



Análise do comportamento estrutural de ligações adesivas em aderentes impressos em 3D

TIAGO FILIPE RODRIGUES RIBEIRO

outubro de 2023

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LIGAÇÕES ADESIVAS EM ADERENTES IMPRESSOS EM 3D

Tiago Filipe Rodrigues Ribeiro

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LIGAÇÕES ADESIVAS EM ADERENTES IMPRESSOS EM 3D

Tiago Filipe Rodrigues Ribeiro

1171037

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Engenheiro Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pelas longas noites no laboratório de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto na realização da preparação das juntas adesivas, nos seus ensaios e pelo apoio e disponibilidade prestada durante todo o processo de realização desta dissertação.

Agradeço, de coração cheio, aos meus pais, Maria e Agostinho pelo apoio infindável e trabalho por me ajudarem a tornar a pessoa que hoje sou porque sem eles, esta longa caminhada não seria possível.

Dedico um especial agradecimento à minha namorada, Inês Veríssimo, por sempre me apoiar e não deixar desistir quando o difícil parecia impossível.

Um enorme agradecimento aos meus colegas de curso e amigos que me acompanharam nesta aventura.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela disponibilidade dos meios necessários para a realização da presente dissertação.

RESUMO

Os processos de fabrico aditivo, conhecidos como impressão 3D, estão em processo de crescimento e cada vez mais são as indústrias que procuram soluções nestes tipos de processos devido às suas vantagens em comparação com processos mais tradicionais, como maquinagem e injeção. Dessas vantagens destacam-se a redução do tempo de fabrico de uma ideia até ao seu primeiro protótipo, a sua sustentabilidade e a liberdade de geometrias a executar.

Porém, as dimensões dos componentes fabricados por estes métodos ainda são bastante reduzidas. Até que este problema se resolva, é essencial arranjar soluções para os casos em que é necessário uma montagem e fixação dos componentes fabricados. Uma das soluções passa pelas ligações adesivas. Este tipo de ligação permite unir diferentes materiais, sem danificar os próprios componentes, permite várias configurações de união, associados a boas propriedades mecânicas e redução de peça das estruturas. A união de componentes impressos em 3D por ligações adesivas, é algo ainda em desenvolvimento, devido a estes campos estarem também em crescimento.

Esta dissertação consiste no trabalho experimental e numérico de diferentes tipos de juntas adesivas com as geometrias de sobreposição simples, com degrau e em chanfro interior para diferentes comprimentos de sobreposição. Os substratos em estudo serão materiais plásticos facilmente adquiridos como o PLA, ABS e PETG fabricados pelo processo *Fused Deposition Modeling* (FDM). Os adesivos em estudo serão o Araldite®2015 e o Sikaforce®7752. Previamente ao trabalho experimental das juntas adesivas, realizaram-se ensaios experimentais aos materiais de aderentes de forma a se obter as suas propriedades mecânicas. As propriedades obtidas serão aplicadas no estudo numérico. O estudo experimental das juntas adesivas apresenta-se sobre a forma de curvas $P-\delta$ e resistência de juntas, rigidez e energia de rotura. A parte numérica do estudo consistiu na aplicação do Método de Elementos Finitos através dos modelos de dano coesivo com a lei triangular para a previsão do comportamento de juntas. O estudo numérico consiste na análise numérica e no modelo de dano utilizado na previsão das juntas sobre a forma dos modos de rotura, curvas $P-\delta$ e resistência das juntas, rigidez e energias de rotura.

Em termos de conclusão, é possível afirmar que de forma geral os modelos de dano coesivo apresentaram previsões precisas. Das diferentes condições de geometria de junta, aderentes e adesivos chegou-se à conclusão que com a geometria de chanfro permite obter melhores resultados de resistência, rigidez e energia de rotura com comprimentos de sobreposição mais elevados. Em relação aos aderentes, o PLA foi o que permitiu obter juntas adesivas com maior resistência, contudo foi o ABS que permitiu obter mais energia de rotura, na generalidade dos casos. Das condições estudadas, a geometria de chanfro com aderentes de PLA e adesivo Araldite®2015 apresentou os melhores resultados nos diferentes parâmetros analisados.

PALAVRAS-CHAVE

Impressão 3D, *Fused Deposition Modeling*, Ligações adesivas, Análise de juntas adesivas, Método de Elementos Finitos, Modelo de dano coesivo, Plastificações de aderentes

ABSTRACT

Additive manufacturing processes, also known as 3D printing, are experiencing growth and more industries are seeking solutions in these types of processes due to their advantages compared to more traditional processes such as machining and injection. These advantages include reducing the manufacturing time from an idea to its first prototype, sustainability, and the freedom to execute geometries.

However, the dimensions of components manufactured by these methods are still quite small. Until this problem is solved, it's necessary to find solutions for cases where assembly and fixation of manufactured components are necessary. One solution is adhesive bonding. This type of bonding allows for the joining of different materials and is associated with good mechanical properties and a reduction in the cost of structures. The joining of 3D-printed components by adhesive bonding is still in its early stages, due to both of these fields also being in growth. This work will analyze the current situation of these manufacturing processes, adhesive bonding and how these two fields are interconnected.

This dissertation consists of experimental and numerical work on different types of adhesive joints with simple lap, single step and scarf geometries for different overlap lengths. The materials under study will be readily available plastics such as PLA, ABS and PETG manufactured using the fused deposition modeling (FDM) process. The adhesives under study will be Araldite®2015 and Sikaforce®7752. Prior to the experimental work on the adhesive joints, experimental tests were carried out on the adherend materials in order to obtain their mechanical properties. The properties obtained will be applied in the numerical study. The experimental study of the adhesive joints is presented in the form of P- δ curves and joint strength, stiffness and breaking energy. The numerical part of the study consisted of applying the Finite Element Method using cohesive damage models with the triangular law to predict joint behavior. The numerical study consists of the numerical analysis and the damage model used to predict the joints in terms of failure modes, P- δ curves and joint strength, stiffness and failure energies.

In conclusion, it can be said that in general the cohesive damage models provided accurate predictions. From the different conditions of joint geometry, adherends and adhesives, it was concluded that with the chamfer geometry it is possible to obtain better results in terms of strength, stiffness and rupture energy with longer overlap lengths. As far as adherents are concerned, PLA was the one that made it possible to obtain adhesive joints with the greatest strength, but it was ABS that made it possible to obtain the highest breaking energy in most cases. Of the conditions studied, the chamfer geometry with PLA adherents and Araldite®2015 adhesive showed the best results in the different parameters analyzed.

KEYWORDS

3D-printing, Fused Deposition Modeling, Adhesive joints, Analysis of adhesive joints, Finite element method, Cohesive damage model, Adherent plasticization

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Organização do relatório.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Fabrico aditivo	3
2.1.1. Possibilidades e limitações do fabrico aditivo	4
2.1.2. Aplicações de fabrico aditivo	5
2.1.3. Categorias de Fabrico Aditivo	7
2.1.3.1. Binder jetting.....	7
2.1.3.2. Directed energy deposition.....	8
2.1.3.3. Material extrusion.....	9
2.1.3.4. Material jetting.....	10
2.1.3.5. Powder bed fusion	11
2.1.3.6. Sheet Lamination.....	12
2.1.3.7. Vat polymerization	12
2.1.4. Estado da Arte.....	13
2.2. Ligações adesivas.....	16
2.2.1. Características gerais	16
2.2.2. Configurações de junta mais comuns	16
2.2.3. Esforços em ligações adesivas	16
2.2.4. Modos de rotura	17
2.2.5. Aplicações	18
2.2.6. Previsão de resistência.....	19
2.2.6.1. Mecânica dos meios contínuos	19
2.2.6.1.1. Métodos analíticos.....	20
2.2.6.1.2. Métodos numéricos	20
2.2.6.2. Mecânica da fratura	21
2.2.6.3. Modelos de dano coesivo.....	21
2.2.6.4. Mecânica do dano	22
2.2.6.5. Métodos dos Elementos Finitos Extendidos	22
2.3. Ligações adesivas em componentes de fabrico aditivo	23
2.3.1. Ligações entre componentes de fabrico aditivo.....	23
2.3.2. Ligações adesivas em aderentes fabricados por AM	24
2.3.2.1. Ensaio experimentais.....	25

2.3.3. Modelação numérica	27
3. DESENVOLVIMENTO	29
3.1. Trabalho experimental	29
3.1.1. Determinação das propriedades dos aderentes	29
3.1.1.1. Parâmetros de impressão	29
3.1.1.2. Processo de fabrico e ensaio	30
3.1.1.3. Fabrico de provetes <i>bulk</i>	32
3.1.1.4. Ensaio de tração	33
3.1.1.5. Modos de rotura	37
3.1.1.6. Análise de resultados	37
3.1.1.7. Curvas $P-\delta$	38
3.1.1.8. Curvas $\sigma-\varepsilon$ nominais e reais	39
3.1.1.9. Resumo e análise de resultados	41
3.1.2. Ensaio das juntas adesivas	44
3.1.2.1. Geometria das juntas	44
3.1.2.2. Adesivos utilizados	45
3.1.3. Processo de fabrico	48
3.1.4. Ensaio de tração	53
3.1.4.1. Modos de rotura	54
3.1.4.2. Curvas $P-\delta$ e resistência das juntas	58
3.1.4.3. Rigidez máxima das juntas	69
3.1.4.4. Energias de rotura	74
3.2. Trabalho numérico	81
3.2.1. Preparação dos modelos numéricos	81
3.2.2. Modelo coesivo triangular	87
3.2.3. Determinação dos parâmetros coesivos	88
3.2.4. Araldite® 2015	89
3.2.5. Sikaforce® 7752	90
3.3. Resultados	90
3.3.1. Modos de propagação de dano e rotura	91
3.4. Curvas $P-\delta$ e resistência das juntas	99
3.5. Rigidez máximas das juntas	106
3.6. Energia de rotura	109
3.7. Comparação de resultados experimentais e numéricos	112
3.7.1. $P_{máx}$ e resistência das juntas	112
3.7.2. Rigidez das juntas	118
3.7.3. Energia de rotura	122
4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	129
4.1. Conclusões	129
4.2. Propostas de trabalhos futuros	130

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
ANEXO A	139
ANEXO B	141
ANEXO C	143
ANEXO D	145
ANEXO E	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Primeira impressora 3D comercializada, de Charles Hull [5]	3
Figura 2 - Processo de fabrico de um componente por AM [7]	4
Figura 3 – Exemplo de estrutura geodésica concêntrica [11]	4
Figura 4 – Aplicação de AM: a) por setor; b) por aplicação [7, 15]	6
Figura 5 - Aplicação de AM na área medicinal [17].....	6
Figura 6 - Componentes fabricados por AM na indústria automóvel: a) Pinça de travão fabricado por Bugatti; b) Turbocompressor fabricado por Koenigsegg [19]	7
Figura 7 - Produção de autocarro OLLI, pela empresa Local Motors [20]	7
Figura 8 - Esquema representativo de <i>binder jetting</i> [26]	8
Figura 9 - Esquema representativo do DED [27]	9
Figura 10 – Processo FDM com dois materiais [29]	10
Figura 11 - Esquema representativo de <i>material jetting</i> [26].....	11
Figura 12 - Esquema representativo de PBF [26].....	11
Figura 13 - Esquema representativo de <i>sheet lamination</i> [26].....	12
Figura 14 - Esquema representativo de <i>vat polymerization</i> [26].....	13
Figura 15 - Padrões de enchimento utilizados por Alafaghani e Qattawi: a) enchimento retilíneo; b) enchimento triangular; c) enchimento hexagonal [42]	14
Figura 16 - Diferentes tipos de juntas [47].....	16
Figura 17 - Tipos de carregamento em juntas adesivas [48]	17
Figura 18 - Esforços em juntas adesivas a) Tração e compressão; b) Corte; c) Clivagem e arrancamento [46]	17
Figura 19 - Tipos de rotura de juntas adesivas [45]	18
Figura 20 - Aplicações de adesivo em automóveis [52]	19
Figura 21 - Aplicação de adesivos em aviões [55].....	19
Figura 22 - Utilização de ligações adesivas em pequenas embarcações [54]	19
Figura 23 - Representação geométrica de k analisado por Goland e Reissner [45]	20
Figura 24 - Simulação de elementos coesivos de rotura de espessura nula: a) aproximação local; b) aproximação continua [71]	21
Figura 25 - Exemplo de encaixe fabricado por FDM [82]	23
Figura 26 - Porcas de inserção de rosca: a) com pressão; b) com calor.....	23
Figura 27 - Componente fabricado por AM pelo processo PBF com diferentes métodos de rosca [83]	24
Figura 28 – Variação de θ nas juntas realizadas por Nash and Li [90]	26
Figura 29 - Diferentes degraus aplicados por Khosravani, et al. [91]	26
Figura 30 - Estágios de deformação do adesivo: a) 1º; b) 2º; c)3º [89]	27
Figura 31 - Evolução da rotura coesiva do adesivo, Khosravani, et al. [91].....	28
Figura 32 - Impressoras utilizadas na impressão dos aderentes: a) Ender 3 Max; b) Ender 6.....	30
Figura 33 - Orientação do provete <i>bulk</i> no <i>slicer</i> Ultimaker Cura®	31
Figura 34 - Parâmetros de impressão aplicados no <i>slicer</i> Ultimaker Cura®	31
Figura 35 - Dimensões de provete <i>bulk</i> - Norma ASTM D638 Tipo I.....	32
Figura 36 - Impressão de provetes <i>bulk</i> : a) PLA laranja; b) PETG amarelo e c) ABS vermelho.....	32
Figura 37 - Exemplo de má adesão após retirada da mesa de impressão	33

