamento máximo;
- No caso das juntas com aderente em ABS e o adesivo 2015, verifica-se um aumento de **12,15%** de 5 para 10 mm e de **14,03%** de 10 para 20 mm. Com o adesivo 7752 a junta de ABS obtém um aumento de **15,61%** de 5 para 10 mm e **14,20%** de 10 até 20 mm.

Nas juntas *SLJ*, o PLA apresenta, de forma geral, valores $K_{máx}$ superiores para ambas os adesivos, o que se relaciona com a maior rigidez do material e a menor deformabilidade sob carga. O ABS e o PETG exibem valores inferiores e mais próximos entre si, sugerindo um comportamento mais flexível e menor transferência eficiente de carga para a zona de sobreposição.

Na Figura 78, correspondente às juntas *SCARF*, encontra-se representada a evolução de $K_{máx}$ com os diferentes L_o . Esta geometria apresenta um comportamento mais uniforme, com ligeiras variações percentuais ao longo dos diferentes L_o . Após análise, verificou-se que:

- Para as juntas de PLA com o adesivo 2015, é possível visualizar um decréscimo de $K_{máx}$ de **7,51%** com a variação de L_o de 5 mm para 10 mm, e um aumento de **0,22%** de $K_{máx}$ entre L_o de 10 e 20 mm. Com o adesivo 7752, o incremento é de **1,87%** entre 5 e 10 mm, e **0,43%** entre 10 e 20 mm;
- No caso das juntas com aderente em PETG e 2015, é notado um decréscimo de **0,98%** de 5 para 10 mm e um aumento de **0,53%** de 10 até 20 mm. Por outro lado, com o 7752, o $K_{máx}$ diminui em **0,32%** de 5 para 10 mm e aumenta **1,69%** de 10 para 20 mm;
- Para o aderente ABS, quando combinado com o adesivo 2015, o $K_{máx}$ diminui em **0,95%** de 5 para 10 mm, seguido de um aumento de **0,44%** até 20 mm. Com o adesivo 7752, verifica-se um acréscimo de **0,02%** de 5 para 10 mm e **0,53%** de 10 até 20 mm.

Nas juntas com geometria *SCARF*, o PLA mantém a liderança nos valores de $K_{máx}$, enquanto o ABS e o PETG continuam a exibir desempenhos próximos. A variação de $K_{máx}$ com o aumento do L_o é reduzida (apenas pequenas oscilações entre $L_o=5, 10$ e 20 mm), o que indica que a rigidez global da junta é pouco sensível a variações de L_o para esta configuração e materiais.

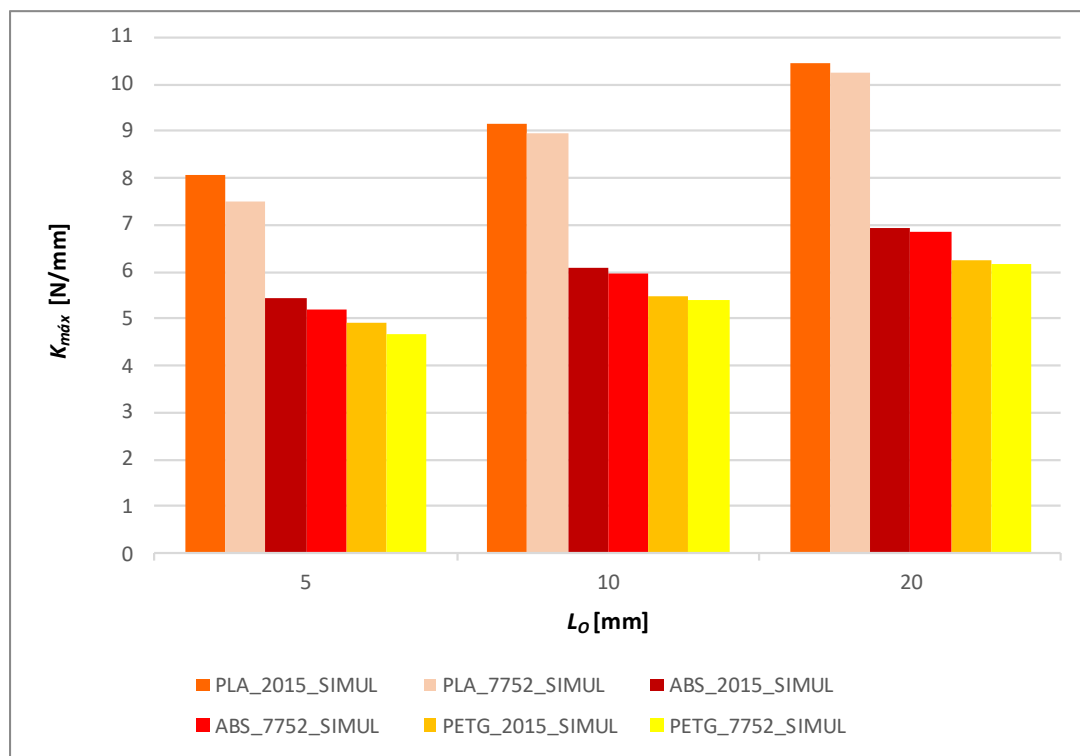


Figura 77 - Valores de $K_{máx}$ [N/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas *SLJ*

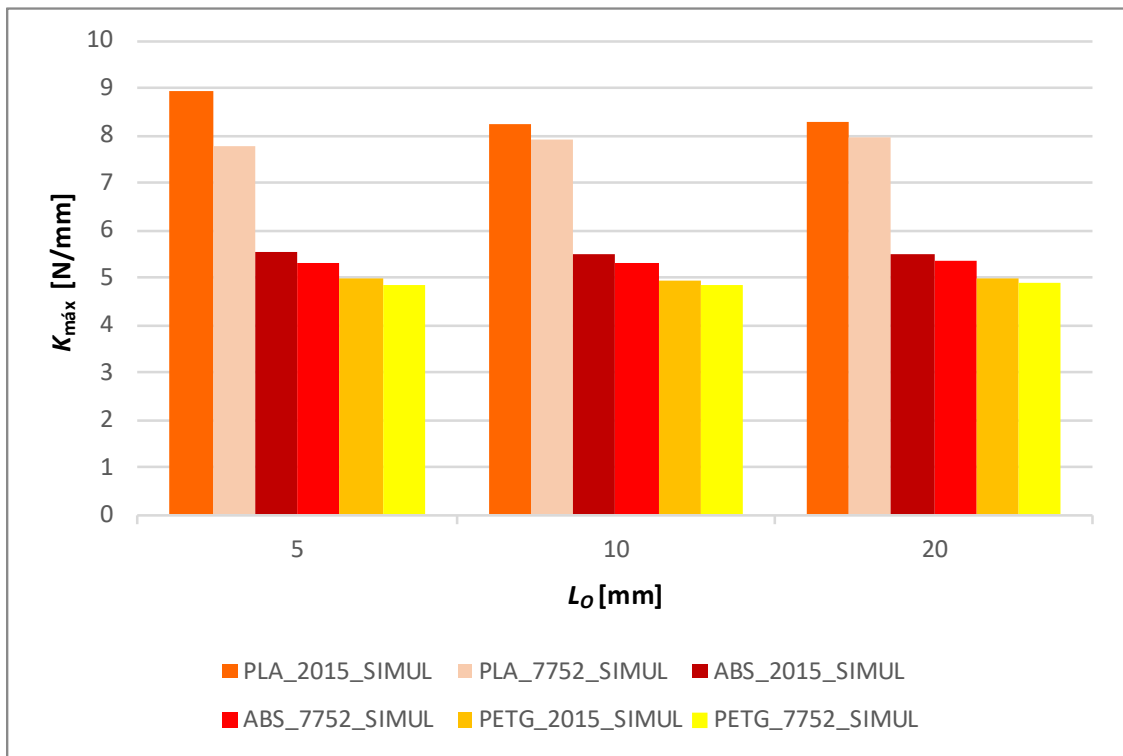


Figura 78 - Valores de $K_{m\acute{a}x}$ [N/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para as juntas SCARF

Na Figura 79 são apresentados os valores de $K_{m\acute{a}x}$ em função de L_o para as juntas STEP. Observa-se que, para todos os tipos de aderentes e adesivos, existe uma consistência nos valores de $K_{m\acute{a}x}$ independente do aumento do L_o . Com base na análise da figura, verificou-se que:

- Para as juntas de PLA, com o adesivo 2015, o aumento de L_o de 5 para 10 mm resulta num decréscimo de **0,13%** no valor de $K_{m\acute{a}x}$ e **1,45%** para a transição de L_o de 10 para 20 mm. Como adesivo 7752, observa-se um aumento de **0,6%** entre 5 e 10 mm, seguido de uma diminuição de **0,29%** de 10 para 20 mm;
- Para o aderente PETG, com o adesivo 2015, verifica-se um acréscimo de $K_{m\acute{a}x}$ de **0,32%** de 5 para 10 mm e uma redução de **0,4%** de 10 para 20 mm. No adesivo 7752, há um decréscimo de **0,87%** de 5 para 10 mm e um aumento de **1,13%** de 10 até 20 mm;
- No caso das juntas com aderente em ABS e o adesivo 2015, verifica-se uma diminuição de $K_{m\acute{a}x}$ de **0,19%** de 5 para 10 mm e um aumento de **1,16%** de 10 para 20 mm. Com o adesivo 7752 a junta de ABS obtém um aumento de **0,82%** de 5 para 10 mm e uma diminuição de **1,65%** de 10 até 20 mm.

Na configuração STEP, as diferenças entre aderentes são menores, sugerindo que esta geometria favorece um comportamento mais equilibrado entre diferentes valores de rigidez dos aderentes. Ainda assim, o PLA conserva a vantagem nos valores de $K_{m\acute{a}x}$, seguido de perto pelo ABS e, por último, pelo PETG. Tal como nas geometrias STEP, a variação de $K_{m\acute{a}x}$ com o aumento do L_o é reduzida (apenas pequenas oscilações entre $L_o=5, 10$ e 20 mm), o que indica que a rigidez global da junta é pouco sensível a variações de L_o para esta configuração e materiais.

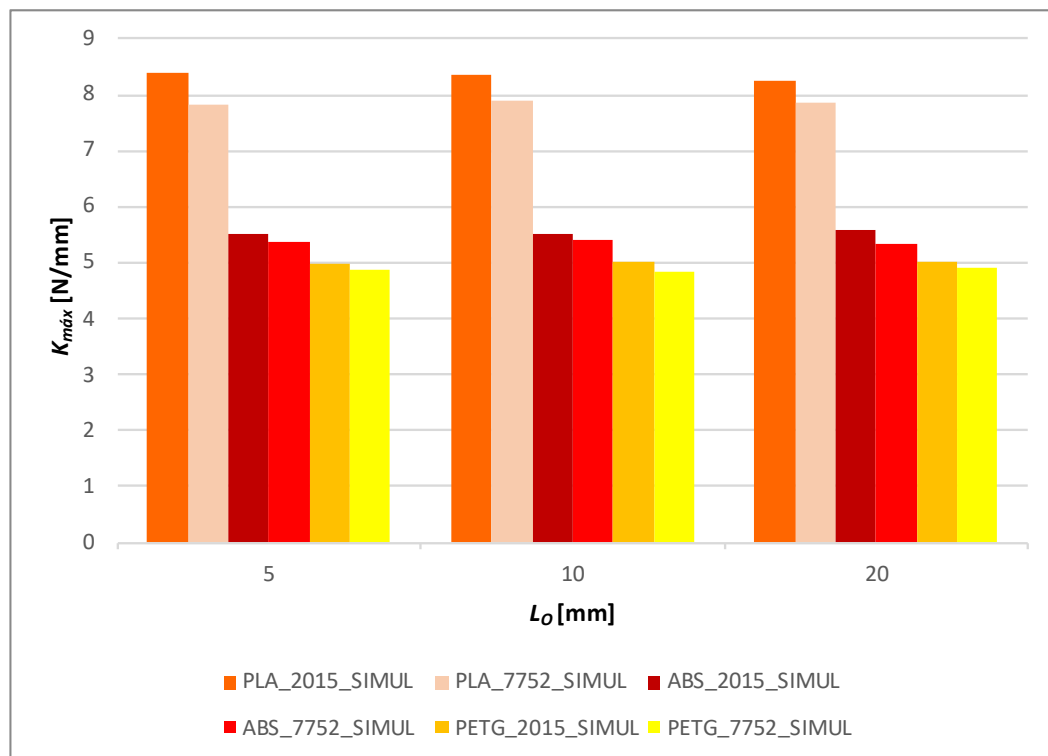


Figura 79 - Valores de $K_{m\acute{a}x}$ [N/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para as juntas *STEP*

3.2.4.4. Energias de rotura

Neste subcapítulo encontram-se a análise dos valores de energia de rotura obtidos nas simulações numéricas para as três geometrias de juntas estudadas: *SLJ*, *SCARF* e *STEP*. A análise é realizada individualmente para cada geometria, considerando diferentes L_0 , tipos de adesivo e materiais de aderente.