Figura 38 - Provetes <i>bulk</i> (PLA laranja à esquerda; PETG amarelo ao centro; ABS vermelho à direita)	33
Figura 39 – Máquina de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100	35
Figura 40 - Ensaio de tração de provete ABS: a) com extensómetro mecânico e b) após remoção do extensómetro	36
Figura 41 - Roturas dos provetes <i>bulk</i> : a) PLA; b) PETG e c) ABS	36
Figura 42 - Secções dos provetes <i>bulk</i> após rotura: a) PLA; b) PETG e c) ABS	37
Figura 43 - Curvas $P-\delta$ dos provetes <i>bulk</i> de PLA	38
Figura 44 - Curvas $P-\delta$ dos provetes <i>bulk</i> de PETG	39
Figura 45 – Curvas $P-\delta$ dos provetes <i>bulk</i> de ABS	39
Figura 46 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ dos provetes <i>bulk</i> de PLA	40
Figura 47 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ dos provetes <i>bulk</i> de PETG	40
Figura 48 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ dos provetes <i>bulk</i> de ABS	40
Figura 49 - Determinação da tensão limite elástico à tração a 0,2% (ABS - provete 2)	41
Figura 50 - Comparação de curvas $\sigma-\varepsilon$ dos diferentes materiais	44
Figura 51 - Diferentes geometrias de junta: a) SLJ; b) <i>step</i> ; c) <i>scarf</i>	44
Figura 52 - Geometria <i>scarf</i> com os diversos valores de α e respetivos valores de L_0 : a) $L_0= 5$ mm; b) $L_0= 10$ mm; c) $L_0= 20$ mm	45
Figura 53 - Adesivo Araldite® 2015	46
Figura 54 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ obtidas por ensaios a provetes <i>bulk</i> de adesivo Araldite®2015 [101]	46
Figura 55 - Adesivo Sikaforce® 7752 FRW L60	47
Figura 56 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ obtidas por ensaios a provetes <i>bulk</i> de adesivo Sikaforce®7752 [102]	47
Figura 57 - Impressão 3D de aderentes: a) SLJ em PLA; b) <i>scarf</i> em PETG e c) <i>step</i> em ABS	49
Figura 58 – Processo de lixagem e limpeza: a) sem preparação da superfície; b) após preparação da superfície	50
Figura 59 - Aplicação de adesivo Araldite® 2015	50
Figura 60 - Preparação de adesivo Sikaforce® 7752: a) pesagem de 100 g de resina e aplicação do endurecedor; b) mistura homogénea dos componentes	51
Figura 61 - Sessão de preparação de juntas PETG com Araldite® 2015	51
Figura 62 – Fixação das juntas durante o processo de cura do adesivo: a) SLJ; b) junta <i>scarf</i> e c) junta <i>step</i>	52
Figura 63 – Remoção do excesso de adesivo na furadora equipada com mó: a) antes da limpeza e b) após a limpeza	53
Figura 64 - Ensaio de tração das juntas: a) <i>step</i> com PLA; b) SLJ com PETG; c) <i>scarf</i> com ABS	53
Figura 65 - Ensaio de tração das juntas com rotura iminente: a) SLJ com ABS; b) <i>step</i> com PETG	54
Figura 66 - Curvas $P-\delta$ para as SLJ com PLA: a) 2015; b) 7752	58
Figura 67 - Curvas $P-\delta$ para as SLJ com ABS: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752	59
Figura 68 - Curvas $P-\delta$ para as SLJ com PETG: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752	59
Figura 69 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_0 por adesivo e aderente para as SLJ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo	60
Figura 70 - Curvas $P-\delta$ para as juntas <i>step</i> com PLA: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752	62
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ para as juntas <i>step</i> com ABS: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752	62
Figura 72 - Curvas $P-\delta$ para as juntas <i>step</i> com PETG: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752	63
Figura 73 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria <i>step</i> ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo	63

Figura 74 - Curvas $P-\delta$ para as juntas <i>scarf</i> com PLA: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752.....	65
Figura 75 - Curvas $P-\delta$ para as juntas <i>scarf</i> com ABS: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752	66
Figura 76 - Curvas $P-\delta$ para as juntas <i>scarf</i> com PETG: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752	66
Figura 77 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria <i>scarf</i> ; cor sólida = rotura no aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo.....	67
Figura 78 - Valores médios de $k_{máx}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria SLJ; cor sólida = rotura no aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo	70
Figura 79 - Valores médios de $k_{máx}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria <i>step</i> ; cor sólida = rotura no aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo	71
Figura 80 - Valores médios de $k_{máx}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria <i>scarf</i> ; cor sólida = rotura no aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo	73
Figura 81 - Área da curva $P-\delta$ correspondente ao cálculo de $E_{máx}$	75
Figura 82 - Valores médios de $E_{máx}$ [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria SLJ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no coesiva no adesivo	75
Figura 83 - Valores médios de $E_{máx}$ [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria <i>step</i> ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo	77
Figura 84 - Valores médios de $E_{máx}$ [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria <i>scarf</i> ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no adesivo	79
Figura 85 - Escolha do tipo de elemento em ABAQUS®.....	81
Figura 86 - Desenho 2D do provete com a geometria <i>step</i> com 10 mm de sobreposição no ABAQUS®	82
Figura 87 - Desenho 2D das partições na geometria <i>scarf</i> no ABAQUS®.....	82
Figura 88 - Diferentes geometrias após partições no ABAQUS®: a) SLJ com 20 mm sobreposição; b) <i>step</i> com 10 mm sobreposição; c) <i>scarf</i> com 20 mm sobreposição	82
Figura 89 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 em ABAQUS®	83
Figura 90 - Propriedades mecânicas do aderente PLA no ABAQUS®	84
Figura 91 – Secções com propriedades atribuídas no ABAQUS®	84
Figura 92 - Partição vermelha com a secção adesivo atribuída	85
Figura 93 - Definição dos incrementos em ABAQUS®	85
Figura 94 - Condições fronteira aplicadas no ABAQUS®	86
Figura 95 - Malhas aplicadas a cada geometria no ABAQUS®: a) SLJ com 20mm sobreposição; b) <i>step</i> com 10mm sobreposição; c) <i>scarf</i> com 20mm sobreposição.....	86
Figura 96 - Modelo coesivo triangular [109]	87
Figura 97 – Geometria do provete DCB [122].....	89
Figura 98 – Geometria do provete ENF [122]	89
Figura 99- Modo de propagação de dano SLJ: zona críticas de tensões.....	91
Figura 100 - Modo de propagação de dano SLJ: deformação do adesivo	92
Figura 101 - Modo de propagação de dano juntas <i>step</i> : zona críticas de tensões.....	94
Figura 102 - Modo de propagação de dano juntas <i>step</i> : deformação do adesivo	94
Figura 103 - Modo de propagação de dano juntas <i>scarf</i> : zona críticas de tensões.....	96
Figura 104 - Modo de propagação de dano juntas <i>scarf</i> : deformação do adesivo	97
Figura 105 - Curvas $P-\delta$ numéricas para as SLJ com aderente de PLA: a) 2015; b) 7752.....	99
Figura 106 - Curvas $P-\delta$ numéricas para as SLJ com ABS: a) 2015; b) 7752	100
Figura 107 - Curvas $P-\delta$ numéricas para as SLJ com aderentes de PETG: a) 2015; b) 7752.....	101
Figura 108 - Curvas $P-\delta$ numéricas para as juntas <i>step</i> com aderentes de PLA: a) 2015; b) 7752	101

Figura 109 - Curvas P - δ numéricas para as juntas <i>step</i> com aderentes de ABS: a) 2015; b) 7752	102
Figura 110 - Curvas P - δ numéricas para as juntas <i>step</i> com aderentes de PETG: a) 2015; b) 7752	102
Figura 111 - Curvas P - δ numéricas para as juntas <i>scarf</i> com aderentes de PLA: a) 2015; b) 7752	103
Figura 112 - Curvas P - δ numéricas para as juntas <i>scarf</i> com aderentes de ABS: a) 2015; b) 7752	104
Figura 113 - Curvas P - δ numéricas para as juntas <i>scarf</i> com aderentes de PETG: a) 2015; b) 7752	104
Figura 114 - Valores de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria SLJ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo	107
Figura 115 - Valores de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria <i>step</i> ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no adesivo	108
Figura 116 - Valores de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria <i>scarf</i> ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo	109
Figura 117 - Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para as SLJ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no adesivo	110
Figura 118 - Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para as juntas <i>step</i> ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no adesivo	111
Figura 119 - Energias de rotura obtidas numericamente para as juntas <i>scarf</i> : a) PLA; b) ABS; c) PETG	112
Figura 120 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as SLJ: a) PLA; b) ABS; c) PETG	114
Figura 121 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas <i>step</i> : a) PLA; b) ABS; c) PETG	116
Figura 122 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas <i>scarf</i> : a) PLA; b) ABS; c) PETG	118
Figura 123 - Comparação de $k_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as SLJ: a) PLA; b) ABS; c) PETG	119
Figura 124 – Comparação de $k_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas <i>step</i> : a) PLA; b) ABS; c) PETG	120
Figura 125 - Comparação de $k_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas <i>scarf</i> : a) PLA; b) ABS; c) PETG	121
Figura 126 – Comparação de $E_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as SLJ: a) PLA; b) ABS; c) PETG	124
Figura 127 - Comparação de $E_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas <i>step</i> : a) PLA; b) ABS; c) PETG	126
Figura 128 - Comparação de $E_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas <i>scarf</i> : a) PLA; b) ABS; c) PETG	127

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Análise SWOT dos processos AM[3, 6, 8, 15, 16].	5
Tabela 2 – Vantagens e Desvantagens de <i>binder jetting</i>	8
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens de DED	9
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens de FDM	10
Tabela 5 – Vantagens e desvantagens de <i>material jetting</i>	11
Tabela 6 – Vantagens e desvantagens do PBF	12
Tabela 7 – Vantagens e desvantagens de <i>sheet lamination</i>	12
Tabela 8 – Vantagens e desvantagens de <i>vat polymerization</i>	13
Tabela 9 - Estudos realizados em AM	13
Tabela 10 - Estudos experimentais em ligações adesivas com aderentes impressos em 3D	25
Tabela 11 – Análises numéricas em ligações adesivas com aderentes impressos em 3D	27
Tabela 12 - Parâmetros utilizados na impressão dos componentes	30
Tabela 13 - Dimensões dos provetes <i>bulk</i> de PLA	34
Tabela 14 - Dimensões dos provetes <i>bulk</i> de PETG	34
Tabela 15 - Dimensões dos provetes <i>bulk</i> de ABS	35
Tabela 16 - Coeficientes de Poisson dos materiais impressos, [93], [97], [98]	41
Tabela 17 - Propriedades mecânicas obtidas à tração do PLA	42
Tabela 18 - Propriedades mecânicas obtidas à tração do PETG	42
Tabela 19 - Propriedades mecânicas obtidas à tração do ABS	43
Tabela 20 - Diferentes parâmetros aplicados nas diferentes geometrias de junta	45
Tabela 21 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [101]	46
Tabela 22 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [102]	48
Tabela 23 - Correspondência da designação comercial dos adesivos em estudo e sua respetiva designação curta	48
Tabela 24 - Plano de fabrico de juntas	49
Tabela 25 - Modos de rotura SLJ	55
Tabela 26 - Modos de rotura das juntas <i>step</i>	56
Tabela 27 - Modos de rotura das juntas <i>scarf</i>	57
Tabela 28 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_0 para as SLJ	61
Tabela 29 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_0 para as juntas <i>step</i>	64
Tabela 30 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_0 para as geometrias <i>scarf</i>	68
Tabela 31 - Valores médios de $k_{máx}$ [kN/mm] em função de L_0 para as geometrias SLJ	71
Tabela 32 - Valores médios de $k_{máx}$ [kN/mm] em função de L_0 para as geometrias <i>step</i>	72
Tabela 33 - Valores médios de $k_{máx}$ [kN/mm] em função de L_0 para as geometrias <i>scarf</i>	74
Tabela 34 - Valores de $E_{máx}$ [kN.mm] em função de L_0 para as geometrias SLJ	76
Tabela 35 - Valores de $E_{máx}$ [kN.mm] em função de L_0 para as geometrias <i>step</i>	78
Tabela 36 - Valores de $E_{máx}$ [kN.mm] em função de L_0 para as geometrias <i>scarf</i>	80
Tabela 37 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de camada adesiva	90
Tabela 38 - Modos de rotura verificados no ABAQUS® para a geometria SLJ	92
Tabela 39 - Modos de rotura SLJ: experimental vs. numérico	93
Tabela 40 - Modos de rotura verificados no ABAQUS® para a geometria <i>step</i>	95
Tabela 41- Modos de rotura das juntas <i>step</i> : experimental vs. numérico	96

Tabela 42 - Modos de rotura verificados no ABAQUS® para a geometria <i>scarf</i>	98
Tabela 43 - Modos de rotura das juntas <i>scarf</i> : experimental vs. numérico	99

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de siglas

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
2D	Bidimensional
CAD	<i>Computer aided design</i>
DED	<i>Direct energy deposition</i>
DCB	<i>Double cantilever beam</i>
EF	Elementos finitos
ENF	<i>End-notched flexure</i>
FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
SLJ	Junta de sobreposição simples
LS	<i>Laser sintering</i>
MIT	<i>Massachussetts Institute of Technology</i>
MFLE	Mecânica fratura linear elástica
MEF	Método de elementos finitos
MEFX	Método de elementos finitos estendido
MDC	Modelo dano coesivo
PLA	Poliácido láctico
PETG	Poliétileno Tereftalato Glicol
PBF	<i>Powder bed fusion</i>
STL	<i>Standard tessellation language</i>
4D	Tetra dimensional
3D	Tridimensional
UV	Ultravioleta

Lista de símbolos

θ	Arco de ondulação	°
α	Ângulo de inclinação	°
A	Área	mm ²
l_e	Comprimento base de extensómetro mecânico	mm
L_o	Comprimento de sobreposição	mm
L_T	Comprimento total da junta	mm
ε	Deformação	-

δ_n	Deslocamento à tração	mm
δ_s	Deslocamento ao corte	mm
$E_{máx}$	Energia absorvida	N.mm
t_p	Espessura de aderente	mm
t_A	Espessura de adesivo	mm
t	Espessura do aderente	mm
k	Fator de momento fletor	-
\bar{P}	Força aplicada por unidade de largura	N
$P_{máx}$	Força máxima aplicada	N
b	Largura dos aderentes	mm
E	Módulo de elasticidade	Pa
M	Momento	N.m
t_s^0	Tensão coesiva ao corte	Pa
t_n^0	Tensão coesiva tração	Pa
$K_{máx}$	Rigidez máxima	N/mm
G_{Ic}	Tenacidade à tração	N/mm
G_{IIc}	Tenacidade ao corte	N/mm
σ	Tensão	Pa

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Os processos de fabrico aditivo são recentes, tendo o seu primeiro processo sido criado no meio da década de 80. Estes processos estão em fase de crescimento e são cada vez mais procurados pelas grandes indústrias (automóveis, aeroespaciais, medicina, farmacêutica, entre outras) devido às possibilidades que oferecem, quer em termos produtivos de geometrias complexas, quer em termos económicos e ambientais, por permitirem a utilização de materiais sustentáveis e recicláveis. Porém apresentam uma desvantagem que deixam esta tecnologia na retaguarda das restantes: as dimensões de peças fabricadas são bastante reduzidas. Com este facto, é necessário arranjar processos de união, de forma que ligação a ligação, componente a componente, seja possível construir um elemento de maiores dimensões sem perder características mecânicas e visuais como no caso de todo o elemento ser fabricado de uma só vez. O processo de ligação deve ter a capacidade de se adaptar aos componentes envolvidos sem os danificar. Dentro dos processos de ligações existentes, as ligações adesivas mostram ser a solução mais benéfica. Estas ligações estão também em fase crescimento e são procuradas pelas mesmas indústrias que procuram outros processos de fabrico, face a ligações soldadas ou mecânicas. As ligações adesivas permitem ligar materiais diferentes, distribuem as tensões de forma mais uniforme do que outros processos, reduzem o peso às estruturas e a apresentam várias configurações de ligação, sendo a configuração sobreposição simples a mais utilizada. Devido aos processos de fabrico aditivo e ligações adesivas serem consideravelmente recentes e em crescimento é necessário verificar como se comportam as ligações adesivas com aderentes impressos em 3D. Essas verificações serão realizadas por estudos analíticos e numéricos recorrendo a análises de elementos finitos confrontados com ensaios experimentais.

1.2. Objetivos

Os objetivos desta dissertação consistem no estudo experimental e numérico de juntas adesivas de diferentes geometrias com aderentes fabricados por impressão 3D compostas por dois adesivos em substratos de materiais possíveis de fabricar com o processo de fabrico aditivo *Fused Deposition Modeling* (FDM). A componente experimental consiste na obtenção de propriedades mecânicas dos aderentes após a sua fabricação, fabrico das juntas adesivas, ensaio de tração, análise dos resultados obtidos através das curvas P- δ , resistência de juntas, modos de rotura e energias de rotura. A componente numérica consistiu na aplicação do Método de Elementos Finitos através do modelo de dano coesiva pela lei triangular na previsão do comportamento das ligações, através dos modos de rotura, curvas P- δ , resistência de juntas e energias de rotura. Por fim, pretende-se comparar ambas os estudos e retirar as devidas conclusões.

1.3. Organização do relatório

De forma a melhor organizar a temática do trabalho desenvolvido, a presente dissertação encontra-se estruturada em 5 principais capítulos.

O 1º capítulo é dedicado à contextualização e enquadramento do tema abordado bem como enumerar os objetivos pretendidos aquando definição do tema. Serve ainda para mostrar e comentar a organização estrutural do trabalho.

No 2º capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica dos temas de fabrico aditivo e ligações adesivas. O capítulo está dividido em três subcapítulos: o primeiro subcapítulo é dedicado ao fabrico aditivo. Será feito um compilado de conceitos, como a sua história, as suas aplicações e os processos existentes. O segundo subcapítulo é dedicado a juntas adesivas, o que são, quais e como são as suas aplicações, esforços, modos de rotura e modelos de previsão da resistência destas ligações. O terceiro e último subcapítulo dedica-se a uma combinação dos subcapítulos anteriores, juntas adesivas com elementos fabricados por impressão 3D.

No 3º capítulo é aplicado o conhecimento adquirido no desenvolver do 2º capítulo, o estudo de juntas adesivas com aderentes impressos em 3D. Este estudo divide o capítulo em duas grandes partes: trabalho experimental e trabalho numérico. Na parte dedicada ao trabalho experimental encontram-se descritos, detalhadamente, os materiais utilizados, a obtenção das suas propriedades mecânicas, geometrias das juntas, processo de fabrico dos provetes e das próprias juntas, os resultados obtidos em ensaios de tração e uma análise dedicada dos mesmos. A parte dedicada ao trabalho numérico explica o processo de criação de um modelo numérico, detalhando as condições da análise computacional, o modelo de dano utilizado, determinação das propriedades do dano, previsão do comportamento da junta e modos de rotura. Por fim é feita uma análise dos resultados obtidos comparativamente aos resultados experimentais.

No 4º e último capítulo são elaboradas as conclusões finais e apresentadas proposta para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita uma revisão dos tópicos abordados e utilizados no decorrer da dissertação apresentada, sendo o seu foco o fabrico aditivo, ligações adesivas e o uso combinado dos dois tópicos prévios, ligações adesivas em aderentes fabricados por fabrico aditivo.

2.1. Fabrico aditivo

O fabrico aditivo ou *additive manufacturing* (AM), mais conhecido por impressão 3D, é, segundo a norma ISO/ASTM 52900 [1], “um processo de união de material para produzir peças a partir de informação de modelos 3D, geralmente camada sobre camada, o oposto do fabrico por remoção de material”. DeSimone [2] definiu AM como: “*3D printing is actually 2D printing over and over again*” (impressão 3D é na verdade impressão 2D repetida várias vezes). A principal diferença entre AM e outros processos de fabrico é que AM é um processo de natureza “aditiva” ao invés de “subtrativa” [3]. Um exemplo convencional de torneamento, perfuração e fresagem envolvem remoção de material da peça original para obter a forma pretendida. Por outro lado, o AM não requer qualquer remoção de material [4]. Por esta razão, o AM é considerado um processo de fabrico sustentável e amigo do ambiente.



Figura 1 - Primeira impressora 3D comercializada, de Charles Hull [5]

No início do AM, este era referido por outras terminologias. Inicialmente era denominado por fabrico por camada, devido à natureza do processo. Depois surgiu o termo fabrico de formas livres sólidas e rapidamente surgiu um dos termos mais conhecidos rápida prototipagem, pois este processo de fabrico era mais utilizado para protótipos do que produto final. Mais tarde surgiu o termo fabrico aditivo [3]. Este método de fabrico inicia-se como tantos outros, com um ficheiro *Computer Aided Design* (CAD) 3D da peça pretendida. Este ficheiro é traduzido para a linguagem *Standard Tessellation Language* (STL) para leitura nas máquinas processadoras das peças que seguidamente procedem ao fabrico do componente [6]. A Figura 2 mostra um esquema relativo ao processo existente para a criação de um componente por AM, desde o ficheiro CAD ao ficheiro STL a ler na impressora ao componente impresso.

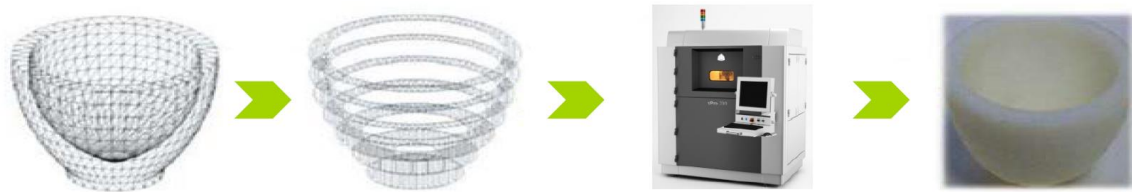


Figura 2 - Processo de fabrico de um componente por AM [7]

O AM existe desde a década de 80 [8], tendo sido a primeira patente obtida por Charles Hull em 1984. A sua patente baseava-se num processo de cura de resina por luz Ultravioleta (UV). Segundo Hull, mesmo com a ajuda de grandes empresas europeias e asiáticas, a primeira impressora 3D (Figura 1) demorou anos a ser concebida e comercializada [5]. O AM teve um início lento e difícil, mas tem vindo a crescer nas áreas de design graças ao potencial das novas tecnologias de AM. Estas têm potencial de ampliar o crescimento e alargar a sua utilização em grandes produções. [7]. Estes avanços têm tornado o AM popular porque permitem construir e desenvolver componentes de forma sustentável e ambiental [8] para diversos tipos de materiais [9].

2.1.1. Possibilidades e limitações do fabrico aditivo

A nova revolução da indústria, quarta revolução ou a denominada Indústria 4.0, tem surgido cada vez mais nas grandes empresas. Esta mentalidade foca-se na adaptação a novas dificuldades com a criação de processos mais simples, mais autónomos e mais rápidos. A sua autonomia passa por um menor uso de mão humana através de comunicação entre máquinas [10]. O AM apresenta as condições ideais para ser considerado um processo revolucionário neste tipo de indústria. Apesar de processos já mais desenvolvidos, como maquinagem ou injeção, poderem ser ainda mais automatizados, os processos AM apresentam um leque enorme de razões para substituir os processos existentes em determinadas áreas [9].

A Figura 3 mostra uma estrutura geodésica concêntrica fabricada por AM. Estas estruturas são difíceis de realizar devido ao elevado número de nós que une os diferentes membros da estrutura. A construção deste componente por outros processos de fabrico é complicada ou até mesmo impossível de se realizar.

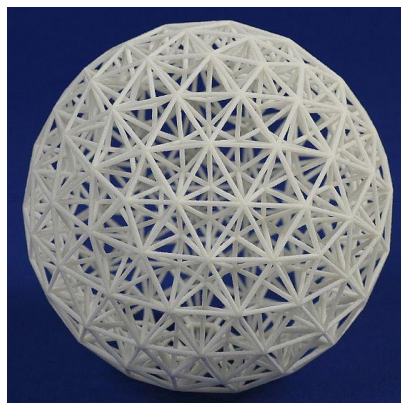


Figura 3 – Exemplo de estrutura geodésica concêntrica [11]

Esta complexidade fornece a projetistas e desenhadores uma liberdade elevada de desenho, permitindo focar-se mais num componente a pedido de um cliente ao invés do seu fabrico. O cliente poderá obter mais rapidamente um protótipo, visualizá-lo fisicamente e delinear alterações até

obter o produto final [12]. Em AM os materiais utilizados ainda são escassos, mas tem vindo a aumentar o número dos diferentes materiais possíveis de utilizar. Atualmente é possível utilizar o AM com ligas metálicas de titânio e de níquel, alumínio, resinas, polímeros, como acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e poliácido láctico (PLA), cerâmicos e compósitos [6, 13]. Estes materiais podem ser trabalhados no estado líquido, sólido e em pó. Os processos de impressão 3D abriram caminho para um novo tipo de material, o material inteligente, cujo processo de fabrico é conhecido por impressão 4D. Este tipo de material tem a característica de se transformar com a introdução de um estímulo, como calor, luz, eletricidade ou água [14].

Relativamente às propriedades finais de um componente impresso, estas são difíceis de controlar pois dependem de diversos fatores. Os processos de transferência de calor envolvidos são bruscos, com variações de temperatura repentinas, o que pode provocar distorções e tensões no componente. A qualidade superficial do produto impresso é em geral baixa e depende da orientação de deposição de camadas, da espessura das camadas e do material utilizado [8, 15].

Recentemente, desenvolveu-se um processo híbrido, que consiste na junção de processos AM e maquinagem. O AM é aplicado de forma a obter as geometrias complexas que é capaz de fabricar, e a maquinagem é aplicada para acabamento superficial [8].

De forma a resumir as limitações e possibilidades de processos AM, é apresentada a Tabela 1, com uma análise *SWOT* (Strengths, Weakness, Oportunities e Threats) deste método de fabrico.

Tabela 1 – Análise SWOT dos processos AM[3, 6, 8, 15, 16].

Strengths / Forças	Weakness / Fraquezas
<ul style="list-style-type: none"> • Liberdade de desenho geométrico; • Menor desperdício de material; • Sustentabilidade e menos poluente; • Aumento da proficiência da cadeia de fornecimento; • Não necessidade de ferramentas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Propriedades mecânicas reduzidas • Qualidade superficial baixa • Processos de pós processamento • Custos elevados • Grandes produções • Velocidades de impressão
Opportunities / Oportunidades	Threats / Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> • Impressão 3D de órgãos; • AM de materiais inteligentes; • Nano impressão; • Impressão de peças sobresselentes diretamente no local; • Aumento de sustentabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de monitorização durante o processo; • Confiabilidade e padronização; • Restrições éticas (impressão de armamento); • Cibersegurança (pirataria de desenhos CAD); • Processos com vários parâmetros a controlar

2.1.2. Aplicações de fabrico aditivo

A aplicabilidade de processos AM é vasta, sendo esta utilizada principalmente em áreas de engenharia, como indústria de fabrico de ferramentas e protótipos, indústria automóvel e aeroespacial, no fabrico de componentes, indústrias farmacêuticas, na produção de medicamentos, medicina dentária, no fabrico de próteses dentárias e moldes bocais, e na medicina geral, no fabrico de tecidos e cartilagem e próteses ósseas e implantes ortopédicos, entre outras indústrias [9, 15]. Na Figura 4 é possível verificar a distribuição percentual dos setores que utilizam AM.

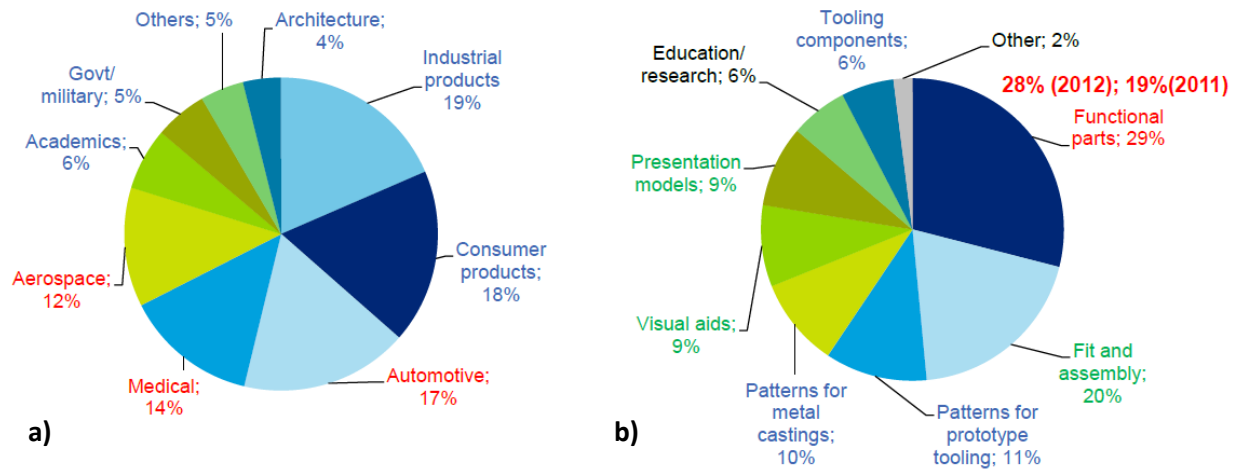


Figura 4 – Aplicação de AM: a) por setor; b) por aplicação [7, 15]

Na área da medicina é possível fabricar próteses e peças anatómicas complexas, possíveis de modelar em 3D com a utilização de um *scanner* permitindo uma melhor visualização das anatomias. O AM permite também ajudar no planeamento pré-cirúrgico ajudando médico a reconstituírem na prática diversos procedimentos, funcionando também como um elo entre médico e paciente. Esta tecnologia já permitiu a separação de gémeos siameses [17]. A Figura 5 representa a reconstrução de um crânio com utilização de AM. Na área farmacêutica, o uso desta tecnologia deve-se ao facto de ser um processo económico e relativamente rápido para produção de pequenos elementos [18].