Na Figura 80, correspondente às juntas *SLJ*, encontra-se representada a evolução da energia de rotura com os diferentes L_0 . Com base na análise da figura, verificou-se que:

- Para as juntas de PLA, com o adesivo 2015, o aumento de L_0 de 5 para 10 mm resulta num aumento de **324.34%** na energia de rotura e **59.98%** para a transição de $L_0=10$ mm para 20 mm. Com o adesivo 7752, observa-se um aumento de **478,15%** entre 5 e 10 mm, seguido de um aumento de **0,91%** de 10 para 20 mm. Estes resultados devem-se ao facto de a rotura coesiva promover o elevado δ de rotura, que consequentemente aumenta o aumento de energia com o aumento do L_0 . As discrepâncias observadas nos valores de energia de rotura resultam, provavelmente, das propriedades reológicas e mecânicas específicas de cada adesivo, bem como da sua interação interfacial e coesiva com os aderentes;
- Para o aderente PETG, com o adesivo 2015, verifica-se um acréscimo da energia de rotura de **210,41%** com o aumento de $L_0=5$ mm para $L_0=10$ mm, e **18,24%** de $L_0=10$ para $L_0=20$ mm. No adesivo 7752, há um aumento de **187,47%** de $L_0=5$ mm para $L_0=10$ mm e um decréscimo de **21,27%** de 10 até 20 mm. A diminuição da percentagem de

Desenvolvimento

aumento de energia rotura quando se compara o aumento de $L_0=5$ mm para $L_0=10$ mm com o aumento de $L_0=10$ mm para $L_0=20$ mm, deve-se ao facto de o modo de rotura alterar de coesivo adesivo para rotura pelo aderente, o que reduz a evolução do δ e consequentemente da energia;

- No caso das juntas com aderente em ABS e o adesivo 2015, verifica-se um aumento de energia de rotura de **200,62%** de 5 para 10 mm e um aumento de **57,60%** de 10 para 20 mm. Com o adesivo 7752, a junta de ABS obtém um aumento de **251,60%** de 5 para 10 mm e uma diminuição de **21,27%** de 10 até 20 mm. As variações do aumento da energia de rotura com o L_0 podem estar relacionadas tanto com o modo de rotura, que influencia o último deslocamento atingido, como com as propriedades mecânicas dos adesivos, que condicionam a dissipação de energia e a resposta conjunta com os aderentes.

Para as juntas *SLJ*, as juntas de PLA apresentam as maiores energias de rotura (rotura coesiva e δ elevados). Os aderentes PETG e ABS têm energias de rotura inferiores, sobretudo quando o modo de rotura altera para o aderente nos L_0 maiores, o que reduz a capacidade de deformação da junta e a área sob a curva $P-\delta$.

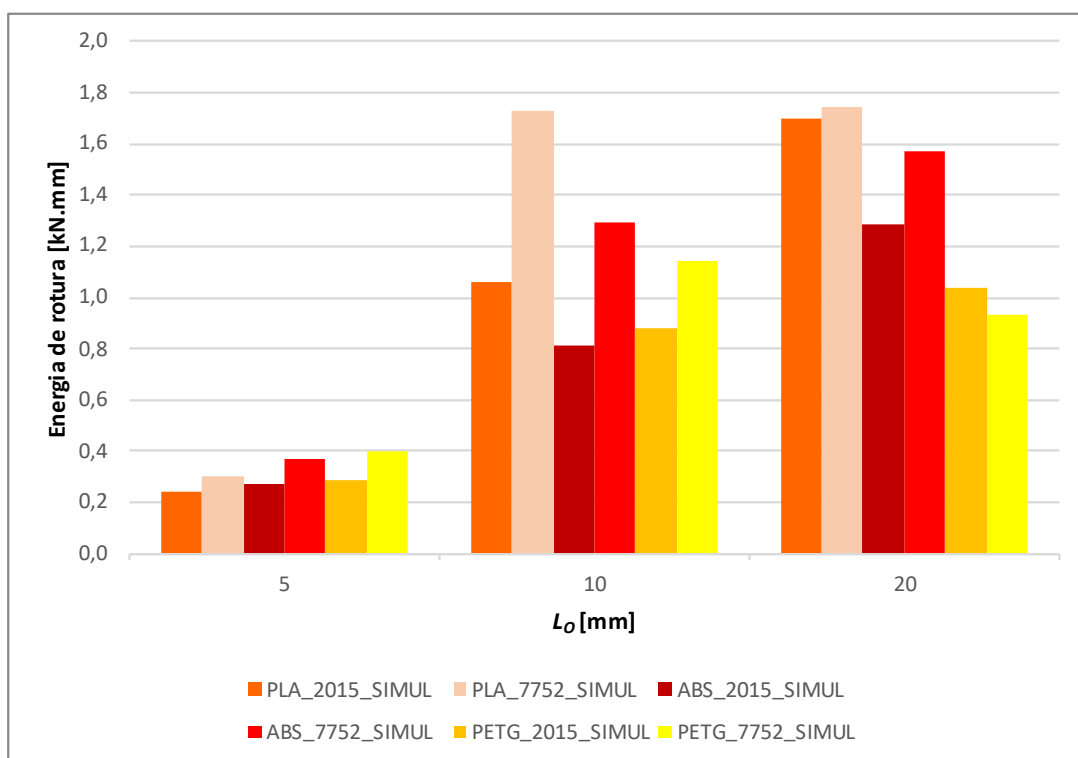


Figura 80 - Valores de energia de rotura [kN.mm] em função de L_0 , adesivo e aderente para as juntas *SLJ*

Na Figura 81, relativa às juntas *SCARF*, é possível observar um aumento global da energia de rotura com o acréscimo de L_0 para todos os materiais e adesivos. Com base nesta análise, verificou-se que:

- Para o PLA com o adesivo 2015, o aumento de L_0 de 5 para 10 mm provoca uma variação de **235,25%**, e a transição de 10 para 20 mm resulta num acréscimo adicional de **83,90%**. Com o adesivo 7752, observa-se um aumento de **402,99%** entre 5 e 10 mm e de **62,19%** entre 10 e 20 mm;
- Para o PETG, usando o adesivo 2015, a passagem de 5 para 10 mm origina um aumento de **219,50%**, e de 10 para 20 mm um acréscimo de **21,23%**. Já com o adesivo 7752, regista-se um aumento de **146,45%** até 10 mm, seguido de **44,33%** até 20 mm;
- No ABS, com adesivo 2015, o acréscimo de L_0 de 5 para 10 mm representa **122,84%**, enquanto de 10 para 20 mm atinge **10,72%**. No adesivo 7752, a variação é de **234,87%** para o primeiro intervalo e **12,95%** para o segundo.

De forma geral, as juntas *SCARF* apresentam energias de rotura mais elevadas do que as *SLJ*. As variações de resultados encontradas nas análises efetuadas devem-se ao facto de, em certas configurações de junta, as roturas coesivas promoverem um elevado δ de rotura, que consequentemente aumenta o crescimento de energia com o aumento do L_0 . As discrepâncias observadas nos valores de energia de rotura podem também originar de propriedades mecânicas específicas de cada adesivo.

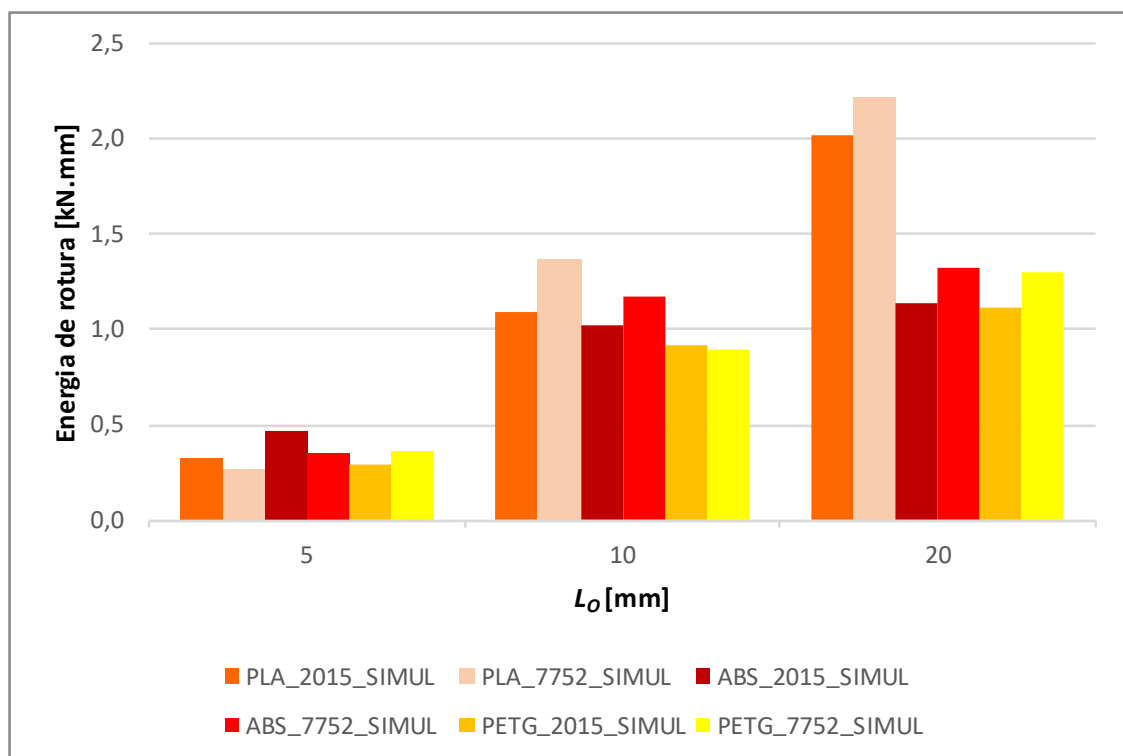


Figura 81 - Valores de Energia de rotura [kN.mm] em função de L_0 , adesivo e aderente para as juntas *SCARF*

A Figura 82 apresenta a evolução da energia de rotura para as juntas *STEP*. Nesta geometria, as variações com o L_0 revelam um comportamento distinto em relação às *SLJ* e *SCARF*, com tendência para menores incrementos e até reduções em alguns casos, especialmente para adesivos e aderentes menos rígidos. A análise permite destacar:

Desenvolvimento

- Para o PLA Com o adesivo 2015, a variação é de **0,21%** de 5 para 10 mm de L_0 e de **-3,65%** de 10 para 20 mm. No adesivo 7752, regista-se uma variação de **8,30%** de 5 para 10 mm de L_0 e **17,51%** de 10 para 20 mm;
- Para o PETG com adesivo 2015, o crescimento é de **57,02%** de 5 para 10 mm de L_0 e de **-1,98%** de 10 para 20 mm, por sua vez, com o adesivo 7752 o aumento de energia é de **3,03%** de 5 para 10 mm de L_0 e de **12,64%** de 10 para 20 mm;
- No ABS com adesivo 2015, o aumento é de **0,19%** de 5 para 10 mm de L_0 e de **-4,30%** de 10 para 20 mm. No adesivo 7752 o aumento energia é de **2,85%** entre $L_0=5$ e 10 mm e **12,33%** entre 10 e 20 mm de L_0 .

De forma geral, as juntas *STEP* apresentam os valores mais baixos de energia de rotura entre as três geometrias analisadas. Esta tendência é evidenciada pelas curvas $P-\delta$, nas quais se observa, em particular, um menor δ à rotura em comparação com as juntas de geometria *SLJ* e *SCARF*. Este comportamento poderá estar associado à presença do degrau, que fragiliza localmente os aderentes e potencia a ocorrência de rotura prematura no aderente, mas também a outros fatores, como o desalinhamento entre os aderentes e uma maior rigidez localizada, que favorecem concentrações de tensão e antecipam o início da rotura. Além disso, a geometria *STEP* revela menor eficiência na transferência de carga e maior suscetibilidade à concentração de tensões, fatores que, em conjunto, contribuem para a redução da energia total dissipada até à rotura.