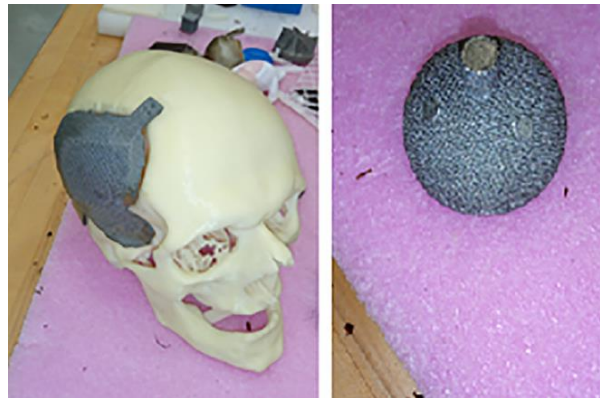


Figura 5 - Aplicação de AM na área medicinal [17]

Como mencionado anteriormente, o AM não é uma boa opção para o fabrico de grandes séries. Contudo, é uma excelente escolha para o fabrico de protótipos na indústria automóvel. Marcas automobilísticas de produção de pequenas séries, como a prestigiada marca francesa Bugatti e a sueca Koenigsegg. Ambas utilizaram esta tecnologia para desenvolver elementos essenciais que permitiram aumentar a performance dos seus carros. A Bugatti projetou e desenvolveu pinças de travões em titânio (Figura 6a)) enquanto a Koenigsegg desenvolveu um turbocompressor capaz de funcionar a baixas e altas rotações por minuto (Figura 6b)). Um outro exemplo de aplicação AM na industria automóvel, é o caso da empresa Local Motors que desenvolveu um autocarro de pequenas dimensões, cujo processo de fabrico era baseado em impressão 3D, como mostrado na Figura 7 [13].

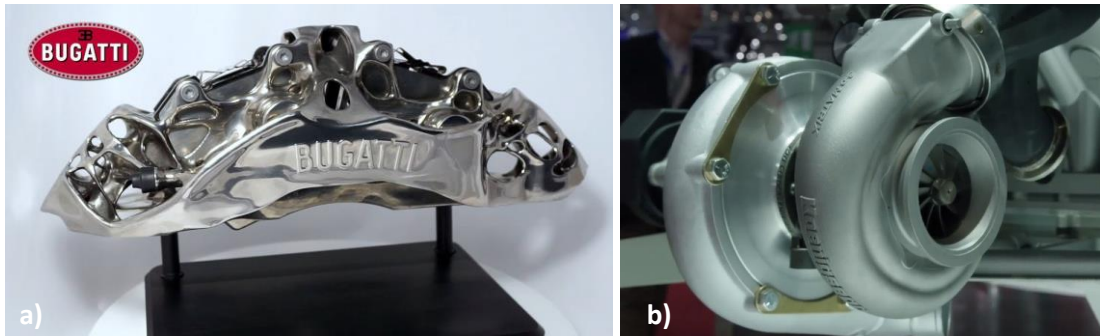


Figura 6 - Componentes fabricados por AM na indústria automóvel: a) Pinça de travão fabricado por Bugatti; b) Turbocompressor fabricado por Koenigsegg [19]



Figura 7 - Produção de autocarro OLLI, pela empresa Local Motors [20]

A indústria aeroespacial é umas das indústrias que mais potencia o avanço dos processos AM. O interesse nesta tecnologia resulta da capacidade de produzir partes em ligas de titânio com elevada complexidade e performance sem necessidade de qualquer ferramenta, tal como nos casos mencionados da Figura 6. O AM permitiu o aumento de produtividade no setor aeroespacial através da redução dos tempos de produção entre 30% a 70%, diminuição dos custos não recorrentes dos produtos até 45% e uma redução por volta de 32% nos custos de fabrico de peças de pequenas séries [17]. A General Electric Aviation é um exemplo que sucesso que produz componentes para os motores Leading Edge Aviation Propulsion [21]. A National Aeronautics and Space Administration, conhecida por NASA também conseguiu desenvolver componentes com a ajuda do AM. O caso de maior sucesso é o injetor dos motores a jato. Um componente crucial e dispendioso que normalmente demora perto de um ano a ser construído por processos convencionais de fabrico. Com a aplicação de processos de AM foi possível produzir o mesmo elemento em quatro meses, reduzindo em 70% os custos associados. Relativamente à montagem, com o desenvolvimento do produto passou-se de 115 partes, por processos convencionais de fabrico, para 2 partes fabricadas aditivamente [22].

2.1.3. Categorias de Fabrico Aditivo

Segundo a norma ISO/ASTM 52900 [1], existem 7 principais categorias de fabrico aditivo, que são apresentadas de seguida.

2.1.3.1. Binder jetting

Binder jetting, esquematizado na Figura 8, é um processo em que um agente líquido de ligação é cuidadosamente e seletivamente depositado de forma a unir partículas em pó [1]. O processo foi

desenvolvido nos anos 90 pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), e consiste na deposição do agente de ligação, gota a gota, através de um extrusor que se move no plano horizontal. A deposição do material conduz à formação de uma camada que é curada por uma luz UV. Quando curada, o eixo vertical desce, abrindo caminho para que uma nova camada de pó se deposite sobre a previamente fabricada. Esta nova camada é depositada após a reposição do pó através de um sistema de rolos. Este passo é fundamental já que, é a forma de ter sempre material a ser alterado. O processo é repetido constantemente até obter a peça final. O componente é depois limpo, através da remoção de excessos de pó e deixado a curar à temperatura ambiente. De acordo com as referências [23-25], este processo apresenta várias vantagens e desvantagens, conforme se enumera na Tabela 2.

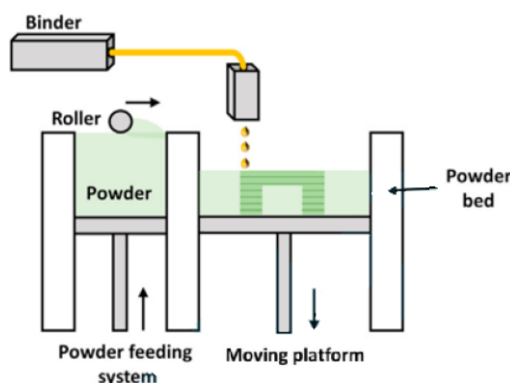


Figura 8 - Esquema representativo de *binder jetting* [26]

Tabela 2 – Vantagens e Desvantagens de *binder jetting*

Vantagens	Desvantagens
Equipamento de baixo custo	Baixa densidade e resistência mecânica do componente;
Não necessita de suportes	Variedade de materiais (ferro, ligas metálicas, cerâmicos)
Multi-impressão	Necessidade de pós-processamento
	Aspeto rugoso

2.1.3.2. Directed energy deposition

Directed energy deposition (DED), esquematizado na Figura 9, é um processo que utiliza energia térmica focalizada para fundir o material enquanto este é depositado [1]. Este processo permite, para além de fabrico de componentes, a reparação e manutenção, como remoção de ferrugem por plasma [27]. O conceito baseia-se na adição de material quando o mesmo se encontra no estado sólido, em pó, ou no estado líquido [6]. O material é depositado por um sistema concebido por dois bicos de injeção e, através de uma fonte de energia (gás, feixe de eletrões ou laser) focada no ponto de deposição do material, permite fundi-lo. A repetição deste método, camada por camada, conduz ao fabrico da peça final [28]. Este processo é também conhecido como *directed metal deposition*, *laser direct casting*, entre outras denominações. O DED apresenta algumas vantagens e desvantagens, enumeradas na Tabela 3, de acordo com as referências [6, 27, 28].

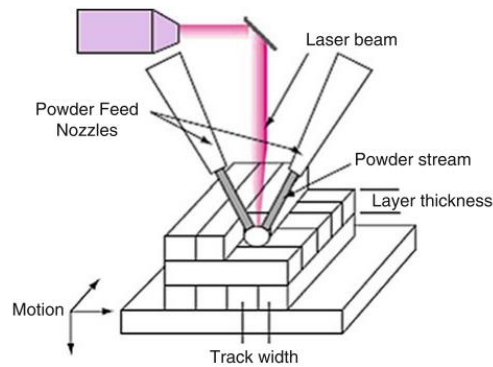


Figura 9 - Esquema representativo do DED [27]

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens de DED

Vantagens	Desvantagens
Peças de elevado volume	Custo elevado
Boas propriedades mecânicas	Variedade de materiais reduzida (essencialmente metais)
Com máquinas de 4 a 5 eixos, não é necessário suportes	Geometria simples
Elevada velocidade de deposição	Qualidade superficial reduzida

2.1.3.3. Material extrusion

Material extrusion é um processo em que o material é depositado seletivamente através de um orifício [1]. Este método, mais conhecido por *Fused Deposition Modeling* (FDM), foi inicialmente comercializado em 1990, pela *Stratasys*, nos Estados Unidos da América (EUA). As suas aplicações surgem em diversos setores de engenharia, como modelação, prototipagem e fabrico de componentes, nas áreas da indústria automóvel, aeroespacial e medicina [29, 30]. No processo FDM, o material é aquecido previamente à sua deposição, perto da temperatura de fusão. O filamento deposita-se por extrusão. A deposição pode ocorrer a diversas velocidades, de acordo com os parâmetros da impressão, numa superfície, que se pode encontrar ou não aquecida [30]. O extrusor percorre o caminho estabelecido para a primeira camada e, quando esta etapa termina, a cama ou o extrusor, dependendo da máquina, move-se no eixo vertical possibilitando a deposição de uma nova camada. O FDM é essencialmente utilizado com polímeros termoplásticos como ABS, Nylon 12, acrilato de estireno acrilonitrila, PLA e polieterimida, mas alguns avanços já permitem a utilização de filamentos metálicos [30]. O FDM já apresenta várias evoluções e melhorias, como se pode observar na Figura 10, que apresenta a impressão de dois materiais em simultâneo, podendo um dos materiais ser de suporte.

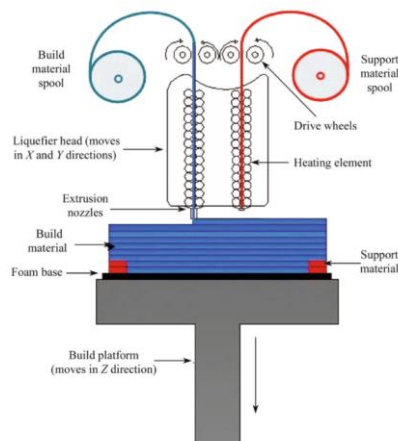


Figura 10 – Processo FDM com dois materiais [29]

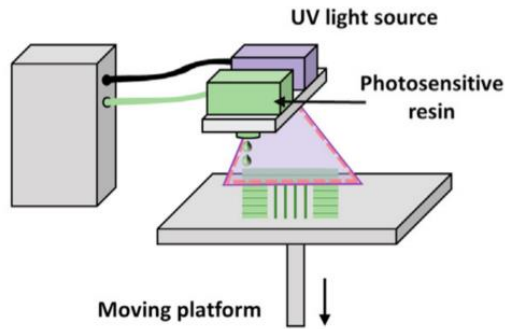
A qualidade dos componentes fabricados por FDM depende de um conjunto de variáveis como material utilizado, parâmetros estruturais (ângulo de varrimento, densidade de enchimento e orientação das camadas) e parâmetros da impressão a serem definidos previamente (velocidade de impressão, espessura de camada, temperatura do extrusor e da superfície) [31]. As vantagens e desvantagens deste são descritas na Tabela 4 [29-31].

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens de FDM

Vantagens	Desvantagens
Variedade de termoplásticos	Temperaturas de processo elevadas
Baixo custo e elevada variedade de impressoras	Produtividade baixa devido a tempos de impressão elevados
Geometrias complexas	Necessidade de suportes
Controlo de parâmetros de fabrico	Qualidade superficial e estrutural instável
	Vários parâmetros a controlar

2.1.3.4. Material jetting

Material Jetting, esquematizado na Figura 11, é um processo no qual gotas de material são depositadas seletivamente sobre uma superfície [1]. Este tipo de processo, também conhecido como *ink jet* ou *poly-jet printing*, tem aumentado a sua popularidade devido à capacidade de produzir componentes multi-materiais num único processo de cura por luz UV. O método consiste na deposição de gotas de material foto polimérico numa zona selecionada. Quando a primeira camada é depositada, um rolo atravessa a camada com o intuito de remover excessos de material e obter uma determinada espessura. O procedimento é repetido até obtenção da peça final. Em caso de o componente a fabricar necessitar de suportes, estes são impressos em simultâneo com o material do componente e são de fácil remoção (dissolvidos em água) [32, 33]. As vantagens e desvantagens deste processo AM são enumeradas na Tabela 5 [30, 32].

Figura 11 - Esquema representativo de *material jetting* [26]Tabela 5 – Vantagens e desvantagens de *material jetting*

Vantagens	Desvantagens
Propriedades mecânicas homogêneas	Pós-processamento necessário para remover suportes
Elevada precisão dimensional	Limitado a materiais foto poliméricos;
Elevada qualidade superficial	Necessidade de suportes
Impressão multi-material	Vários parâmetros a controlar

2.1.3.5. Powder bed fusion

Powder bed fusion (PBF), esquematizado na Figura 12, é um processo em que energia térmica funde pó metálico [1]. O PBF apresenta semelhanças ao processo *binder jetting*. Enquanto ambos utilizam material em pó, a diferença reside no método de união das partículas de pó. Pelo processo PBF, a união do material resulta da incidência de uma fonte de energia que funde as partículas [26]. Neste processo é fundamental um mecanismo que assegure a existência de material para as camadas posteriores. O PBF pode ser subdividido consoante o tamanho das partículas e espessura das camadas. Os processos derivados de PBF chamam-se *laser beam melting*, *electron beam melting* e *laser sintering* (LS) [34]. As vantagens e desvantagens deste processo são enumeradas na Tabela 6 [6, 26].

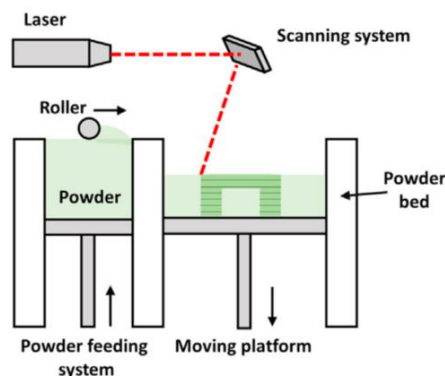


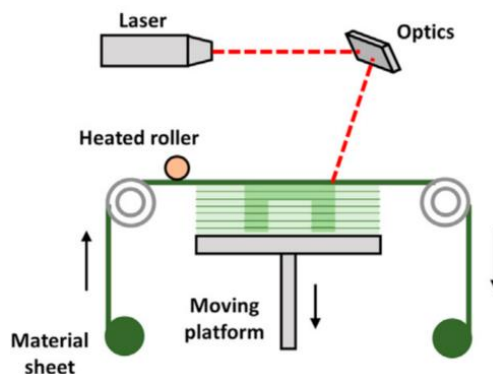
Figura 12 - Esquema representativo de PBF [26]

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens do PBF

Vantagens	Desvantagens
Não necessita de suportes	Elevado custo
Elevada precisão dimensional	Superfície rugosa
Boas propriedades mecânicas	Possibilidade de geração de cavidades
Reutilização de partículas não fundidas	Variedade de materiais limitada (ligas metálicas e cerâmicos)
Elevada densidade dos componentes	Processo demorado

2.1.3.6. Sheet Lamination

Sheet Lamination, esquematizado na Figura 13, é um processo em que folhas de material são sobrepostas e unidas de forma a construir a peça [1]. Este processo utiliza camadas pré feitas do material aditivo (para polímeros e papel) ou rolos de material (para metais). O conceito baseia-se na deposição de uma porção do material seguida do corte laser ou fresagem e corte em CNC da camada. A união das camadas pode ocorrer por ligação adesiva, processo conhecido por *laminated object manufacturing*, ou por soldadura por ultrassons ou fricção, processo conhecido por *ultrasonic additive manufacturing* [30, 35]. As vantagens e desvantagens enumeradas do processo são enumeradas na Tabela 7, [Lee, et al. [30], [36]].

Figura 13 - Esquema representativo de *sheet lamination* [26]Tabela 7 – Vantagens e desvantagens de *sheet lamination*

Vantagens	Desvantagens
Elevada velocidade de processamento	Desperdício de material
Facilidade de manuseamento do material	Propriedades mecânicas variáveis;
Baixo custo	Componente suscetível a empenamentos;
Não são necessários suportes externos.	Variedade de materiais limitada (ligas metálicas, polímeros e papel)

2.1.3.7. Vat polymerization

Vat polymerization, esquematizado na Figura 14, é um processo em que um líquido foto polimérico é curado numa câmara por polimerização induzida por laser [1]. Este processo consiste no endurecimento/polimerização de resina através de luz UV. O material a endurecer encontra-se dentro de um depósito. Junto deste depósito existe uma mesa perfurada que permite a passagem de resina a cada camada. A luz UV, ao entrar em contacto com a resina, irá endurecê-la. Após

terminada a primeira camada, a mesa move-se o que permite à resina banhar a camada pré-endurecida [37]. As vantagens e desvantagens do processo são apresentadas na Tabela 8, [26, 36].

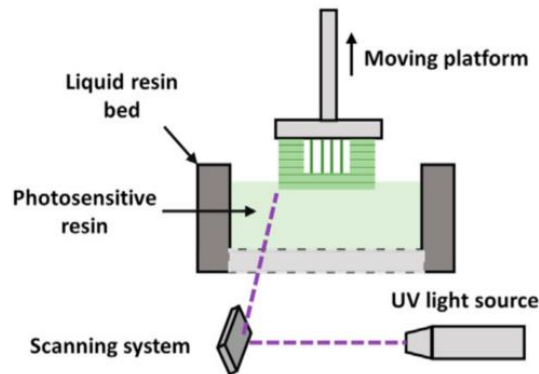


Figura 14 - Esquema representativo de *vat polymerization* [26]

Tabela 8 – Vantagens e desvantagens de *vat polymerization*

Vantagens	Desvantagens
Elevada resolução e qualidade superficial	Custo elevado
Peças de grande porte	Pós-processamento necessário;
Processo relativamente rápido	Limitado a resinas
	Necessidade de suportes.

2.1.4. Estado da Arte

Como referido previamente, o fabrico aditivo é um processo em crescimento, e alguns estudos foram realizados em prol de conhecer quais os parâmetros permitem obter melhores propriedades dependendo do processo em causa. Neste capítulo são indicados alguns estudos realizados pelos processos mais conhecidos e ainda o processo FDM com PLA, com o objetivo de aprofundar os conhecimentos a utilizar futuramente no desenvolvimento da dissertação. A Tabela 9 apresenta alguns estudos que foram realizados.

Tabela 9 - Estudos realizados em AM

Autor	Processo	Descrição do estudo
Elambasseril, et al. [38]	PBF com pó de alumínio	Os autores pretenderam estudar a resistência à tração e rotura a quente de alumínio A2139 fabricado por PBF variando alguns parâmetros do processos e refinamento do grão. Alguns dos parâmetros variados foram a velocidade do laser, espaçamento na passagem do laser e a densidade de energia depositada. O estudo permitiu retirar duas grandes conclusões. O aumento da densidade de energia pode reduzir e até eliminar a rotura a quente, pois reduz as tensões residuais resultantes do arrefecimento na região fundida. O processo PBF comparado com fundição obtém limites de elasticidade inferiores, contudo uma melhor ductilidade. Esta redução de elasticidade deve-se à perda de magnésio.

Tabela 9 - Estudos realizados em AM (Cont.)

Zhou, et al. [39]	PBF com pó de alumínio e zircônio	O estudo ocorreu sobre componentes de alumínio AA5083 com e sem zircônio fabricado por PBF de forma a estudar a dureza e a resistência à tração. Os parâmetros variados foram o tempo de tratamento térmico de 400°C, entre 0,5 h a 54 h. Os autores concluíram que o tratamento térmico de 2 h permitiu aumentar significativamente a dureza, de 85Hv para 118Hv tal como a resistência à tração, de 210 MPa sem tratamento para uns 315MPa. Para tratamentos mais demorados, os resultados foram inferiores aos obtidos com um tratamento de apenas 2h.
Carou, et al. [40]	FDM com PLA	O estudo consistiu no estudo da variação de parâmetros de impressão em prol de obter melhores qualidades superficiais A altura de camada variou entre 0,15 mm e 25 mm; a velocidade de impressão ocorreu a 40 mm/s e a 80 mm/s; a temperatura no extrusor variou entre 195°C e 225°C e a espessura da parede foi estudada entre 1 mm e 3 mm. Os resultados obtidos permitiram concluir que a altura de camada, seguida da espessura de parede, eram os parâmetros que mais influenciam a qualidade superficial (rugosidade). Quando o maior fossem estes parâmetros, mais rugosa seria a peça final.
Khosravani e Reinicke [41]	FDM com PLA	O estudo pretendeu analisar a influência da orientação de impressão e do tratamento térmico em provetes PLA na resistência à tração. A orientação de impressão variou entre 0° e 90° e o tratamento térmico aplicado durou 5 h entre -5°C e +35°C, durante 10 dias. Os resultados concluíram que o tratamento térmico reduz a resistência à tração, uma variação de 200 N. Por outro lado, a variação da orientação permitiu concluir que os provetes impressos a 0°, orientação do carregamento, aumenta a resistência no ensaio comparativamente aos provetes impressos a 90°, cerca de 2000 N.
Alafaghani e Qattawi [42]	FDM com PLA	Os autores variaram parâmetros de impressão de forma a obter melhores propriedades superficiais e mecânicas. Os parâmetros variados foram a espessura da camada, temperatura no extrusor, densidade de enchimento dos componentes e o padrão de enchimento utilizado, indicados na Figura 15. Os resultados demonstraram que, para obter melhores propriedades superficiais, deve-se utilizar temperatura de extrusão de aproximadamente 190°C, menores espessuras de camada e baixa densidade de enchimento com padrão hexagonal. Contrariamente, para obter boas propriedades mecânicas, são necessárias maiores temperaturas de extrusão, maiores espessuras e maior densidade de enchimento com um padrão retilíneo. Concluiu-se que propriedades mecânicas e superficiais não podem ser melhoradas simultaneamente.

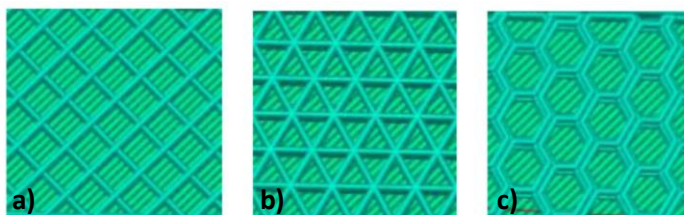


Figura 15 - Padrões de enchimento utilizados por Alafaghani e Qattawi: a) enchimento retilíneo; b) enchimento triangular; c) enchimento hexagonal [42]

Tabela 9 - Estudos realizados em AM (Cont.)

Fracio, et al. [43]	FDM com PLA e ABS	O artigo experimental incidiu sobre a influência dos parâmetros de impressão em PLA e ABS na molhabilidade nas superfícies. Os componentes foram impressos com diferentes temperaturas no bico extrusor, adaptado a cada material aderente, com alturas de camada entre 0,1 mm, 0,2 mm e 0,3 mm. A velocidade de impressão alternou-se entre 30, 75 e 120 mm/s. A molhabilidade foi lida através de um microscópio Dinolite. Os provetes foram tracionados até à rotura. Os resultados mostraram que as tensões máximas ocorreram entre 20 e 40 MPa. Relativamente aos parâmetros utilizados, os autores concluíram que a temperatura do extrusor e a velocidade de impressão têm um efeito positivo no PLA, aumentando a sua resistência e no caso de ABS a temperatura do extrusor por si só aumenta bastante a resistência à tração. Este aumento de resistência com a temperatura deve-se a uma fusão das linhas mais uniforme e homogénea.
Sarkar, et al. [44]	DED com Inconel 718	O estudo incidiu sobre o efeito de diboreto de titânio (TiB ₂) no fabrico de <i>Inconel</i> 718 (IN718) por DED. A adição de TiB ₂ deve-se ao facto que durante o fabrico de IN718 por DED, podem surgir dendritos colunares que crescem de forma epitaxial a partir das camadas. Os dendritos provocam propriedades mecânicas anisotrópicas. O estudo revelou que a adição de TiB ₂ promoveu um refinamento significativo dos grãos e que reduz a formação de dendritos, devido à distribuição homogénea de precipitados de crómio, molibdénio, nióbio e boro. Os autores concluíram ainda que a taxa de fluxo do pó durante o processo de fabrico afeta a densidade de energia de deposição e que baixando o caudal de deposição de pó era possível reduzir os defeitos entre as camadas.

2.2. Ligações adesivas

2.2.1. Características gerais

As ligações adesivas são uma técnica emergente que tem solucionado problemas de métodos tradicionais, como ligações aparafusadas, rebitadas e soldadas. O processo de ligação adesiva consiste na ligação de aderentes, ou aderentes, através de um material polimérico. Como qualquer outro tipo de processo de ligação, as ligações adesivas também apresentam vantagens e desvantagens. da Silva, et al. [45] e Pinto [46] comparam este meio de união a outros mais tradicionais. As ligações adesivas apresentam facilidade de execução, custos reduzidos, possibilidade de união de diferentes materiais, um bom comportamento à fadiga, amortecimento de vibrações e distribuição mais uniforme de tensões comparativamente a outros processos. Contudo, as suas desvantagens debatem-se no pré e pós-processamento. O pré-processamento pode ser moroso e dispendioso. No pós-processamento, a cura do adesivo, além de demorada, nem sempre necessita de temperatura e pressão. O conjunto final apresenta fraca resistência aos esforços de arrancamento e clivagem.

2.2.2. Configurações de junta mais comuns

Os esforços a que uma junta é exposta podem ser previstos conforme a sua geometria. Existem vários tipos de juntas, como mostrado na Figura 16, sendo as mais comuns as de juntas sobreposição simples (SLJ, do inglês *single lap joint*), juntas sobreposição dupla (JSD), juntas de chanfro e de degrau [45].

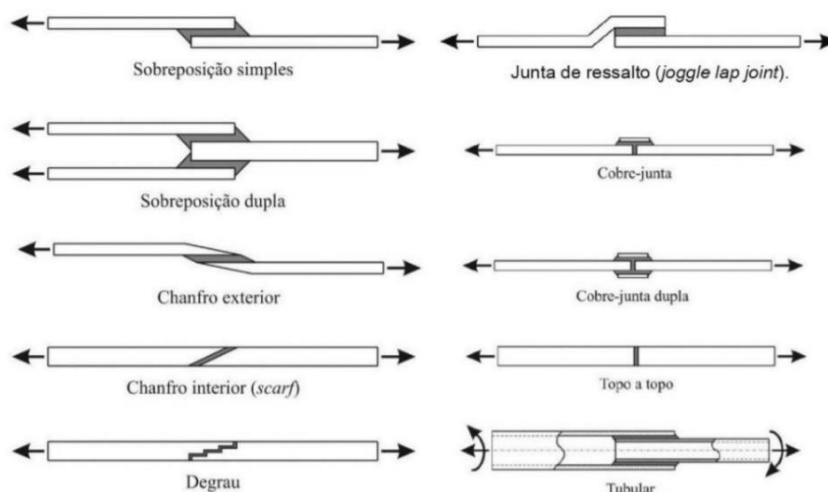


Figura 16 - Diferentes tipos de juntas [47]

2.2.3. Esforços em ligações adesivas

Uma das vantagens de juntas adesivas é a distribuição mais uniforme de tensões comparativamente a outros processos de união. No entanto, surgem por vezes concentrações de tensões. Estas tensões determinam a tensão máxima suportada pela juntas nos carregamentos de tração ou compressão; corte; arrancamento e clivagem, indicados na Figura 17 [45].