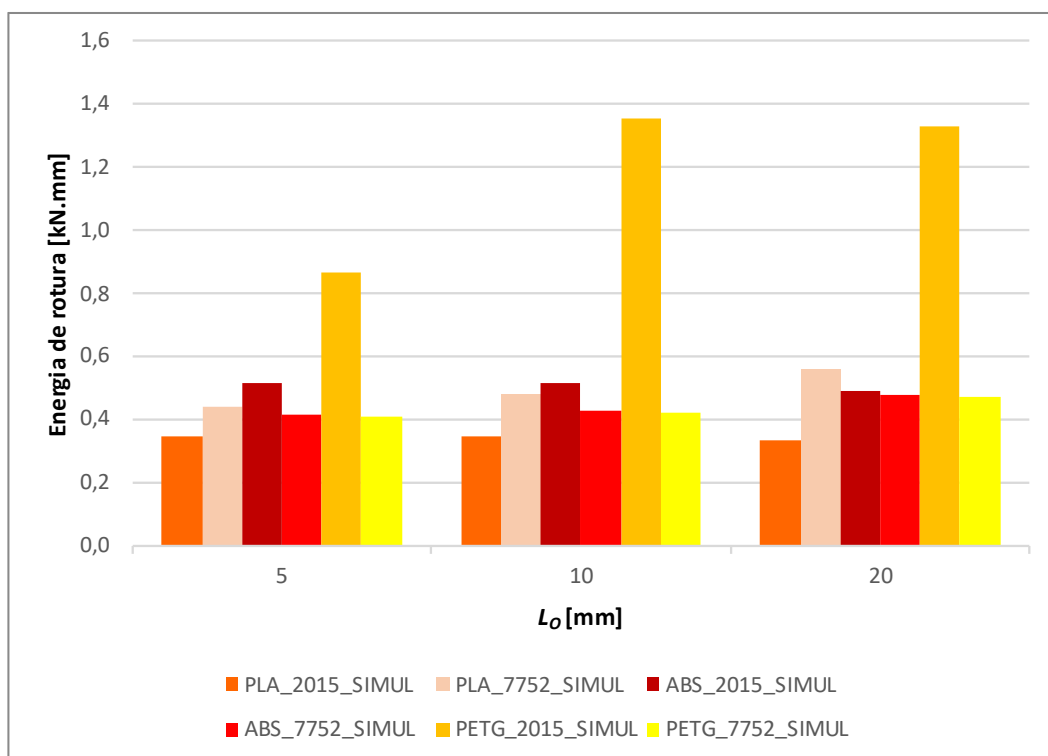


Figura 82 - Valores médios de Energia de rotura [kN.mm] em função de L_0 , adesivo e aderente para as juntas *STEP*

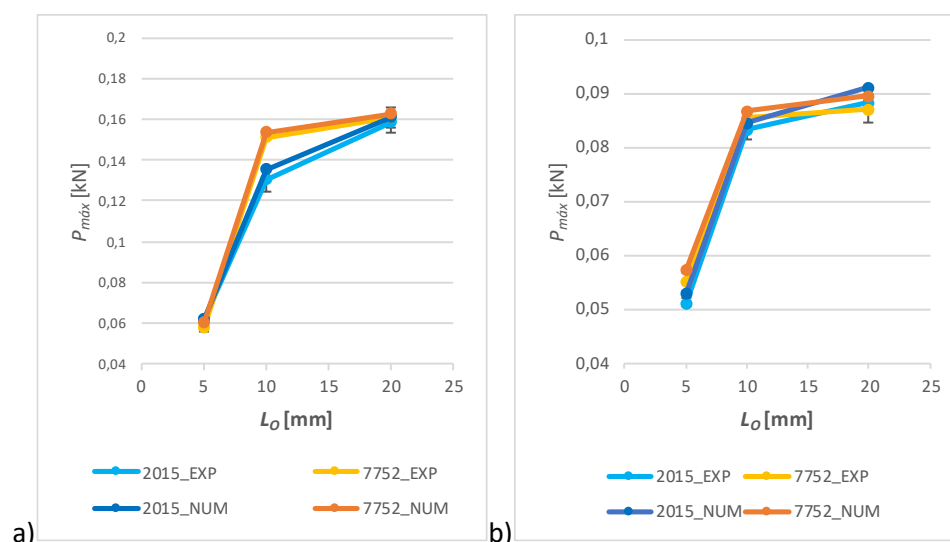
3.3. Discussão e comparação de resultados

A análise experimental e a modelação numérica constituem duas abordagens complementares para o estudo do comportamento de juntas adesivas. Enquanto os ensaios laboratoriais permitem observar diretamente a resposta estrutural até à rotura, os modelos numéricos e experimentais oferecem a possibilidade de compreender a distribuição interna de tensões e de prever tendências para diferentes configurações geométricas e condições de carregamento. Contudo, pela natureza distinta de cada abordagem, é expectável a ocorrência de discrepâncias entre os resultados, resultantes de simplificações adotadas na modelação, variabilidade associada ao processo de fabrico dos provetes e à própria resposta não linear dos materiais.

Neste subcapítulo procede-se à comparação sistemática entre os resultados experimentais e numéricos obtidos para as diferentes geometrias de junta estudadas. A análise incidirá sobre os parâmetros mais relevantes para a caracterização estrutural, nomeadamente o $P_{máx}$, $K_{máx}$ e a energia de rotura, relacionando-os com os modos de rotura observados. Esta comparação permitirá não apenas validar a consistência global do modelo numérico, mas também identificar as suas limitações e potenciais melhorias, contribuindo para uma compreensão mais abrangente do desempenho das juntas adesivas em flexão.

3.3.1. $P_{máx}$ e resistência das juntas

Na Figura 83 encontra-se representada a comparação entre os valores experimentais e numéricos de $P_{máx}$ para as juntas *SLJ*. Destaca-se uma boa concordância geral, embora se identifiquem diferenças relevantes associadas ao L_0 e ao modo de rotura dominante em cada caso.



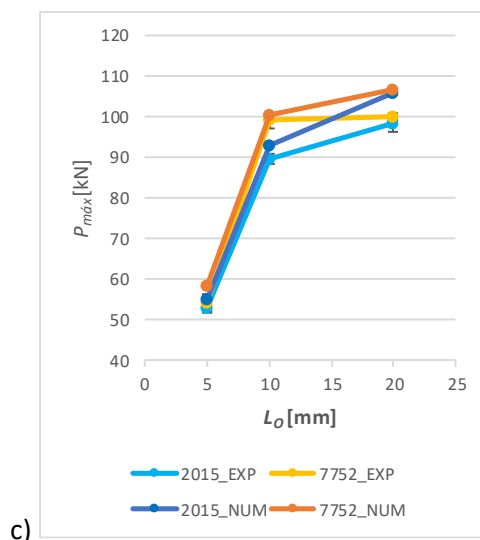


Figura 83 - Comparação de $P_{máx}$ numérico com experimental das juntas *SLJ* com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS

Para as juntas com os aderentes em PLA, tanto o adesivo 2015 como o 7752 registam valores de $P_{máx}$ muito próximos entre as simulações e os ensaios experimentais. Para os valores de $L_o=5$, 10 e 20 mm as variações foram de apenas **0,25%**, **4,06%** e **1,78%**, respetivamente, entre o modelo numérico e o experimental para o adesivo 2015, e de **3,81%**, **1,37%** e **1,04%** para o adesivo 7752, respetivamente. Em ambos os casos, a rotura apresenta carácter maioritariamente coesivo, o que confirma a boa adesão entre o aderente e adesivo e justifica o aumento consistente da resistência com o aumento de L_o .

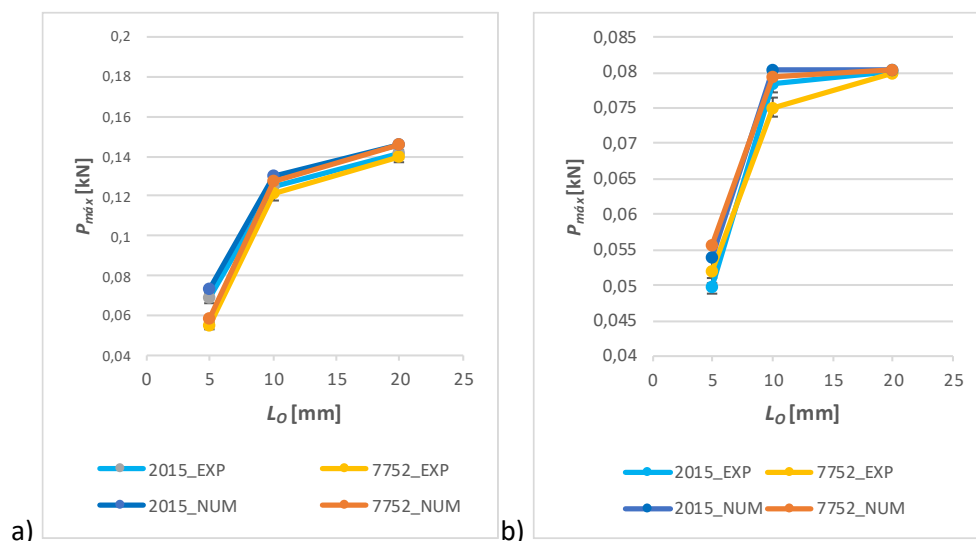
No caso das juntas em PETG, a análise mostra discrepâncias mais evidentes. Para o adesivo 2015, verifica-se uma transição do modo de rotura coesivo, para $L_o=5$ mm, com variação de **3,43%** entre modelos, para rotura aderente, e **1,70%** para $L_o=10$ mm. Esta mudança de modo de rotura está associada a uma estabilização de $P_{máx}$, refletida também na reduzida variação de apenas **3,07%** para $L_o=20$ mm. O adesivo 7752, por sua vez, mantém valores relativamente consistentes, com variações de **4,30%**, **1,43%**, **2,96%** para $L_o=5$, 10 e 20 mm, respetivamente, mas com roturas aderentes em todos os casos, o que explica a quase evolução da resistência com o aumento de L_o .

Relativamente às juntas de ABS, observa-se novamente a predominância de roturas coesivas com o adesivo 2015 para $L_o=5$ mm, onde a variação é **3,98%**, enquanto para $L_o=10$ mm (**3,71%**) e $L_o=20$ mm (**7,93%**), a rotura passa a ser no aderente, coincidindo com uma estabilização de $P_{máx}$. O adesivo 7752 apresenta rotura no aderente em todos os L_o , com variações de **7,71%**, **1,50%** e **6,95%** para $L_o=5$, 10 e 20 mm, respetivamente, o que se traduz em valores de $P_{máx}$ inferiores e pouco sensíveis ao aumento de L_o .

Em síntese, os resultados demonstram que a variação de $P_{máx}$ depende fortemente do modo de rotura, já que as roturas coesivas conduzem a maiores valores de $P_{máx}$ e a respostas mais previsíveis, enquanto roturas aderentes limitam o desempenho estrutural da junta e reduzem a influência do L_o . Esta relação confirma a importância de uma escolha ponderada entre substrato e adesivo, sobretudo em materiais como PETG e ABS.

A análise da Figura 84 mostra uma concordância bastante consistente entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente para as juntas SCARF, independentemente do material dos aderentes. Para o caso do PLA, verifica-se um aumento expressivo do $P_{máx}$ com o incremento de L_o até 10 mm, seguido de uma estabilização. Este comportamento é confirmado pelas variações percentuais reduzidas entre os valores simulados e experimentais: **6,91%** ($L_o=5$ mm), **4,31%** ($L_o=10$ mm) e **2,93%** ($L_o=20$ mm) para o adesivo 2015, e **6,23%**, **4,99%** e **4,08%**, pela mesma ordem, para o adesivo 7752. Tal comportamento indica que, a partir de um determinado L_o , o aumento da área de contacto deixa de contribuir de forma significativa para a transferência de carga no adesivo, sugerindo que a junta atinge um regime próximo do seu limite de eficiência estrutural. Esta tendência é igualmente observada para os aderentes de PETG e ABS, o que demonstra que o fenómeno é governado pela geometria da junta mais do que pelas propriedades específicas do aderente utilizado. No caso do PETG, para o adesivo 2015, as variações de $P_{máx}$ são de **8,09%**, **2,64%** e **0,45%**, para $L_o=5$, 10 e 20 mm e para o adesivo 7752, de **7,22%**, **5,75%** e **0,35%** pela mesma ordem. Já para o ABS, registam-se **8,75%**, **5,11%** e **0,34%** para $L_o=5$, 10 e 20 mm com o adesivo 2015, e **4,20%**, **0,50%** e **0,32%** pela mesma ordem, para o adesivo 7752.

A correlação com os modos de rotura descritos na Tabela 30 confirma esta interpretação. Para L_o de 5 mm, os modos de rotura são maioritariamente coesivos. Com o aumento do L_o , surge a transição para roturas pelos aderentes, sobretudo no caso dos aderentes PETG e ABS, indicando que a resistência do adesivo passa a constituir o fator limitativo. Ainda assim, a evolução de $P_{máx}$ mostra-se estável, validando a eficácia da geometria SCARF em promover um melhor aproveitamento da área de ligação [146]. O modelo numérico reproduz adequadamente estas transições e as magnitudes observadas, o que reforça a fiabilidade da simulação implementada.



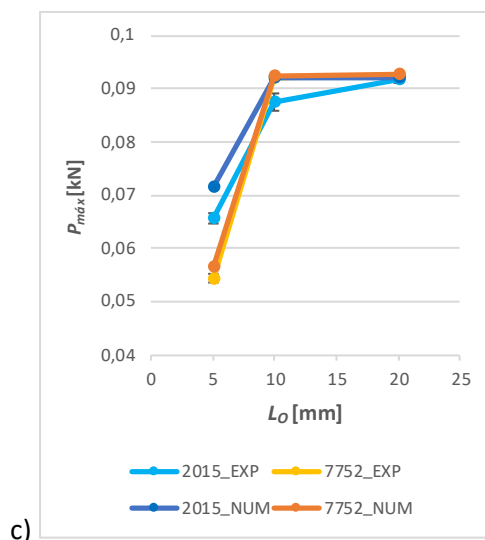


Figura 84 - Comparação de $P_{máx}$ numérico com experimental das juntas *SCARF* com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS

Os resultados obtidos para as juntas *STEP*, representados na Figura 85, revelam um comportamento distinto do observado nas juntas *SCARF*, marcado por uma evolução menos expressiva de $P_{máx}$ com o aumento do L_0 . No caso do PLA, o aumento de L_0 praticamente não se traduz em ganhos significativos de resistência, mantendo os valores do $P_{máx}$ num intervalo estreito. Este comportamento é refletido nas variações percentuais entre simulação e experimental. No adesivo 2015, registam-se variações de **6,38%**, **6,35%** e **7,72%** para $L_0=5$, 10 e 20 mm, respetivamente, e no adesivo 7752, **1,90%**, **0,69%** e **2,97%** para os mesmos L_0 . Esta estabilidade é compatível com a observação de roturas coesivas ao longo dos três L_0 , o que sugere que o adesivo é o elemento determinante.

Nos aderentes de PETG e ABS, verifica-se uma maior discrepância entre resultados experimentais e numéricos, sobretudo para $L_0=20$ mm. No caso do PETG, os valores de $P_{máx}$ simulados mostram uma tendência crescente, com variações de **0,55%**, **0,10%** e **0,64%** para o adesivo 2015, e **3,25%**, **4,77%** e **5,29%** para o adesivo 7752. Enquanto os valores numéricos apontam para uma ligeira tendência de crescimento de $P_{máx}$, os ensaios experimentais evidenciam em alguns casos uma estagnação ou até uma ligeira redução. Esta diferença pode estar associada à ocorrência de roturas aderentes antecipadas, favorecidas por zonas de concentração de tensões características da geometria *STEP*, que não são captadas com a mesma intensidade pelo modelo numérico. Para o ABS, o comportamento segue a mesma linha: com o adesivo 2015, as variações percentuais são **16,84%**, **9,56%** e **8,16%** para $L_0=5$, 10 e 20 mm, enquanto com o adesivo 7752 os valores são bem inferiores: **1,61%**, **0,93%** e **2,19%** para $L_0=5$, 10 e 20 mm. A correlação com os modos de rotura confirma esta hipótese já que, para L_0 mais elevados, o PETG e o ABS apresentam roturas maioritariamente aderentes.

Em síntese, a geometria *STEP* mostra-se menos eficiente na transferência de carga comparativamente à *SCARF*, uma vez que não traduz de forma proporcional o aumento da área de sobreposição em ganhos de resistência. Apesar das limitações, o modelo numérico

acompanha de forma razoável as tendências experimentais, embora com menor capacidade preditiva do que nas juntas SCARF.

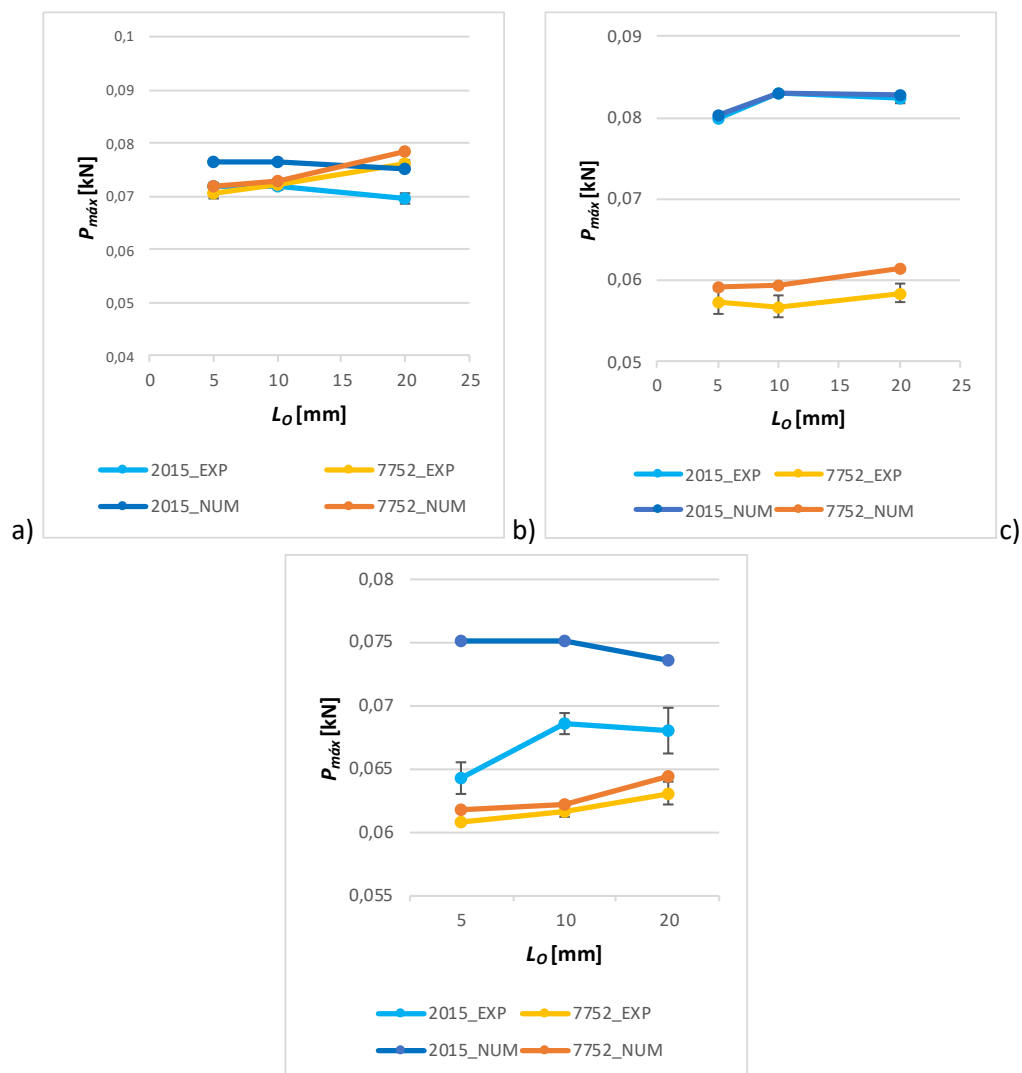


Figura 85 - Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ numérico com experimental das juntas *STEP* com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS

3.3.2. Rigidez máxima

A Figura 86 apresenta a evolução do $K_{m\acute{a}x}$ nas juntas *SLJ*. Em todos os casos verifica-se uma tendência crescente com o aumento de L_o , resultado direto do aumento da área de adesão e consequente diminuição das tensões médias na linha de adesivo. O modelo numérico consegue reproduzir de forma bastante satisfatória o comportamento experimental, com diferenças reduzidas, particularmente para o adesivo 2015, cuja variação percentual máxima de $K_{m\acute{a}x}$ é de apenas **2,34%** (observada para o PETG com $L_o=5$ mm). Já para o adesivo 7752, registam-se variações um pouco mais elevadas, com uma diferença máxima de **4,96%** (no caso do PLA com $L_o=10$ mm), mantendo-se ainda assim dentro de limites aceitáveis. As roturas observadas são

maioritariamente coesivas, o que justifica a boa correlação obtida, uma vez que o desempenho é controlado pelas propriedades do adesivo, facilmente reproduzidas pelo modelo.

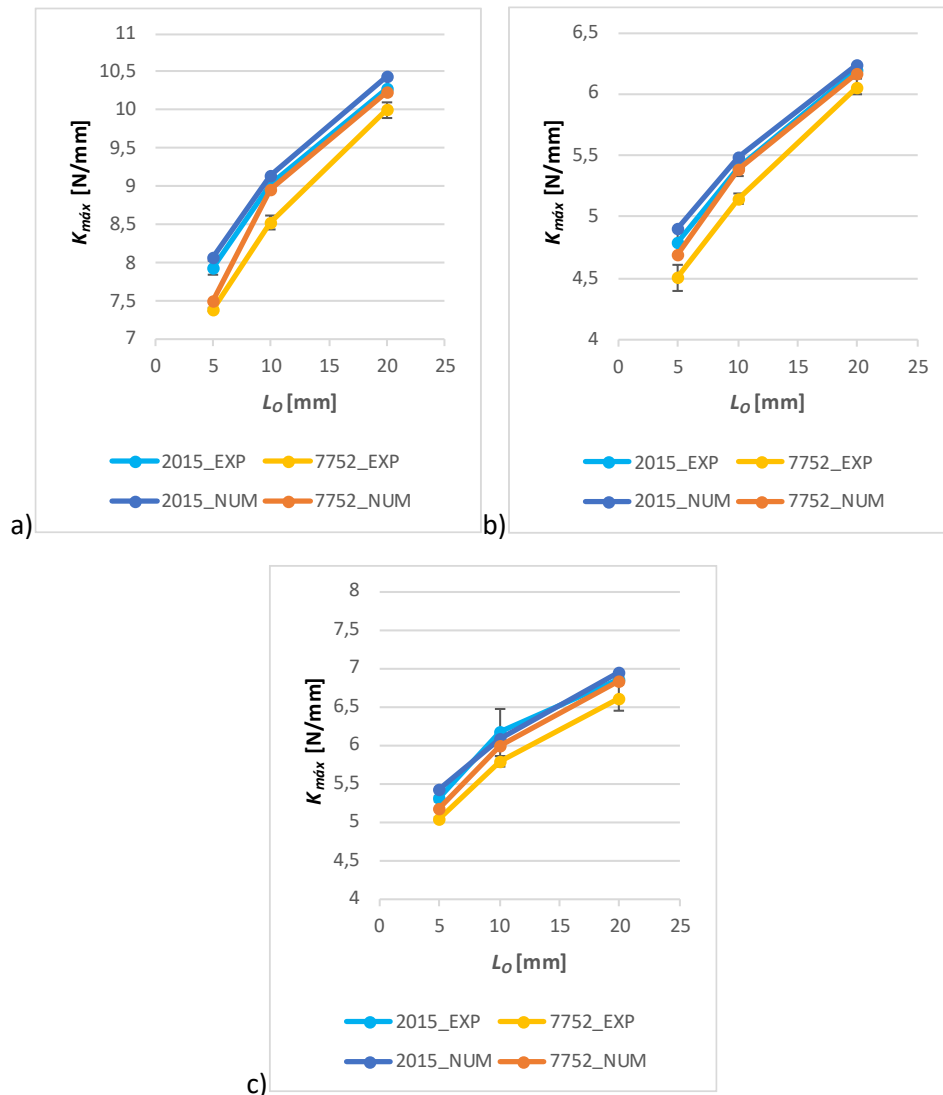


Figura 86 - Comparação de $K_{m\acute{a}x}$ numérico com experimental das juntas SLJ com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS

A Figura 87 mostra que a rigidez das juntas SCARF não apresenta uma evolução tão clara como a das juntas SLJ. Para o PLA observa-se até uma ligeira diminuição de $K_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_o , com variações de **8,15%**, **2,29%** e **20,37%** para os L_o de 5, 10 e 20 mm, respetivamente, no caso do adesivo 2015, e de **8,62%**, **11,22%** e **25,27%**, pela mesma ordem, no adesivo 7752. Para o PTEG, os valores de $K_{m\acute{a}x}$ variam entre **0,20%**, **0,77%** e **1,22%** com o adesivo 2015, e **2,35%**, **-0,21%** e **0,74%** com o adesivo 7752, respetivamente, para $L_o=5$, 10 e 20 mm. No caso do ABS, com o adesivo 2015, as variações entre valores numéricos e experimentais de $K_{m\acute{a}x}$ foram de **0,35%**, **1,62%** e **1,86%**, respetivamente, e com o adesivo 7752 os valores correspondentes foram **2,09%**, **5,11%** e **3,27%** para $L_o=5$, 10 e 20 mm. Esta tendência poderá estar associada à variabilidade experimental normal, inerente aos materiais utilizados, às dimensões reais das

juntas e às condições de ensaio. A divergência entre os resultados numéricos e experimentais é mais notória do que nas *SLJ*, o que reflete a complexidade geométrica destas juntas.