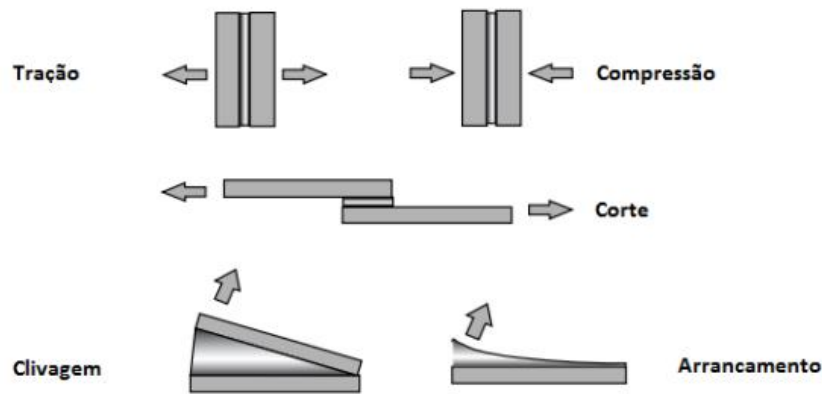


Figura 17 - Tipos de carregamento em juntas adesivas [48]

Tração e compressão – Estes esforços surgem quando a tensão é aplicada perpendicularmente ao plano da junta. As juntas devem ser projetadas de forma que o paralelismo das superfícies a unir e a perpendicularidade das forças aplicadas seja o melhor possível, o que na realidade é difícil de se obter devido à dificuldade de controlo de espessura do adesivo. Uma espessura não constante provocará esforços indesejados de clivagem e arrancamento [45]. Na Figura 18 a) é possível verificar a distribuição destes esforços numa junta adesiva.

Corte – Quando os aderentes se afastam paralelamente e em sentidos opostos, geram-se tensões de corte. Na Figura 18 b) identifica-se que os esforços são mais intensos nas extremidades do que no centro da junta, pelo que neste tipo de junta é benéfico aumentar a largura da junta [46]. A distribuição de tensões identificada, origina deformação diferencial dos aderentes ao longo do comprimento de ligação, o que conduz a picos de esforços nas extremidades do mesmo.

Clivagem e arrancamento – Estes esforços apresentam semelhanças, visto que ambos são aplicados numa extremidade da junta. No entanto, na clivagem os aderentes são rígidos, enquanto no arrancamento um ou dois aderentes são bastante flexíveis [46]. Estes tipos de esforços provocam uma tensão elevada na extremidade, como mostra a Figura 18 c), que pode conduzir à rotura da junta. Por esse motivo é comum reforçar a área de ligação. Estes tipos de esforços devem ser evitados [49].

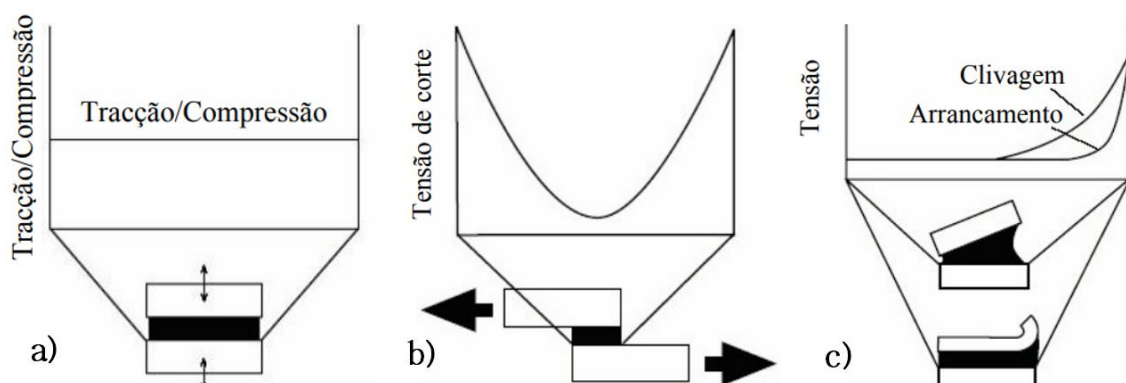


Figura 18 - Esforços em juntas adesivas a) Tração e compressão; b) Corte; c) Clivagem e arrancamento [46]

2.2.4. Modos de rotura

As roturas em juntas adesivas são essencialmente de quatro tipos: rotura adesiva (Figura 19a), coesiva (Figura 19b), aderente (Figura 19c) e mista (Figura 19d).

A rotura adesiva ocorre na interface entre o aderente e o adesivo, proveniente da falha de adesão entre o o adesivo e a superfície do aderente. Após a rotura, é possível verificar que uma face dos aderentes não contem resíduos de adesivo, e a face de rotura do outro aderente encontra-se coberta de adesivo. A principal causa deste tipo de rotura pode ser a má preparação da superfície a unir ou em juntas de SLJ, onde existem variações de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo [50].

A rotura coesiva ocorre no interior do adesivo e surge quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais forte do que a resistência interna do adesivo. Quando se dá este tipo de rotura, ambas as superfícies dos aderentes estão cobertas por adesivo. Este tipo de rotura é um dos modos preferenciais de uma ligação adesiva [50]

A rotura do aderente é outro tipo de rotura pretendido, uma vez que utiliza a totalidade da resistência dos materiais aderentes. Caso a rotura seja pelo aderente, e se a carga na rotura corresponde à resistência nominal do substrato, pode-se concluir que a junta foi bem fabricada.

Por vezes ocorrem roturas que partilham características de roturas adesivas e coesivas, estas são denominadas roturas mistas. Este tipo de rotura surge, principalmente, devido à falta de limpeza da superfície a ligar ou da utilização de um adesivo impróprio para a ligação [45, 51].

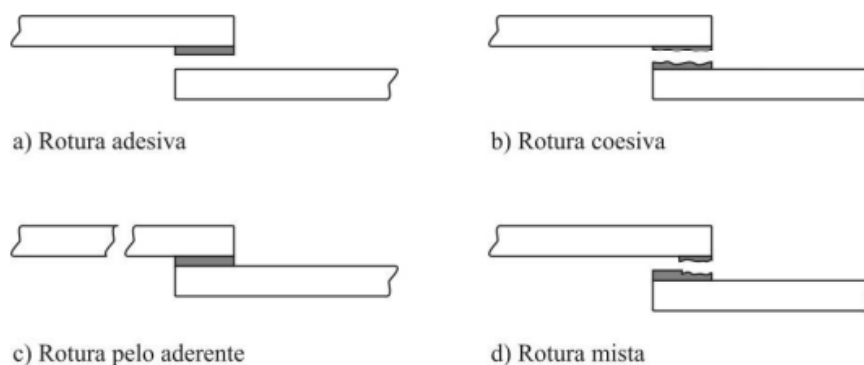


Figura 19 - Tipos de rotura de juntas adesivas [45]

2.2.5. Aplicações

Visto que as juntas adesivas é processo de união em estudo e constante evolução, são cada vez mais os setores que utilizam este processo de ligação de componentes, tais como indústria automóvel, espacial, naval, eletrónica, construção civil e desporto [51]. Apresentam-se de seguida alguns dos exemplos mais representativos da utilização deste tipo de ligação:

Indústria automóvel – A utilização de juntas em automóveis permite uma redução do seu peso, o que permite reduzir o consumo de combustível, e a absorção de impactos [52]. A sua aplicação surge para unir os pilares de reforço, tejadilho, assento de passageiro, entre outras zonas como se pode verificar na Figura 20.

Indústria espacial – O uso de juntas em aviões utiliza-se principalmente para fixar as longarinas ao resto do esqueleto, unir as peles das asas evitando fenómenos de empenamento, entre outras aplicações, como é visível na Figura 21 [53].

Indústria naval – As juntas adesivas surgem neste tipo de indústria devido à influência da agressividade do ambiente marítimo na escolha dos materiais utilizados. O uso de materiais

compósitos reforçados com fibras é bastante comum na indústria naval. Como as ligações adesivas são leves, resistentes à corrosão, humidade, temperatura e excelente estanquidade, tornam-se fulcrais na construção de pequenas e grandes embarcações marítimas [54]

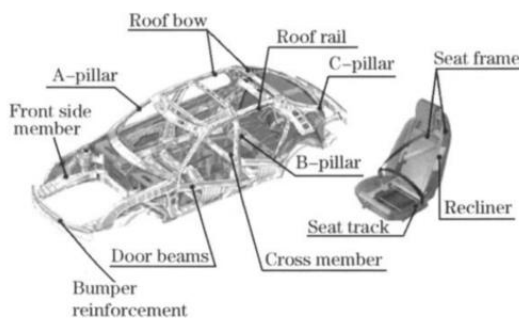


Figura 20 - Aplicações de adesivo em automóveis [52]

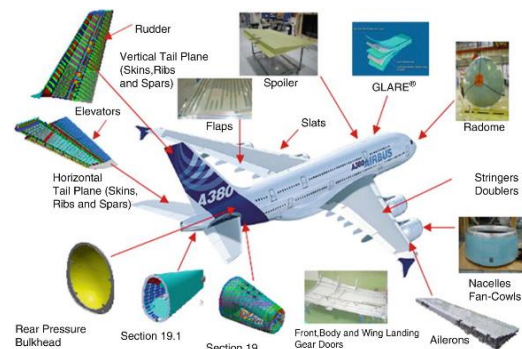


Figura 21 - Aplicação de adesivos em aviões [55]

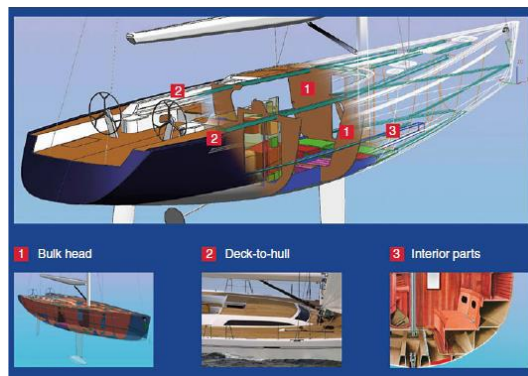


Figura 22 - Utilização de ligações adesivas em pequenas embarcações [54]

2.2.6. Previsão de resistência

O desenvolvimento de métodos de previsão permite aumentar a eficiência da utilização de juntas adesivas. Métodos mais precisos permitem ultrapassar problemas de juntas sobredimensionadas, e assim evitar estruturas mais pesadas e dispendiosas.

2.2.6.1. Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos é um método que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o método de elementos finitos (MEF). A previsão da resistência é efetuada através de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para tal, os valores de tensões ou deformações obtidas pelos modelos são comparados com os valores dos materiais, o que permite avaliar a ligação adesiva quanto à resistência.

2.2.6.1.1. Métodos analíticos

Estes estudos surgiram na década de 30, por Volkersen [56], que assumiu que os materiais são elásticos e a deformação ocorre apenas em corte, em JSS. Por assumir apenas o esforço de corte, as tensões nas extremidades da junta eram bastante elevadas. Mais tarde, em 1944, Goland and Reissner [57] consideraram o efeito de rotação da junta. A rotação, resultante de um desalinhamento das forças no modelo de análise de Volkersen, provoca um momento fletor na junta. Segundo a Equação 1 de Goland and Reissner [57], é introduzido o momento fletor, k , que relaciona o momento na extremidade da sobreposição do aderente, M , e a Figura 23 representa esta equação, em que t é a espessura do aderente e \bar{P} é a força aplicada por unidade de largura.

$$M = k\bar{P}\frac{t}{2} \quad (1)$$

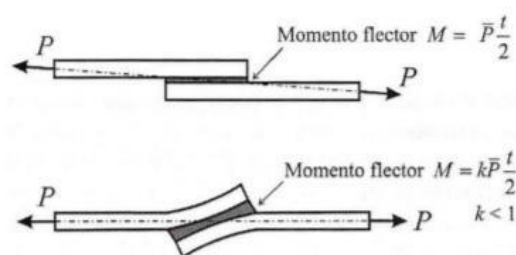


Figura 23 - Representação geométrica de k analisado por Goland e Reissner [45]

Nestas análises, Volkersen [56], Goland e Reissner [57] consideraram um comportamento elástico dos componentes da junta. Porém, estes podem deformar-se plasticamente. Hart-Smith [58] contabilizou o comportamento plástico do adesivo e demonstrou que a plasticidade do adesivo aumenta a resistência de uma junta, já que os adesivos dúcteis cedem plasticamente e conseguem suportar cargas até atingirem a ruptura.

2.2.6.1.2. Métodos numéricos

O método analítico torna-se mais complexo nos casos em que o adesivo se deforma plasticamente ou na utilização de aderentes de materiais diferentes. O MEF é a técnica de simulação mais comum nos dias de hoje, tendo Adams e Harris [59] sido os pioneiros da técnica. Os autores introduziram nas suas análises fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos componentes de uma junta e a influência dos filetes. Adams et al. [60] utilizaram o critério da tensão principal máxima com recurso ao MEF de modo a prever a resistência da junta. Verificou-se que o refinamento da malha é um aspeto importante na análise de tensões e deformações por existirem singularidades de tensões nas extremidades do comprimento de adesão. Contudo, os resultados não tiveram em consideração as concentrações de tensões que se geram em ranhuras ou entalhes, pelo que estes valores poderão não corresponder, na totalidade, com casos práticos [61].

Adam e Harris [59] estudaram o arredondamento do adesivo numa tentativa de remover as singularidades e chegaram à conclusão que o valor máximo de tensão depende do grau de arredondamento utilizado. Zhao, et al. [62] estudaram o efeito de nível de arredondamento na interface entre o aderente e adesivo, sem qualquer tipo de arredondamento e com raios entre

0.25mm e 3.2mm, e concluíram que as singularidades de tensões podem ser reduzidas com um maior grau de arredondamento.

2.2.6.2. Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos é utilizada para os casos em que a estrutura e o material são contínuos. Porém esta técnica não se adequa para as situações em que o material apresenta defeitos provocados pelas singularidades de tensões ou em juntas com cantos reentrantes. Na mecânica de fratura, assume-se que a estrutura não é um meio contínuo, e que podem existir defeitos, como fendas, resultantes de processos de fabrico. Este método tem como objetivo prever se os defeitos são suscetíveis de provocar uma rotura catastrófica, ou se, durante o tempo de vida da estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar de uma forma estável [45]. As fraturas podem-se originar por diversos fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga ou por deformações dependentes do tempo [63]. O pioneiro no uso deste método, Griffith [64], estudou o comportamento de fraturas em fibras de vidro com a variação dos diâmetro das fibras, e constatou que, para menores diâmetros a tensão de rotura era mais elevada. O autor do estudo concluiu que dimensões superiores das fibras se traduziam numa maior presença de defeitos e de maior tamanho. Por outro lado, foi considerado que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

2.2.6.3. Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo (MDC), surgiram nas décadas de 50 por de Barenblatt [65] e Dugdale [66], e permitem analisar e descrever o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito de cargas estáticas, bem como obter dados precisos acerca do dano e resistência nas ligações adesivas. Os MDC passaram a permitir análises no início de uma fenda e a sua propagação no interior ou na interface de materiais. Os MDC podem ser introduzidos por elementos de mola [67, 68], que são facilmente inseridos em programas de análise de elementos finitos. A principal vantagem do MDC é a possibilidade de introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, permitindo o crescimento do dano pela introdução de descontinuidades no campo de deslocamentos. As leis coesivas (tração-separação) são estabelecidas para modelar interfaces. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos e podem unir nós sobrepostos representativos de diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos (Figura 24a) ou podem ser aplicados diretamente entre os dois materiais (Figura 24b) [69, 70].