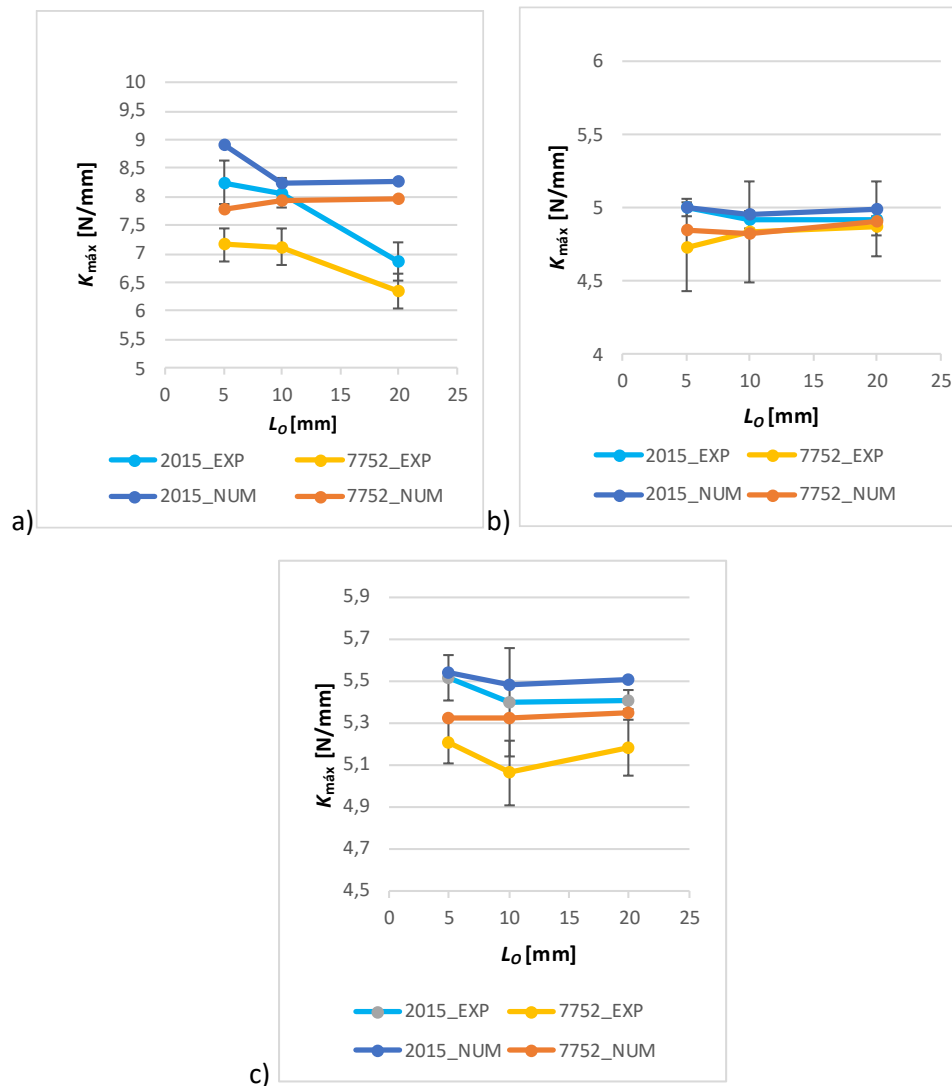


Figura 87 - Comparação de $K_{m\acute{a}x}$ numérico com experimental das juntas SCARF com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS

Na Figura 88 observa-se que a $K_{m\acute{a}x}$ das juntas *STEP* se mantém praticamente constante para todos os valores de L_o . As diferenças entre os valores experimentais e numéricos são moderadas, embora o modelo tenda a subestimar a resposta no caso do adesivo 7752. Para o PLA, as variações entre valores numéricos e experimentais de $K_{m\acute{a}x}$ variam entre **1,24%**, **0,45%** e **0,50%** para o adesivo 2015, respetivamente para os L_o de 5, 10 e 20 mm e entre **2,81%**, **4,19%** e **3,54%** para o adesivo 7752, pela mesma ordem. No PETG, verificam-se variações de **5,18%**, **4,17%** e **4,20%** (adesivo 2015), e de **1,01%**, **2,19%** e **1,63%** (adesivo 7752) para os mesmos L_o . Já para o ABS, os valores de $K_{m\acute{a}x}$ oscilam entre **2,86%**, **0,58%** e **1,34%** com o adesivo 2015 para os L_o de 5, 10 e 20 mm, e **0,75%**, **5,35%** e **1,03%** com o adesivo 7752, para a mesma ordem. A análise dos modos de rotura confirma a predominância de roturas no aderente, o que justifica a reduzida sensibilidade da rigidez para todos os L_o .

Desenvolvimento

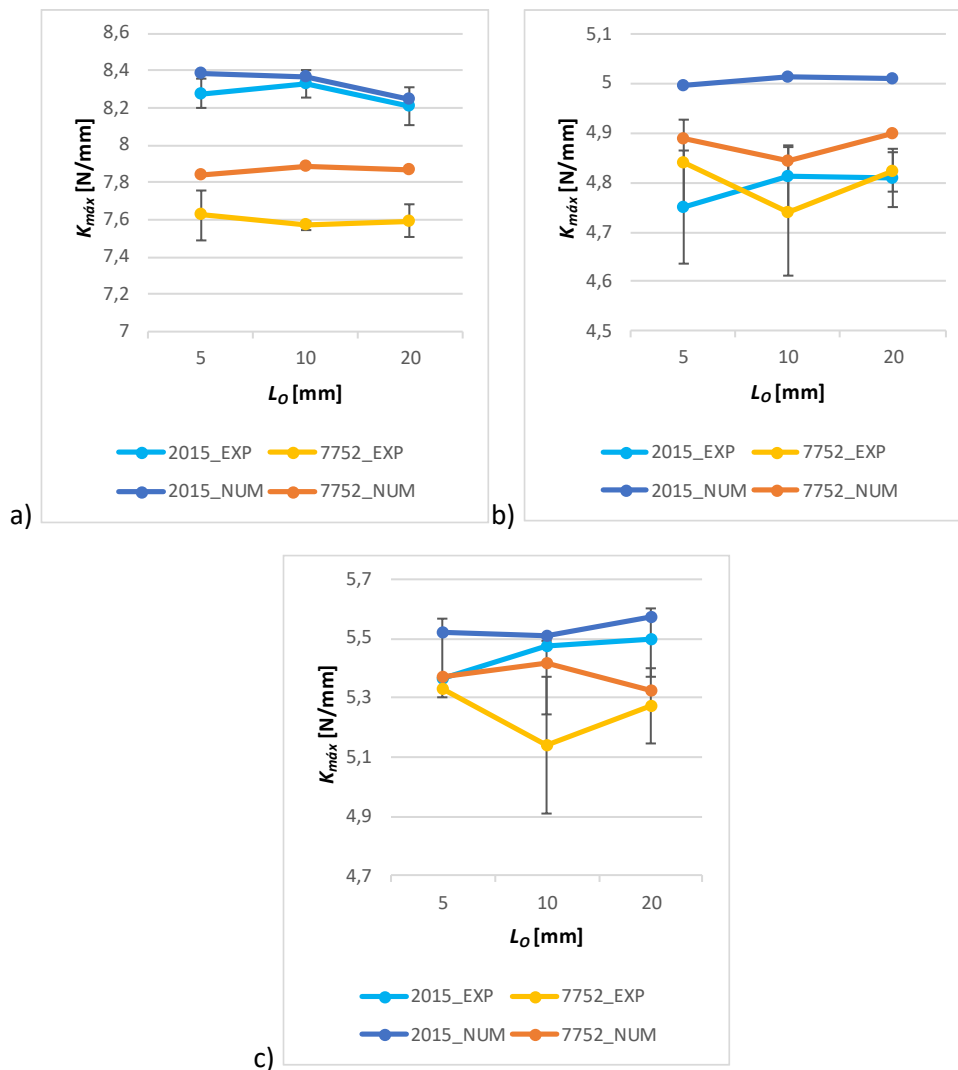


Figura 88 - Comparação de $K_{m\acute{a}x}$ numérico com experimental das juntas STEP com aderentes a) PLA, b) PETG e c) ABS

A comparação dos valores de $K_{m\acute{a}x}$ evidencia de forma clara o impacto da geometria da junta no seu desempenho mecânico. As juntas *SLJ* registaram consistentemente os valores mais elevados, sobretudo para maiores L_o , o que reflete a sua maior de resistir à deformação imposta pelo carregamento. Em contraste, as juntas *SCARF* apresentaram valores intermédios, posicionando-se entre as juntas *SLJ* e as *STEP*. As juntas *STEP*, por sua vez, revelaram o comportamento menos favorável, mantendo valores baixos e praticamente insensíveis ao aumento de L_o , o que confirma que a sua geometria não permite explorar de forma eficiente a capacidade resistente do adesivo devido à fragilização dos aderentes causada pela realização do degrau.

3.3.3. Energias de rotura

A Figura 89 mostra que a energia de rotura das juntas *SLJ* aumenta com L_o .

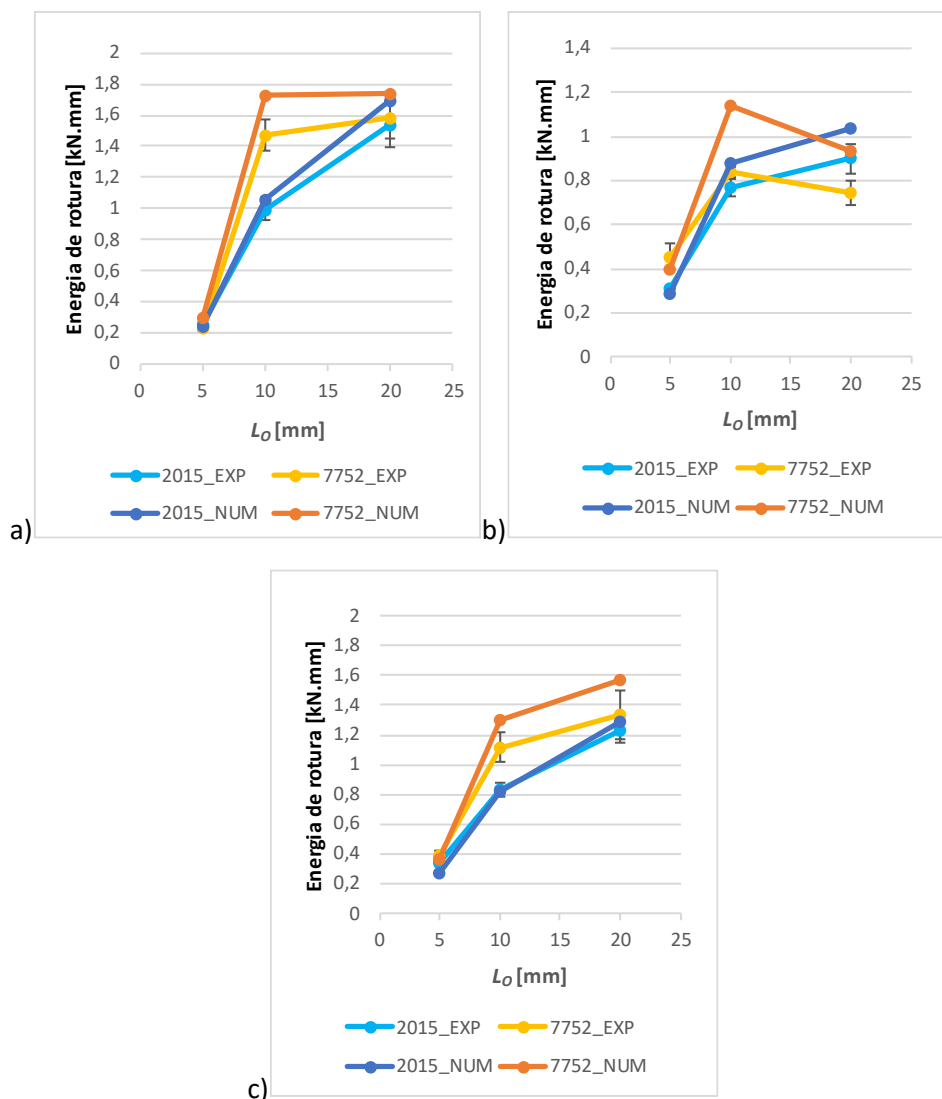


Figura 89 - Comparação de energia de rotura numérica com experimental das juntas *SLJ* com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS

Tal comportamento resulta da maior área de ligação envolvida na fratura e da ocorrência dominante de roturas coesiva nos adesivos, que favorecem a dissipação de energia. Para o PLA com 2015, as variações entre valores numéricos e experimentais de energia de rotura são de -5,58%, 6,82% e 10,37% para $L_0=5$, 10 e 20 mm respetivamente. Porém, com o 7752, as variações são 27,31%, 17,92% e 10,28%. Para o PETG, as variações experimentais com o adesivo 2015 são -9,88% para $L_0=5$ mm, 13,83% para $L_0=10$ mm e 15,30% para $L_0=20$ mm, enquanto com o 7752 as variações aumentam significativamente para -12,64%, 35,91% e 25,66% para $L_0=5$, 10 e 20 mm. Já para o ABS, com o 2015, as variações são -19,99%, -1,27% e 4,87% para $L_0=5$, 10 e 20 mm e, para 7752, as variações são -3,43%, 15,75% e 17,50% para $L_0=5$, 10 e 20 mm. A correspondência entre os resultados numéricos e experimentais é bastante satisfatória, reforçando a fiabilidade do modelo neste tipo de junta.

As curvas $P-\delta$ ajudam a explicar essas variações ao mostrar como os materiais e adesivos respondem sob carga. No PLA, a maior flexibilidade do adesivo 7752 e a dissipação de energia

não são totalmente capturadas pelas simulações, especialmente em L_o maiores, resultando em maiores variações experimentais. No PETG, a maior flexibilidade e deformação do material, especialmente com o adesivo 7752, causam uma distribuição não linear de tensões, o que leva a maiores diferenças entre os dados experimentais e numéricos, principalmente em L_o maiores. No ABS, a rigidez do material e as roturas abruptas resultam em maiores variações nos L_o maiores, onde o modelo subestima as tensões e deslocamentos, especialmente com o adesivo 7752. Estas variações refletem a dificuldade dos modelos em capturar comportamentos experimentais complexos, principalmente quando o adesivo é flexível ou o material é mais rígido.