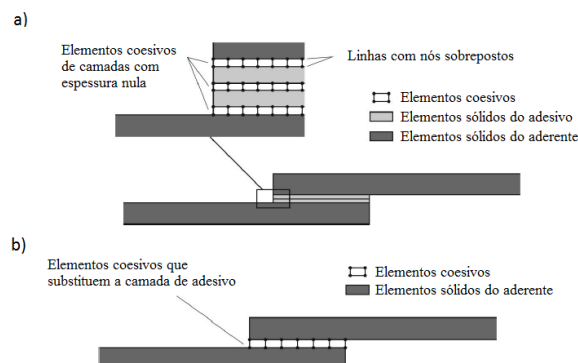


Figura 24 - Simulação de elementos coesivos de rotura de espessura nula: a) aproximação local; b) aproximação contínua [71]

2.2.6.4. Mecânica do dano

A mecânica do dano consiste numa técnica alternativa aos MDC. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano com o intuito de modificar a resposta dos materiais por via de redução da resistência ou rigidez. Khoramishad, et al. [72] aplicou esta alternativa para camadas finas de adesivo e Daudeville e Ladevèze [73] para a delaminação de compósitos ou rotura de matriz. As variáveis de dano são classificadas em dois grupos. No primeiro, as variáveis moldam o dano por reajustes de propriedades constitutivas dos materiais, apesar de não estarem diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo, as variáveis estão relacionadas com a definição física de um tipo de dano específico, como a dimensão de porosidades ou área relativa de micro-cavidades. O aumento do dano pode ser estabelecido em função do número de ciclos de fadiga em simulações dinâmicas [74, 75] ou em função da carga em simulações estáticas [76]. Numa comparação direta entre MDC e mecânica do dano, para casos específicos em que o caminho de propagação da fenda não seja conhecido ou o dano seja generalizado, é recomendado mecânica do dano, já que nos MDC a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos pelo posicionamento dos elementos coesivos [77].

2.2.6.5. Métodos dos Elementos Finitos Extendidos

O método de elementos finitos extendidos (MEFX) representa uma melhoria do MEF tradicional, que analisa e modela o crescimento do dano para a previsão de fraturas em estruturas. O MEFX fundamenta-se na resistência dos materiais para a iniciação de dano para a avaliação da rotura. Comparativamente com o MDC, no MEFX os caminhos de propagação de fendas deixam de ser necessários. Assim, a fenda pode propagar-se livremente no interior da estrutura sem que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [78]. Belytscho e Black [79] apresentaram as características fundamentais deste método, baseados no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF com a introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos próximos da extremidade da fenda, permitindo o crescimento e separação entre as faces da fenda [80]. Devido à liberdade de propagação e crescimento da fenda, a sua extremidade muda de posição e orientação constantemente, dependendo das condições de carga e geometria da estrutura. Simultaneamente, são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na vizinhança da fenda.

O MEFX, inicialmente, considera um comportamento linear elástico dos materiais, representado por uma matriz constitutiva elástica, que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e rotura são simulados pelo MEFX com uso de critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fictícios e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano são tipicamente definidos por tensões ou deformações enquanto as leis de tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [81].

2.3. Ligações adesivas em componentes de fabrico aditivo

2.3.1. Ligações entre componentes de fabrico aditivo

Como mencionado no subcapítulo 2.1, o AM tem aumentado nos últimos tempos devido às vantagens que apresenta. Contudo, as dimensões dos componentes possíveis de fabricar por AM revelam-se como entrave para algumas indústrias. De forma a contornar este problema é necessário proceder à ligação de componentes fabricados por AM.

Os processos de união por soldadura apenas são possíveis quando o fabrico dos componentes é realizado com ligas metálicas. Contudo, estes deformam os componentes devido à concentração de temperatura. Uma ligação por entalhes consiste no projeto e fabrico de componentes de tal forma que estes sejam acoplados de forma direta [82]. A Figura 25 mostra um simples exemplo de um encaixe fabrico por AM, pelo processo FDM.



Figura 25 - Exemplo de encaixe fabricado por FDM [82]

As ligações mecânicas são uma solução muito utilizada pois é possível fabricar os elementos com roscas internas ou externas. Dependendo do processo AM utilizado, a precisão das roscas pode ser mais difícil de se obter, pelo que se aconselha a utilização de roscas de maiores dimensões. Quanto mais refinada for a rosca, mais frágil esta se torna [83]. Tal como num componente fabricado por outro processo, é possível aplicar um rosca após o seu fabrico através da realização de um furo com uma furadora com broca e seguidamente a aplicação de um macho para formar a rosca. Este método também é possível em componentes fabricados por AM. Contudo, este método implica mais tempo de fabrico e elementos extras. Um outro exemplo de ligação mecânica em AM, especialmente para materiais plásticos e facilmente deformados, com pressão ou calor, é a possibilidade de inserir porcas de inserção de rosca (Figura 26). Neste caso é necessário o fabrico do componente com um furo onde irão ser aplicados estes elementos, como mostra a Figura 27.



Figura 26 - Porcas de inserção de rosca: a) com pressão; b) com calor



Figura 27 - Componente fabricado por AM pelo processo PBF com diferentes métodos de rosca [83]

Tal como na aplicação de porcas de inserção de roscas, o método de entalhes pode ser reforçado pela ligação dos componentes com a aplicação de uma camada de adesivo. As ligações adesivas podem ser aplicadas de diversas formas e com diferentes métodos de ligação de peças.

As ligações adesivas, como mencionado anteriormente, são um processo de ligação que tem crescido exponencialmente em várias indústrias, pelo facto de ser possível de aplicar sem deformar os materiais a unir, possibilidade de união de diferentes materiais e distribuir mais uniforme de tensões [45].

Como o método de união de componentes por adesivos e o fabrico por AM são duas indústrias em desenvolvimento, e a sua combinação se torna vantajosa, neste subcapítulo são apresentados estudos da combinação destas tecnologias.

2.3.2. Ligações adesivas em aderentes fabricados por AM

As ligações adesivas com aderentes fabricados por AM são de grande interesse em aplicações práticas, uma vez que as dimensões das impressoras 3D comerciais são relativamente baixas e limitadas. O uso devido de ligações adesivas abre oportunidades ao AM para fabricar estruturas maiores utilizando máquinas convencionais de baixo custo. Contudo, a integridade das estruturas, as roturas e as propriedades mecânicas das ligações adesivas têm de ser investigadas para que se possa assegurar um uso devido das mesmas [84]. As ligações adesivas com aderentes fabricados por FDM ainda não possuem uma norma única e exclusiva. O estudo da junta mais comum, junta de SLJ, segue a norma ASTM D1002. Apesar desta norma ser para aderentes metálicos, como não existe normas para as ligações adesivas com aderentes impressos em 3D, os aderentes são fabricados seguindo a norma referida [85].

O processo FDM é o mais requisitado por engenheiros que estudam a combinação de adesivos com aderentes impressos em 3D. Como mencionado no capítulo 2.1, o processo FDM permite fabricar componentes com diversos parâmetros de impressão. Numa ligação adesiva, os parâmetros escolhidos no processo de fabrico têm influência, não apenas, nas propriedades dos aderentes, mas também na junta adesiva [84]. Simultaneamente aos parâmetros de impressão, os parâmetros de uma junta adesiva, como tipo de adesivo, espessura de adesivo e preparação de superfície também devem ser otimizados. As diferentes combinações dos parâmetros das juntas adesivas e dos aderentes são ilimitadas e os resultados experimentais obtidos por ensaios de tração ou de corte

devem ser acompanhados por um estudo numérico da junta. Estes estudos irão permitir analisar e compreender a influência de todos os parâmetros aplicados no desempenho global da ligação. O MEF é uma excelente forma de prever quais os parâmetros que mais influenciarão uma ligação adesiva com aderentes impressos em 3D por FMD. De seguida são apresentados diversos estudos sobre ligações adesivas com aderente impressos em 3D, alguns reforçados com a devida análise numérica.

2.3.2.1. Ensaios experimentais

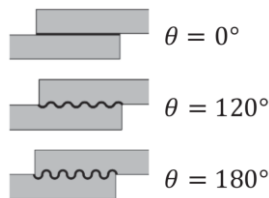
Na Tabela 10 estão apresentados alguns estudos relevantes para a análise da resistência de juntas adesivas com aderentes impressos em 3D, fabricados principalmente por FMD, considerados de elevada importância na contextualização do referido tema.

Tabela 10 - Estudos experimentais em ligações adesivas com aderentes impressos em 3D

Autor	Descrição do estudo
Leicht, et al. [86]	O estudo incidiu sobre ligações adesivas entre aderentes de poliamida 12, fabricados por LS, unidos por diferentes adesivos epóxicos designadamente, DELO-DUOPOX SJ8665, SikaPower-1277 e Easy-Mix HT 180. Uma das variáveis em estudo foi a preparação superficial dos aderentes: sem tratamento, com tratamento químico, com tratamento por plasma à pressão atmosférica e a combinação dos dois tratamentos. As juntas adesivas foram tracionadas até à rotura. Os resultados mostraram que as juntas sem preparação superficial atingiram tensões máximas entre 5 e 10 MPa, muito inferiores às tensões perto de 27 MPa das juntas com tratamento combinado. Os autores concluíram que a preparação superficial influencia as juntas adesivas e que o tratamento por plasma obtém melhores resultados do que o tratamento químico, mas que a combinação dos dois processos conduz a melhores resultados. Os tratamentos de superfície permitiram aumentar a área de contacto e a molhabilidade da superfície.
Kariz, et al. [87]	Na indústria do mobiliário e da madeira, já se fabricam compósitos com plástico, apesar de existir um problema de adesão entre os elementos. O ABS é um dos plásticos mais utilizados nestes compósitos. A ligação é dificultada porque o ABS é um polímero hidrofóbico e a superfície da madeira é hidrofílica. Os autores deste artigo experimental pretenderam estudar as ligações adesivas entre ABS e madeira com diferentes parâmetros fabrico aditivo do aderente e de junta. Na ligação adesiva foram utilizados 3 adesivos e no aderente variou-se a espessura de cada entre 0,09 mm, 0,19 mm e 0,39 mm. Alguns aderentes fabricados com 0,39 mm de espessura de camada foram expostos a vapores de acetona, caso em que as camadas exteriores das superfícies expostas aos vapores se fundiram. Na ligação adesiva foram utilizados 3 adesivos comuns na indústria da madeira: adesivo poliuretano de um componente Mitopur E45 (PU 1K), adesivo de fusão a quente DORUS KS 217 (HM) e adesivo de dois componentes Bison Power (PU 2K). As juntas adesivas foram tracionadas até à rotura. Os resultados obtidos permitiram concluir que a tensão máxima aumenta com a diminuição da espessura de camadas, pois estas sendo de dimensões inferiores fundem-se quase na totalidade resultando numa superfície não rugosa. Entre as amostras sujeitas a acetona verificou-se uma ligeira melhoria nos resultados das tensões. A tensão máxima foi atingida com camada adesiva de espessuras igual a 0,09 mm com PU-2K. Os autores concluíram que para melhores resultados é necessário reduzir a espessura de camada e/ ou aplicar um processo de tratamento superficial.

Tabela 10 - Estudos experimentais em ligações adesivas com aderentes impressos em 3D (Cont.)

Khosravani, et al. [88]	O artigo experimental consistiu em verificar a influência de parâmetros de impressão dos aderentes [ângulo de varrimento (0° , 45° e 90°), largura entre varrimentos (0,75mm e 1mm) e espessura da camada (0,2mm e 0,5mm)] e investigar qual a espessura ótima de adesivo se obtinha mais resistência da junta adesiva. As espessuras do adesivo foram de 0,2 mm, 0,3 mm e 0,4 mm. A SLJ era composta por PLA, fabricado por FDM, e adesivo utilizado LOCTITE® EA 9466. As amostras fraturaram por diversas formas, sendo a rotura coesiva a mais comum. Os resultados mostraram que, para a combinação de espessura de adesivo de 0,2 mm com espessura de camada de 0,2 mm e largura de varrimento de 0,75 mm nos aderentes, se obtinha a maior resistência da junta.
Khosravani, et al. [89]	Um estudo semelhante ao anterior, com os mesmos parâmetros de impressão e espessura de adesivo foi realizado para diferentes materiais de aderente e adesivo. Os aderentes foram fabricados em polietileno tereftalato glicol (PETG) por FDM e o adesivo utilizado foi o LOCTITE® 3090™. Os ensaios realizados foram idênticos e as conclusões também. Os autores concluíram que, nestas novas condições de aderente e adesivo, a resistência máxima continuou a ocorrer com espessuras de adesivo de 0,2 mm com os parâmetros largura de varrimento de 0,75 mm nos aderentes.
Nash and Li [90]	Este estudo analisou juntas cuja zona de adesão ondulada, com arco de ondas, θ , entre 0° , 120° e 180° , tal como mostra a Figura 28. Os provetes foram impressos no material TangoBlack e VeroWhite por processo <i>material jetting</i> . Os ensaios experimentais concluíram que, para $\theta = 180^\circ$, a resistência era máxima. A ondulação permite aumentar a rigidez ao corte 10 a 20 vezes mais. Os autores realizaram um outro ensaio de forma a avaliar a direção de impressão, com $\theta = 0^\circ$, concluindo que quando esta direção é paralela à direção do carregamento, as forças obtidas são superiores comparativamente à direção de impressão perpendicular ao carregamento.