A Figura 90 demonstra que a energia de rotura das juntas *SCARF* apresenta uma evolução crescente com L_o , de forma semelhante ao observado nas juntas *SLJ*, embora com algumas particularidades em função do material e do adesivo utilizados. Para o PLA, os desvios entre os resultados numéricos e experimentais com o adesivo 2015 foram de **3,99%**, **8,30%** e **25,04%** para $L_o=5$, 10 e 20 mm, respetivamente. Com o 7752, as variações foram de **1,45%**, **17,35%** e **18,52%** pela mesma ordem, revelando uma boa aproximação global do modelo, ainda que com uma tendência de aumento da discrepância em L_o maiores. No caso do PETG, as variações com o adesivo 2015 foram de **5,54%**, **7,79%** e **18,14%** para $L_o=5$, 10 e 20 mm, enquanto com o 7752 foram de **11,45%**, **8,58%** e **11,13%**, pela mesma ordem. Estes resultados sugerem uma resposta numérica satisfatória, com ligeiras variações que aumentam com L_o , particularmente com o adesivo mais flexível. Para o ABS, as variações com o adesivo 2015 foram de **11,43%**, **9,94%** e **9,19%** para $L_o=5$, 10 e 20 mm e com o 7752, de **15,57%**, **17,91%** e **7,84%**, pela mesma ordem.

As curvas $P-\delta$ ajudam a interpretar estas variações. No caso das juntas *SCARF*, o comportamento é fortemente influenciado pela geometria inclinada dos aderentes. No PLA, observa-se uma boa rigidez inicial, mas o adesivo 7752, sendo mais flexível, permite maior dissipação de energia, o que não é totalmente captado pelo modelo, sobretudo em L_o maiores. No caso do PETG, a elevada deformabilidade e a resposta não linear dos aderentes são mais difíceis de prever numericamente, o que justifica os desvios crescentes. No caso do ABS, a fratura é mais abrupta, mas a rigidez do material permite que o modelo acompanhe relativamente bem a resposta até ao pico, apesar das diferenças nos patamares finais, especialmente no adesivo 7752.

Estas observações reforçam a adequação do modelo numérico na previsão da energia de rotura das juntas *SCARF*, mas também evidenciam as limitações associadas à complexidade geométrica e ao comportamento dos materiais e adesivos, particularmente quando envolvem maior flexibilidade ou deformações não lineares.

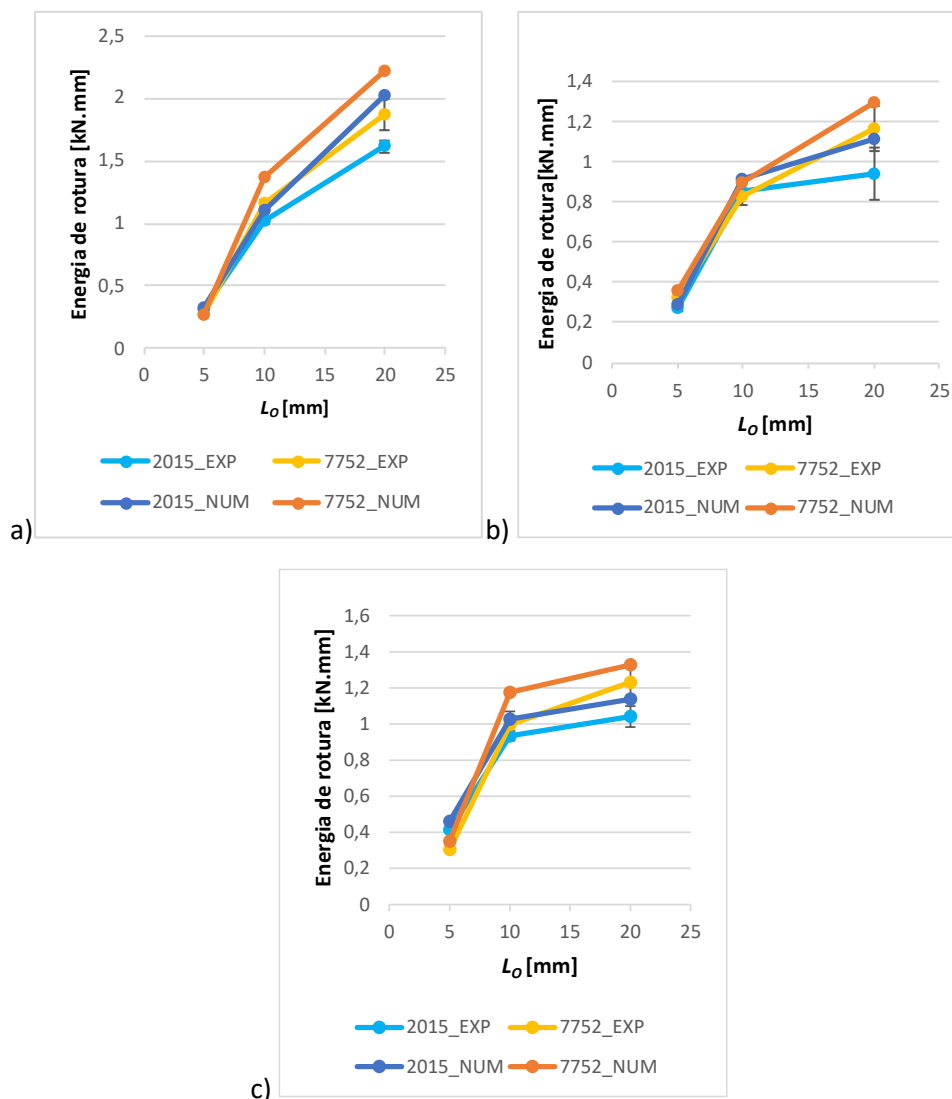


Figura 90 - Comparação de energia de rotura numérica com experimental das juntas SCARF com aderentes a) PLA, b) PETG e c) ABS

Por fim, a Figura 91 mostra que a energia de rotura das juntas *STEP* apresenta valores globalmente inferiores aos registados nas juntas *SLJ* e *SCARF*, que se mantêm relativamente estáveis com o aumento de L_0 . Esta estabilidade decorre da configuração geométrica característica das juntas *STEP*, que favorece a ocorrência de roturas pelo aderente, o que limita o envolvimento do volume total de adesivo no processo de fratura.

Para o PLA, com o adesivo 2015, os desvios percentuais entre os resultados numéricos e experimentais foram de **5,82%**, **5,31%** e **4,61%** para $L_0=5$, 10 e 20 mm, respetivamente, revelando uma boa concordância ao longo das diferentes configurações. Já com o adesivo 7752, os desvios aumentam para **15,08%**, **21,74%** e **24,62%**, pela mesma ordem, indicando que o modelo sobrestima a capacidade de dissipação do adesivo mais flexível, especialmente em L_0 maiores. No caso do PETG, as diferenças com o adesivo 2015 foram de **20,20%**, **69,17%** e **47,56%** para $L_0=5$, 10 e 20 mm, destacando-se como os valores mais discrepantes entre todos os materiais e adesivos analisados. Com o 7752, as variações foram de **6,44%**, **7,31%** e **19,85%**

Desenvolvimento

para $L_0=5, 10$ e 20 mm, que sugerem uma resposta numérica mais equilibrada, mas ainda com tendência à subestimação em L_0 maiores. Para o ABS com o 2015, as variações foram de **8,37%**, **3,98%** e **7,60%** para $L_0=5, 10$ e 20 mm, mantendo-se sempre abaixo de 10%, o que demonstra uma boa fidelidade do modelo. Em contraste, com o 7752, os desvios foram de **5,44%**, **5,47%** e **6,60%** pela mesma ordem, também revelando uma boa aproximação, embora com tendência sistemática à subestimação.

As curvas $P-\delta$ ajudam a interpretar estas diferenças, evidenciando que nas juntas *STEP* a fratura tende a ocorrer na interface adesivo/aderente, com pouca mobilização da deformação do adesivo. Assim, o modelo numérico representa adequadamente o comportamento quando o adesivo é mais rígido (como o 2015), mas tem dificuldade em capturar a dissipação de energia associada à maior flexibilidade do 7752, principalmente no PLA e PETG. No caso do ABS, a resposta mais linear e a rigidez do material permitem uma melhor previsão por parte do modelo, independentemente do adesivo.

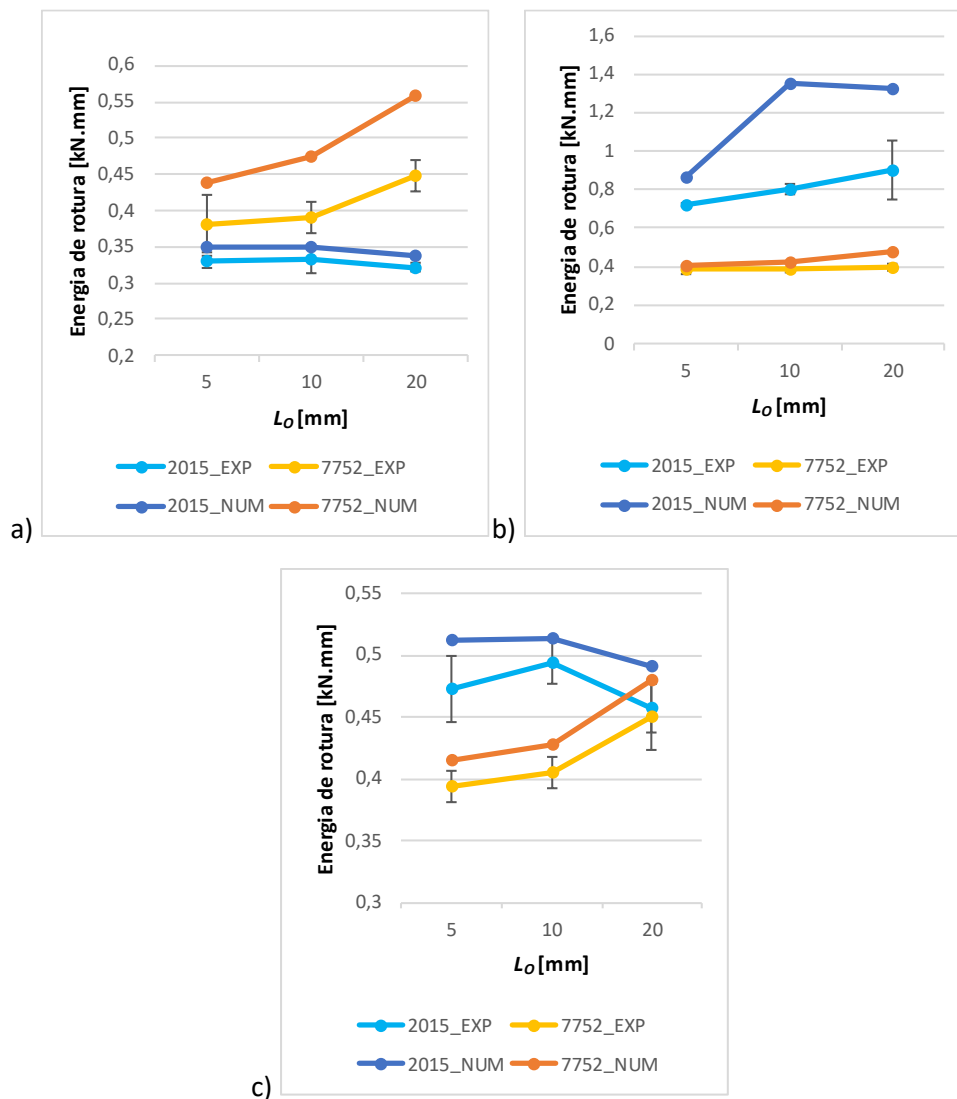


Figura 91 - Comparação de energia de rotura numérica com experimental das juntas *STEP* com aderentes de a) PLA, b) PETG e c) ABS

As juntas *SLJ* destacaram-se por apresentarem os valores mais elevados de energia de rotura, com o benefício da predominância de roturas coesivas que aumentam a ductilidade e ampliam a área sob a curva $P-\delta$. As juntas *SCARF* ocuparam uma posição intermédia, mostrando uma evolução positiva com o aumento de L_0 , mas sempre abaixo dos valores obtidos nas *SLJ*, devido à maior propensão para roturas nos aderentes que limitam a capacidade de dissipação. Já as juntas *STEP* confirmaram o desempenho menos satisfatório, com energias baixas e pouco influenciadas pelo L_0 , devido a todas as roturas ocorrerem nos aderentes.

Desenvolvimento

4. Conclusão

4.1. Conclusões finais

A presente dissertação pretende avaliar o desempenho de juntas adesivas quando submetidas a esforços de flexão. Para este efeito, foram utilizados aderentes fabricados por impressão 3D. Foram estudadas um total de três configurações geométricas distintas, *SLJ*, *SCARF* e *STEP*, em combinação com dois adesivos de naturezas contrastantes, o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752, e 3 aderentes, o PLA, o PETG e o ABS. O trabalho consistiu em ensaios experimentais e simulações numéricas baseadas em modelos de dano coesivo, que permitiram uma avaliação comparativa da resistência máxima, rigidez e energia de rotura.

A análise experimental evidenciou que o comportamento mecânico das juntas é fortemente influenciado pela geometria, condicionando o modo de rotura observado. Entre as geometrias avaliadas, a geometria *SCARF* apresentou o comportamento mais robusto, alcançando os valores mais elevados de resistência, rigidez e dissipação energética. A geometria *STEP* revelou-se intermédia, beneficiando da redistribuição gradual dos esforços, mas limitada pela vulnerabilidade das interfaces verticais. Já a geometria *SLJ* registou o desempenho menos favorável, com roturas prematuras por arrancamento e energia de rotura reduzida.

Quanto ao efeito dos adesivos, o Araldite® 2015 destacou-se pela sua maior rigidez inicial e resistência máxima, enquanto o Sikaforce® 7752, mais dúctil, proporcionou em determinadas condições valores superiores de energia dissipada. Assim, confirmou-se que a seleção do adesivo deve considerar o equilíbrio entre resistência e capacidade de deformação, em função das exigências da aplicação estrutural.

Do ponto de vista numérico, os modelos implementados reproduziram adequadamente as tendências globais observadas nos ensaios, nomeadamente a superioridade da geometria *SCARF* e a menor eficiência da *SLJ*. Contudo, observaram-se diferenças quantitativas: a resistência prevista foi geralmente superior à experimental, e a rigidez apresentou desvios mais significativos, atribuíveis às simplificações introduzidas na modelação dos aderentes e do comportamento não linear do adesivo. A energia de rotura foi o parâmetro com maior dispersão entre resultados numéricos e experimentais, refletindo a dificuldade em modelar de forma realista os mecanismos de rotura progressiva.

Em síntese, pode afirmar-se que:

- A geometria *SCARF* é a mais eficiente em flexão, combinando elevada resistência e rigidez com capacidade consistente de dissipação de energia;

Conclusão

- A geometria *STEP* apresenta um desempenho intermédio, mas condicionado pela ocorrência de roturas na zona onde há a redução do aderente;
- A geometria *SLJ* revelou-se a menos eficaz;
- O Araldite® 2015 mostrou-se superior em resistência e rigidez, enquanto o Sikaforce® 7752 evidenciou maior tenacidade em alguns casos;
- A modelação numérica acompanhou satisfatoriamente as tendências experimentais, embora com discrepâncias relevantes em termos de rigidez e energia.

4.2. Limitações e trabalhos futuros

Para dar continuidade ao presente trabalho e aprofundar o conhecimento sobre juntas adesivas em flexão, recomendam-se as seguintes linhas de investigação:

- Avaliar a influência da t_p e de L_o no desempenho global das juntas;
- Estudar o impacto de parâmetros de impressão 3D, como orientação de camadas e densidade de enchimento, nas propriedades mecânicas das ligações;
- Explorar a utilização de aderentes híbridos, combinando diferentes polímeros no mesmo elemento estrutural;
- Analisar o comportamento sob solicitações mais complexas, como fadiga e impacto, aproximando os ensaios a condições reais de serviço;
- Implementar modelos numéricos mais sofisticados, capazes de representar com maior fidelidade a propagação de fissuras e a dissipação de energia;
- Expandir o estudo a adesivos com gamas distintas de rigidez e tenacidade, de forma a otimizar a resposta em flexão para diferentes cenários de aplicação.

Referências

1. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindústria Portugal.
3. A.G.P., *INTRODUÇÃO. VANTAGENS E DESVANTAGENS. DEFINIÇÕES*. 2023/2024, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
4. Petrie, E., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, McGraw-Hill Education.
5. Ebnesajjad, S. e A.H. Landrock, *Adhesives technology handbook*. 2014: William Andrew.
6. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
7. E. W. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*. 1999. 1999.
8. Banea, M.D. e L.F. da Silva, *Adhesively bonded joints in composite materials: an overview*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2009. **223**(1): p. 1-18.
9. Hollaway, L.C. e M. Leeming, *Strengthening of reinforced concrete structures: Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*. 1999: Elsevier.
10. Skeist, I., *Handbook of Adhesives*. 2011. Springer Verlag: Berlin.
11. Higgins, A., *Adhesive bonding of aircraft structures*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000. **20**(5): p. 367-376.
12. Golaz, B., V. Michaud, S. Lavanchy, e J.-A. Manson, *Design and durability of titanium adhesive joints for marine applications*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **45**: p. 150-157.
13. Mays, G.C. e A.R. Hutchinson, *Adhesives in civil engineering*. Vol. 32. 1992: Cambridge University Press Cambridge, UK:.
14. Pantelakis, S. e K. Tserpes, *Revolutionizing aircraft materials and processes*. 2020: Springer.
15. Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. (No Title), 2011.
16. Vasconcelos Loureiro, A.M., S. Borschiver, e P.L.d.A. Coutinho, *Tendências Tecnológicas de Adesivos e Selantes Aplicados na Construção Civil*. Journal of technology management & innovation, 2009. **4**(2): p. 115-129.
17. Volkersen, O., *Die nietkrafterteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
18. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
19. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.

Referências

20. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
21. Panigrahi, S.K. e 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.
22. Campilho, R.D., *Strength prediction of adhesively-bonded joints*. 2017: CRC Press.
23. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
24. 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.
25. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
26. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
27. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
28. 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.
29. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
30. Duan, K., X. Hu, e 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.
31. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
32. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibeke, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
33. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
34. Carvalho, U.T.F. e 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 and Adhesives, 2017. **77**(Supplement C): p. 41-50.
35. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
36. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
37. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
38. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
39. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.

40. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. *Mechanics of Materials*, 2005. **37**(9): p. 955-979.
41. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *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.
42. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *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.
43. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *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.
44. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008. **28**(6): p. 302-313.
45. Chen, Z., R.D. Adams, e 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.
46. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
47. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **45**(5): p. 601-620.
48. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **46**(1): p. 131-150.
49. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
50. Barbosa, D., R. Campilho, R. Rocha, e L. Ferreira, *Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2019. **233**(3): p. 452-464.
51. Dionísio, J., L. Ramalho, I. Sánchez-Arce, R. Campilho, e J. Belinha, *Fracture mechanics approach to stress singularities in composite adhesive joints*. *Composite Structures*, 2021. **276**: p. 114507.
52. Ramalho, L.D., R.D. Campilho, J. Belinha, e L.F. da Silva, *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020. **96**: p. 102451.
53. Eusebio, S. e R. Campilho, *Modelling of tubular adhesively-bonded joints by the Extended Finite Element Method*. *Procedia Manufacturing*, 2019. **41**: p. 484-491.
54. Rosas, M., R. Campilho, e R. Moreira, *Numerical analysis of geometrical modification combinations of the tensile strength of tubular adhesive joints*. *Procedia Structural Integrity*, 2021. **33**: p. 115-125.
55. De Sousa, C., R. Campilho, E. Marques, M. Costa, e L.F. da Silva, *Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2017. **231**(1-2): p. 210-223.
56. Toyserkani, E., A. Khajepour, e S.F. Corbin, *Laser cladding*. 2004: CRC press.
57. Mallakpour, S., F. Tabesh, e C.M. Hussain, *3D and 4D printing: From innovation to evolution*. *Advances in colloid and interface science*, 2021. **294**: p. 102482.

Referências

58. Jandyal, A., I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, e M.I.U. Haq, *3D printing—A review of processes, materials and applications in industry 4.0*. Sustainable Operations and Computers, 2022. **3**: p. 33-42.
59. Al-Makky, M. e D. Mahmoud. *The importance of additive manufacturing processes in industrial applications*. in *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*. 2016. Military Technical College.
60. Beyer, C., *Strategic implications of current trends in additive manufacturing*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014. **136**(6): p. 064701.
61. Cotteleer, M. e J. Joyce, *3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth*. Deloitte review, 2014. **14**(1): p. 3-19.
62. Pérez, M., D. Carou, E.M. Rubio, e R. Teti, *Current advances in additive manufacturing*. Procedia Cirp, 2020. **88**: p. 439-444.
63. Toyserkani, E., D. Sarker, O.O. Ibadode, F. Liravi, P. Russo, e K. Taherkhani, *Metal additive manufacturing*. 2021.
64. Rosochowski, A. e A. Matuszak, *Rapid tooling: the state of the art*. Journal of materials processing technology, 2000. **106**(1-3): p. 191-198.
65. Gibson, I., D.W. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani, D. Rosen, B. Stucker, e M. Khorasani, *Additive manufacturing technologies*. Vol. 17. 2021: Springer.
66. Oks, S.J., M. Jalowski, M. Lechner, S. Mirschberger, M. Merklein, B. Vogel-Heuser, e K.M. Möslin, *Cyber-physical systems in the context of industry 4.0: A review, categorization and outlook*. Information Systems Frontiers, 2022: p. 1-42.
67. Herderick, E.D., *Progress in additive manufacturing*. Jom, 2015. **67**(3): p. 580-581.
68. Praveena, B., N. Lokesh, A. Buradi, N. Santhosh, B. Praveena, e R. Vignesh, *A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential*. Materials Today: Proceedings, 2022. **52**: p. 1309-1313.
69. Bikas, H., P. Stavropoulos, e G. Chryssolouris, *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **83**: p. 389-405.
70. Patel, K., V. Kalaichelvi, R. Karthikeyan, e S. Bhattathiri, *Modelling, simulation and control of incremental sheet metal forming process using CNC machine tool*. Procedia Manufacturing, 2018. **26**: p. 95-106.
71. Park, S., W. Shou, L. Makatura, W. Matusik, e K.K. Fu, *3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications*. Matter, 2022. **5**(1): p. 43-76.
72. Lee, J.-Y., J. An, e C.K. Chua, *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*. Applied materials today, 2017. **7**: p. 120-133.
73. Freeman, F.S., B. Thomas, L. Chechik, e I. Todd, *Multi-faceted monitoring of powder flow rate variability in directed energy deposition*. Additive Manufacturing Letters, 2022. **2**: p. 100024.
74. Sing, S., C. Tey, J. Tan, S. Huang, e W.Y. Yeong, *3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing*, in *Rapid prototyping of biomaterials*. 2020, Elsevier. p. 17-40.
75. Cano-Vicent, A., M.M. Tambuwala, S.S. Hassan, D. Barh, A.A. Aljabali, M. Birkett, A. Arjunan, e Á. Serrano-Aroca, *Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects*. Additive manufacturing, 2021. **47**: p. 102378.
76. Mohamed, O.A., S.H. Masood, e J.L. Bhowmik, *Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects*. Advances in manufacturing, 2015. **3**: p. 42-53.

77. Vock, S., B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, e B. Kieback, *Powders for powder bed fusion: a review*. Progress in Additive Manufacturing, 2019. **4**: p. 383-397.
78. Ngo, T.D., A. Kashani, G. Imbalzano, K.T. Nguyen, e D. Hui, *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composites Part B: Engineering, 2018. **143**: p. 172-196.
79. Rajora, A., R. Kumar, R. Singh, S. Sharma, S. Kapoor, e A. Mishra, *3D Printing: A Review on the transformation of additive manufacturing*. Int. J. Appl. Pharm, 2022. **14**: p. 35-47.
80. Melchels, F.P., M.A. Domingos, T.J. Klein, J. Malda, P.J. Bartolo, e D.W. Hutmacher, *Additive manufacturing of tissues and organs*. Progress in polymer science, 2012. **37**(8): p. 1079-1104.
81. Islam, R. e P. Sadhukhan, *An insight of 3d printing technology in pharmaceutical development and application: an updated review*. Curr Trends Pharm Res, 2020. **7**: p. 56-80.
82. Noorani, R., *3D printing: technology, applications, and selection*. 2017: CRC Press.
83. Gebhardt, A., *Understanding additive manufacturing*. 2011.
84. Herzog, D., V. Seyda, E. Wycisk, e C. Emmelmann, *Additive manufacturing of metals*. Acta Materialia, 2016. **117**: p. 371-392.
85. Kafle, A., E. Luis, R. Silwal, H.M. Pan, P.L. Shrestha, e A.K. Bastola, *3D/4D printing of polymers: fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA)*. Polymers, 2021. **13**(18): p. 3101.
86. Formlabs. *Form 2 Tech Specs*. 01/2025]; Disponível em: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/tech-specs/>.
87. Formlabs. *Fuse Series SLS 3D Printers Technical Specifications*. 01/2025]; Disponível em: <https://formlabs.com/3d-printers/fuse-1/tech-specs/>.
88. Formlabs. *Fuse 1+ 30W*. 01/2025]; Disponível em: <https://formlabs.com/eu/3d-printers/fuse-1/>.
89. Stratasys. *F900 Industrial 3D Printer*. 01/2025]; Disponível em: <https://www.stratasys.com/en/3d-printers/printer-catalog/fdm-printers/f900-printer/>.
90. Miyanaji, H., K.M. Rahman, M. Da, e C.B. Williams, *Effect of fine powder particles on quality of binder jetting parts*. Additive Manufacturing, 2020. **36**: p. 101587.
91. Sarkar, R., B. Chen, M.E. Fitzpatrick, T. Hilditch, e D. Fabijanic, *Blown-powder direct-energy-deposition of titanium-diboride-strengthened IN718 Ni-base superalloy*. Materials Science and Engineering: A, 2023. **885**: p. 145617.
92. Hsiang Loh, G., E. Pei, J. Gonzalez-Gutierrez, e M. Monzón, *An overview of material extrusion troubleshooting*. Applied Sciences, 2020. **10**(14): p. 4776.
93. Pérez, M., G. Medina-Sánchez, A. García-Collado, M. Gupta, e D. Carou, *Surface quality enhancement of fused deposition modeling (FDM) printed samples based on the selection of critical printing parameters*. Materials, 2018. **11**(8): p. 1382.
94. Elambasseril, J., M.J. Benoit, S. Zhu, M.A. Easton, E. Lui, C.A. Brice, M. Qian, e M. Brandt, *Effect of process parameters and grain refinement on hot tearing susceptibility of high strength aluminum alloy 2139 in laser powder bed fusion*. Progress in Additive Manufacturing, 2022. **7**(5): p. 887-901.
95. Bhatt, P.M., A.M. Kabir, M. Peralta, H.A. Bruck, e S.K. Gupta, *A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2019. **27**: p. 278-289.
96. Piedra-Cascón, W., V.R. Krishnamurthy, W. Att, e M. Revilla-León, *3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-*

Referências

- polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review*. Journal of Dentistry, 2021. **109**: p. 103630.
97. Karayel, E. e Y. Bozkurt, *Additive manufacturing method and different welding applications*. Journal of Materials Research and Technology, 2020. **9**(5): p. 11424-11438.
98. Formlabs, *3D Printing Threads and Adding Threaded Inserts to 3D Printed Parts*.
99. Goehrke, S., *Screw Threading in 3D Printed Objects Now a Reality, Thanks to Formlabs*, in *3DPrint.com*. 2014.
100. Song, P., Z. Fu, L. Liu, e C.-W. Fu, *Printing 3D objects with interlocking parts*. Computer Aided Geometric Design, 2015. **35**: p. 137-148.
101. Shields, G., *How to join and bond 3D printed parts*, in *PrintPool*. 2023.
102. Khosravani, M.R., P. Soltani, K. Weinberg, e T. Reinicke, *Structural integrity of adhesively bonded 3D-printed joints*. Polymer Testing, 2021. **100**: p. 107262.
103. Jeevi, G., S.K. Nayak, e M. Abdul Kader, *Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2019. **33**(14): p. 1497-1520.
104. Bak, K.M., K. Kalaichelvan, G. Vijayaraghavan, M. Dinesh, e V. Arumugam, *Study on the effect of adhesive thickness of single lap joints using acoustic emission and FEA*. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2013. **55**(1): p. 35-41.
105. Khosravani, M.R., P. Soltani, e T. Reinicke, *Failure and fracture in adhesively bonded 3D-printed joints: An overview on the current trends*. Engineering Failure Analysis, 2023: p. 107574.
106. Ascher, M., S. Brenner, G.A. Pang, e R. Späth, *Joining technology of additively manufactured components: effects on the bonding strength for the adhesive application through inner channels*. Progress in Additive Manufacturing, 2023. **8**(4): p. 711-718.
107. Bergonzi, L., A. Pirondi, F. Moroni, M. Frascio, e M. Avalle, *A study on additive manufacturing build parameters as bonded joint design factors*. The Journal of Adhesion, 2024. **100**(5): p. 576-605.
108. Frascio, M., E.A.d.S. Marques, R.J.C. Carbas, L.F.M. da Silva, M. Monti, e M. Avalle, *Review of tailoring methods for joints with additively manufactured adherends and adhesives*. Materials, 2020. **13**(18): p. 3949.
109. Farahbakhsh, M., Z.K. Rybkowski, U. Zakira, N. Kalantar, e I. Onifade, *Impact of robotic 3D printing process parameters on interlayer bond strength*. Automation in Construction, 2022. **142**: p. 104478.
110. Babcinski, M., F. Cruz, N. Duarte, S. Santos, S. Alves, e P. Neto, *Offline robot programming assisted by task demonstration: an AutomationML interoperable solution for glass adhesive application and welding*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2024: p. 1-12.
111. Kinloch, A.J., *Fracture behaviour of polymers*. 2013: Springer Science & Business Media.
112. Baldan, A., *Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment*. Journal of materials science, 2004. **39**: p. 1-49.
113. Oliveira, M.P. e L.F. Seraphim, *Resistência ao cisalhamento das juntas adesivas produzidas com três diferentes espécies de madeiras e adesivos vinílicos para aplicações não estruturais*. Revista Árvore, 2015. **39**(2): p. 375-384.
114. Silva, E.A.S.M.R.J.C.C.A.F.G.T.L.F.M.d., *INTRODUÇÃO ÀS LIGAÇÕES ADESIVAS ESTRUTURAS*, ed. L. Quântica Editora – Conteúdos Especializados. 2021, Engobook – Conteúdos de Engenharia: Engobook – Conteúdos de Engenharia.

115. Khosravani, M.R., P. Soltani, e T. Reinicke, *Effects of steps on the load bearing capacity of 3D-printed single lap joints*. *Journal of materials research and technology*, 2023. **23**: p. 1834-1847.
116. Öztürk, F.H., E. Marques, R. Carbas, e L. da Silva, *Experimental and numerical study on mechanical behavior of 3D printed adhesive joints with polycarbonate substrates*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024. **141**(29): p. e55657.
117. Khosravani, M.R., P. Soltani, e T. Reinicke, *Fracture and structural performance of adhesively bonded 3D-printed PETG single lap joints under different printing parameters*. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021. **116**: p. 103087.
118. Testing, A.S.f. e Materials, *ASTM D 638-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. 2008, American National Standards Institute New York.
119. intecinstruments. Disponível em: https://www.intecinstruments.com/product/product_detail/65.
120. Standard, B. e B. ISO, *Plastics—Determination of tensile properties—*. Part, 1996. **1**: p. 527-521.
121. Ribeiro, T., R. Campilho, R. Pinto, e R. Rocha, *Structural behaviour of adhesive bonds in 3D printed adherends*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2024: p. 1-25.
122. Ribeiro, T.F., R.D. Campilho, R.F. Pinto, e R.J. Rocha, *Scarf Adhesive Bonding of 3D-Printed Polymer Structures*. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2025. **9**(4): p. 115.
123. Ribeiro, T.F.R., *Análise do comportamento estrutural de ligações adesivas em aderentes impressos em 3D*. 2023, Instituto Politecnico do Porto (Portugal).
124. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, e L.F. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. *International journal of adhesion and adhesives*, 2013. **44**: p. 48-56.
125. Ubuy. Disponível em: <https://www.ubuy.com.pt/en/product/10P7K2ZK-huntsman-araldite-2015-toughened-epoxy-gel-for-smc-grp-fiberglass-200ml-w-mixing-gun?ref=hm-google-redirect>.
126. Sommerfeld+thiele. Disponível em: https://www.google.com/search?q=Sikaforce%C2%AE+7752+FRW+L60+&udm=2&sxsrf=AHTn8zroS-Rtc8Qa_3Sh2cdoXM1nx0A6hw%3A1747418989312#vhid=Pbz8wl3HjMfBfM&vssid=mosaic.
127. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014.
128. Askeland, D.R., P.P. Phulé, W.J. Wright, e D. Bhattacharya, *The science and engineering of materials*. 2003.
129. Pinto, A.M.G., A. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M. De Moura, e A. Baptista, *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. *The Journal of Adhesion*, 2009. **85**(6): p. 351-376.
130. Zhu, Y., Y. Zhang, e L. Xiang, *Crack Propagation Behavior Modeling of Bonding Interface in Composite Materials Based on Cohesive Zone Method*. *Buildings*, 2025. **15**(10): p. 1717.
131. Rocha, R. e R. Campilho, *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints*. *The Journal of Adhesion*, 2018. **94**(7): p. 562-582.
132. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. *International Journal of Solids and Structures*, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.

Referências

133. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
134. Lee, M.J., T.M. Cho, W.S. Kim, B.C. Lee, e J.J. Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
135. Pandya, K. e J. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
136. Standard, A., *D3433-99: Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2012.
137. Constante, C., R. Campilho, e D. Moura, *Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques*. Engineering Fracture Mechanics, 2015. **136**: p. 292-304.
138. Campilho, R., D.C. Moura, M.D. Banea, e L.F. da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
139. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. 1968.
140. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e K. Salomonsson, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
141. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.
142. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 86-95.
143. Azevedo, J.C.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, T.M.S. Faneco, e R.M. Lopes, *Cohesive law estimation of adhesive joints in mode II condition*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015. **80**: p. 143-154.
144. Campilho, R., A. Pinto, M. Banea, R. Silva, e L.F. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
145. Monajati, L., A. Vadean, e R. Boukhili, *Mechanical Behavior of Adhesively Bonded Joints Under Tensile Loading: A Synthetic Review of Configurations, Modeling, and Design Considerations*. Materials, 2025. **18**(15): p. 3557.
146. Barbosa, N., R. Campilho, F. Silva, e R. Moreira, *Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures*. Applied Adhesion Science, 2018. **6**(1): p. 15.

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Fábio André Fernandes Silva Magalhães

ISEP, Porto, 06 de Setembro de 2025

Anexo A

PLA TDS

Poly lactide

Product Description

AzureFilm PLA (Polylactide) is a filament with good mechanical properties and excellent printing quality. This filament is suitable for parts that require high strength and stiffness and easy processability (no warping, no irritating smell).

Properties

Property of 3D printed specimens	Test condition	PLA
Tensile modulus [MPa]	1 mm/min	3,3
Tensile strength [MPa]	50 mm/min	59,0
Strain at break (Tensile) [%]	50 mm/min	4,2
Strain at tensile strength [%]	50 mm/min	3,8
Flexural modulus [GPa]	2 mm/min	2,8
Flexural strength [MPa]	2 mm/min	73,6
Flexural strain at flexural strength [%]	2 mm/min	3,3
Strain at break (Flexural) [%]	2 mm/min	3,3
Charpy unnotched [kJ/m ²]	23 °C	10,4

Test specimens print settings

3D printer: AzureFilm	Infill: 20 %	Nozzle temperature: 200 °C
Slicer: Cura	Shells: 2	Bed temperature: 55 °C
Nozzle: 0,4 mm	Layer height: 0,3 mm	Print speed: 50 mm/s

Printing Recommendations

Nozzle temperature: 200 – 230°C
 Heated bed: Not required (recommended 50-60 °C)
 Print speed: 50 – 100 mm/s
 Build platform: Blue tape, Kapton tape, Glass bed, Wood bed

PETG TDS

AzureFilm PETG (Copolyester) for FDM 3D Printers

Product Description

AzureFilm PETG (Copolyester) filament is a plastic thread that combines the properties of the ABS filament (solid, temperature-resistant, extremely durable, flexible) and the PLA filament (easy to print). Because of these properties, PETG is a filament material for 3D printing that you must have.

Properties

Property of 3D printed specimens	Test method	Value
Material	Copolyester	Color Transparent
Specific Density	ASTM D-792	1,29 g/cm ³
Tensile Yield Stress	ISO 527-2	51 MPa
Tensile Modulus	ISO 527-2	2980 MPa
Tensile Stress at Break	ISO 527-2	20 MPa
Elongation at yield	ISO 527-2	4%
Elongation at break	ISO 527-2	29%
Flexural Modulus	ISO 178	2040 MPa
Flexural Strength	ISO 178	68 MPa

Test specimens print settings

3D printer: AzureFilm	Infill: 100 %	Nozzle temperature: 230 °C
Slicer: Cura	Shells: /	Bed temperature: 80-90 °C
Nozzle: 0,4 mm	Layer height: 0,2 mm	Print speed: 50 mm/s

Printing Recommendations

Nozzle temperature: 220 – 240°C
 Heated bed: recommended 80-90 °C
 Print speed: 50 – 200 mm/s
 Build platform: Blue tape, Kapton tape. Recommended: Glass bed + Dimafix spray

ABS-X

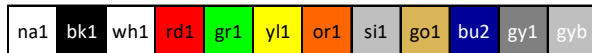
ABS-X is our take on a next-generation ABS filament. By applying our zero-warp technology to the filament we have created a filament with far less cracking, proven near perfect interlayers, reliable bed adhesion (glass, tape & other adhesives) while improving the mechanical properties making ABS-X extra strong. These properties make ABS-X the ultimate ABS replacement that prints strong and beautiful parts on any FDM 3D printer without the common headaches associated with regular ABS like warping & horrible bed adhesion. ABS-X is the perfect material for strong objects that require a high impact tolerance.

Material features:

- Zero warp technology
- Excellent interlayer adhesion
- Reliable bed adhesion (Glass, tape & other adhesives)
- Enhanced mechanical properties over regular ABS
- Great strength & aesthetics

Colours:

ABS-X is available from stock in 12 colours. Other colours on request.



Packaging:

ABS-X is available in nearly any type of packaging and labelling. Ask our team to help you customizing your product.

Filament specs.

Size	Ø tolerance	Roundness
1,75mm	± 0,05mm	≥ 95%
2,85mm	± 0,10mm	≥ 95%

Material properties

Description	Testmethod	Typical value
Specific gravity	ISO 1183	1,1 g/cc
MFR 260°C/5 kg	ISO 1133	41 gr/10 min
Tensile strength at yield	ISO 527	43,6 MPa
Strain at break	ISO 527	34%
Tensile Modulus	ISO 527	2030 MPa
Impact strength - Charpy method 23°C (notched)	ISO 179	58 kJ/m ²
Printing temp.	DF	245±10 °C
Melting temp.	ISO 294	235±10 °C
Vicat softening temperature	ISO 306	97°C

Additional info:

Recommended temperature for heated bed is ± 80°C.

ABS-X is printed at high temperatures to make the final product extra strong.

ABS-X can be used on all common desktop FDM or FFF technology 3D printers.

Storage: Cool and dry (15-25°C). This enhances the shelf life significantly.