Figura 28 – Variação de θ nas juntas realizadas por Nash and Li [90]

Khosravani, et al. [91]	Na componente experimental deste trabalho, os autores pretenderam estudar a influência de degraus na resistência mecânica de uma junta adesiva com aderentes de PLA fabricados por FDM e o adesivo LOCTITE® EA 9466™. Os degraus foram aplicados a uma junta de SLJ, diferenciando o tamanho dos degraus como mostra a Figura 29 (dimensão em mm): três degraus de igual comprimento (8,5/ 8,4/ 8,5); degrau central mais comprido (3/ 19,4/ 3) e o degrau central mais curto (11,2/ 3/ 11,2). As juntas foram tracionadas até à rotura. Os resultados mostraram que a junta que mais resistente ao carregamento foi a junta com os degraus equivalentes, atingindo forças de 2724 N. A conclusão a que os autores chegaram foi que utilizando degraus de iguais dimensões, é possível repartir a carga pelas diferentes secções, permitindo aumentar a resistência global da junta.
-------------------------	--

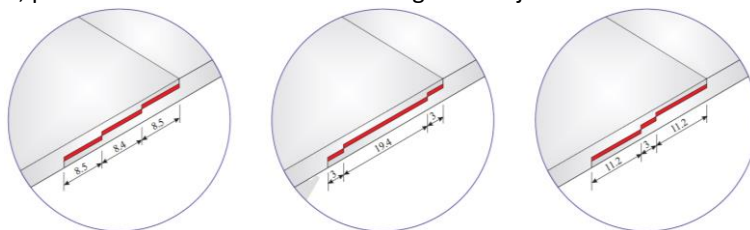


Figura 29 - Diferentes degraus aplicados por Khosravani, et al. [91]

2.3.3. Modelação numérica

Em alguns estudos anteriormente apresentados, foi relatada a dificuldade ou custos associados à aquisição de adesivos e materiais aderentes. Durante o fabrico das juntas adesivas e no decorrer dos ensaios, existem situações que são difíceis de controlar. Uma das dificuldades mais relatada, consiste na manutenção da espessura de adesivo. Por vezes é necessário utilizar dispositivos que mantenham constante a espessura do adesivo [41]. Devido a estas situações, as simulações numéricas são uma alternativa para o estudo de ligações adesivas. A Tabela 11 apresenta algumas análises numéricas para ligações adesivas com aderentes impressos em 3D.

Tabela 11 – Análises numéricas em ligações adesivas com aderentes impressos em 3D

Autor	Descrição do estudo
Khosravani, et al. [88]	Este estudo pretendeu simular numericamente, com <i>software</i> ABAQUS®, o comportamento de SLJ e comparar com os ensaios de tração, previamente descritos na Tabela 10. Os autores utilizaram o MDC para simular o comportamento do adesivo. Relativamente aos aderentes de PLA, os autores realizaram ensaios de tração em provetes <i>bulk</i> de forma a retirarem as suas propriedades mecânicas e as introduzirem no MEF. As simulações obtidas previram que a condição de maior resistência ao carregamento surgia para uma camada de adesivo com espessura de 0,2 mm. O MEF também foi utilizado para obter as tensões de corte e arrancamento. Os resultados mostraram que ambas as tensões tiveram o seu pico nas extremidades da camada e que as roturas coesivas se iniciam neste local. Os autores compararam as tensões para as diferentes espessuras de adesivo e verificaram que as tensões máximas ocorreram para as espessuras de adesivo superiores, o que resulta numa deformação do adesivo prematura quando comparada a espessuras inferiores. O ensaio experimental e o MEF permitiram concluir que espessura de adesivo de 0,2 mm foi a condição que resistiu a mais carregamento.
Khosravani, et al. [89]	Semelhante ao trabalho anterior, pretendeu-se estudar o comportamento de SLJ com PETG de forma a obter a espessura de camada de adesivo ótima. O estudo foi executado nas mesmas condições de MEF que o estudo anterior. Nas simulações realizadas, os autores foram capazes de observar diferentes estágios de deformação do adesivo representados na Figura 30. 1º estágio, observado para forças muito baixas, o adesivo comporta-se como distribuidor de tensões sobre a camada adesiva. A opção SDEG no <i>software</i> ABAQUS® permitiu verificar que neste estágio o adesivo não sofrera qualquer deformação. Com o aumento das forças aplicadas surgem as deformações no adesivo e o 2º estágio. Nesta fase verifica-se o início da deformação coesiva nas extremidades da junta. O contínuo aumento da carga axial provoca o 3º estágio, no qual se verifica a rotura coesiva no centro da camada adesiva. Os autores identificaram a carga máxima no início do 2º estágio.

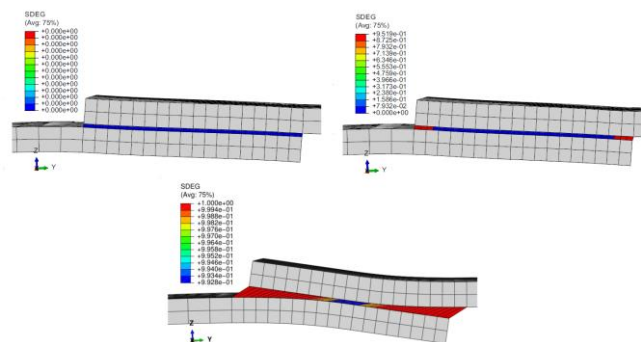


Figura 30 - Estágios de deformação do adesivo: a) 1º; b) 2º; c) 3º [89]

Tabela 11 - Estudos de análise numéricas em ligações adesivas com aderentes impressos em 3D (Cont.)

Khosravani, et al. [91] Este estudo numérico é um complemento dos ensaios experimentais mencionados na Tabela 10 para juntas adesivas com degraus. Os autores pretenderam verificar o modo de propagação da rotura do adesivo pelo parâmetro SDEG do *software* ABAQUS®. O adesivo foi simulado com elementos coesivos. Durante o decorrer das simulações, os autores analisavam as faces que, de forma sequencial, detetavam os primeiros sinais de deformação até à rotura total do adesivo. Com base nessas análises, os autores conseguiram construir um modelo de evolução de dano do adesivo indicado na Figura 31.

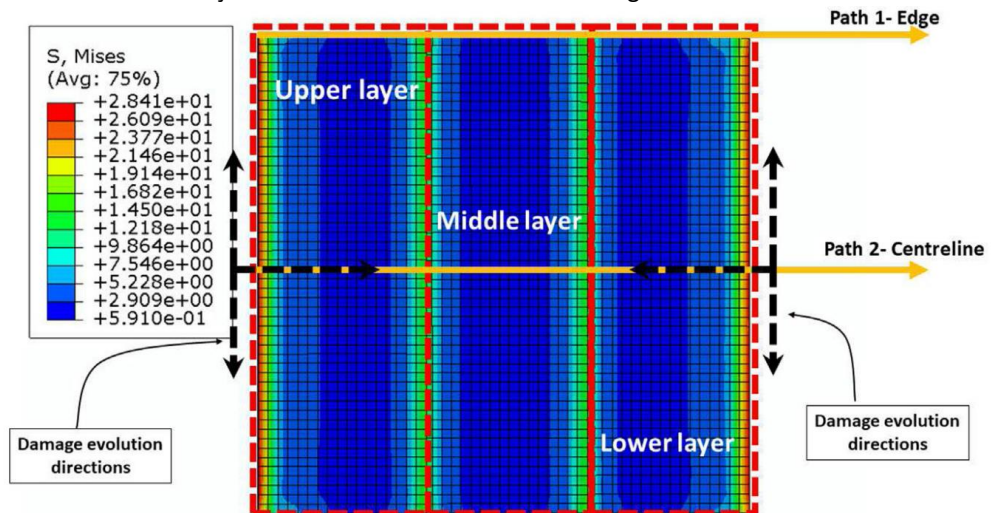


Figura 31 - Evolução da rotura coesiva do adesivo, Khosravani, et al. [91]

Os autores apuraram que o dano do adesivo evolui em duas direções de forma sequencial. O dano inicia nas arestas verticais exteriores das camadas adesivas topo e base. De seguida, o dano propaga-se na direção paralela ao carregamento, para o centro das arestas exteriores da camada adesiva. Quando a fenda chega ao centro da aresta, esta começa a propagar-se para o centro da camada, numa direção perpendicular ao carregamento. Quando nas faces topo e base, o adesivo se deforma por completo, a deformação coesiva prossegue na camada de adesivo interior. Nesta última camada, a propagação ocorre da mesma forma que nas anteriores.

Spaggiari and Favali [92] Os autores pretenderam estudar, experimentalmente e numericamente, juntas adesivas com chanfro interior variando o ângulo de orientação entre 5°, 10° e 20°. As juntas eram constituídas por aderentes em ABS, fabricados por FDM, e o adesivo LOCTITE®401. Para o estudo MEF, os autores utilizaram o *software* SOLIDWORKS®. Previamente às simulações numéricas, os autores realizaram ensaios de tração a provetes *bulk* de ABS para obter as propriedades mecânicas necessárias ao estudo numérico. A camada adesiva foi de 0,1 mm e nenhum critério de dano no adesivo foi aplicado. Após realização das simulações, verificou-se que as tensões máximas ocorreram nas extremidades da camada adesiva. O MEF permitiu identificar que a tensão máxima diminuiu com o aumento da inclinação da junta, de 45,58 MPa com 5°, para 44,01 MPa com 10°, e 39,9 MPa com 20°.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Trabalho experimental

3.1.1. Determinação das propriedades dos aderentes

Tal como mencionado previamente no capítulo 2.1.4.3, as combinações de parâmetros utilizados em processos FDM são ilimitadas. Estudos realizados por Carou, et al. [40] e Lokesh, et al. [93] mostraram que camadas de menor espessura, velocidades de impressão, ângulos de construção, padrões e densidades de enchimento, influenciam de maneira diferente as propriedades dos componentes. Em prol de melhores propriedades, está sempre associado maior gasto de filamento, como mostraram Alafaghani, et al [42].


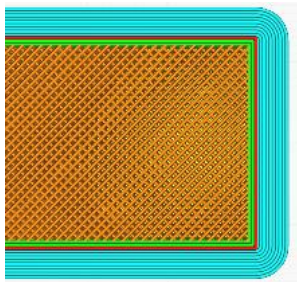
3.1.1.1. Parâmetros de impressão

Das diversas combinações possíveis de parâmetros que o processo FDM permite, de forma a balancear o gasto de material e as propriedades mecânicas dos componentes, foram utilizados neste trabalho os parâmetros de impressão indicados na Tabela 12. A escolha destes parâmetros foi feita com base em trabalhos previamente realizados e apresentados na Tabela 9, para a obtenção de boas propriedades mecânicas, tal como o padrão de enchimento, espessuras de camadas e bico extrusor. De forma a se poder retirar proveito da técnica dos processos AM, o parâmetro de percentagem de enchimento foi escolhido em 50%. A impressão dos materiais em estudo (PLA, PETG e ABS) foi realizada por entidades diferentes. A escolha destes materiais para o estudo neste trabalho deve-se que dentro dos diversos plásticos possíveis de produzir filamentos, estes três são os mais conhecidos e utilizados comercialmente. Os componentes em PLA e PETG foram impressos a cargo e responsabilidade pessoal, com uma impressora adquirida pessoalmente, uma *Ender 3 Max*, representada na Figura 32. Estes materiais são de fácil manuseamento sem causarem qualquer tipo de dificuldade. Ao contrário dos demais a impressão em ABS, devido às suas propriedades de libertação de odores e sensibilidade à temperatura, todos os componentes neste material foram fabricados pela empresa 3DMaker, pelo que alguns parâmetros diferem ligeiramente dos usados para os restantes materiais (PLA e PETG), principalmente a impressora utilizada, *Ender 6*, representada na Figura 32, que com a impressão num ambiente mais controlado, devido às paredes em vidro, permite um melhor controlo da temperatura. Os parâmetros utilizados durante a impressão variam entre os materiais a imprimir. As principais diferenças resultam das indicações do fabricante, como a temperatura da mesa de adesão, velocidade e temperaturas de impressão. Todos os outros parâmetros físicos são comuns aos três materiais. As propriedades dos materiais impressos podem ser consultadas nos anexos A, B e C: PLA e PETG da AzureFilm e ABS da Mitsubishi Chemical Performance Polymers, respetivamente.



Figura 32 - Impressoras utilizadas na impressão dos aderentes: a) Ender 3 Max; b) Ender 6

Tabela 12 - Parâmetros utilizados na impressão dos componentes

Material	PLA	PETG	ABS*
Modelo de impressora	Ender 3 Max	Ender 3 Max	Ender 6
Mesa de adesão	Vidro Carborundum		
			
Temperatura da mesa de adesão [°C]	60	80	70
Temperatura de extrusor [°C]	215	230	230
Velocidade de impressão [mm/s]	75	75	120
Altura de camada [mm]		0,2	
Espessura de linha [mm]		0,4	
Espessura de parede exterior [mm]		1,2 (3 linhas)	
Espessura de camadas base e topo [mm]		0,8	
Espessura de extrusor [mm]		0,4	
Padrão de enchimento	Retilíneo		
			
Densidade de enchimento [%]	50		
* Material impresso por empresa 3D Maker			

3.1.1.2. Processo de fabrico e ensaio

Numa fase inicial, antes da impressão dos componentes, é necessário modelar em *software* CAD o elemento pretendido (no presente relatório foi utilizado o *software* Solidworks®). De seguida,

guarda-se o ficheiro CAD como STL e abre-se um *software slicer* que permita a leitura do ficheiro STL (neste projeto o *slicer* escolhido foi o Ultimaker Cura® devido a ser um dos mais simples de utilizar e constantemente atualizados). No *slicer*, carrega-se o ficheiro STL, trabalha-se a posição do componente no volume da impressora e são fornecidas as condições de impressão, os parâmetros indicados na Tabela 12, tal como mostram a Figura 33 e Figura 34.

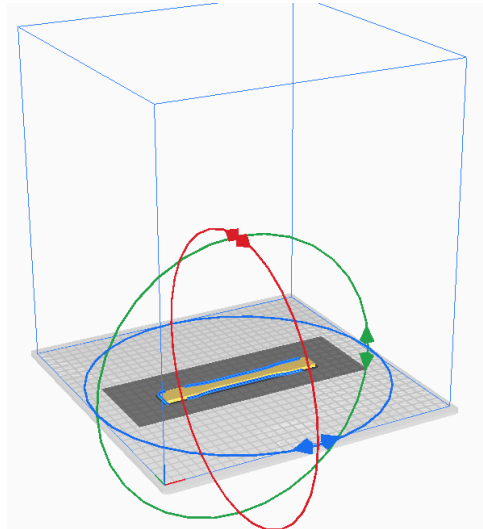


Figura 33 - Orientação do provete *bulk* no *slicer* Ultimaker Cura®

Quality			
Layer Height		0.2	mm
Walls			
Wall Thickness	f_x	1.2	mm
Wall Line Count		3	
Horizontal Expansion		0.0	mm
Top/Bottom			
Top/Bottom Thickness		0.8	mm
Top Thickness		0.8	mm
Top Layers		4	
Bottom Thickness		0.8	mm
Bottom Layers		4	
Infill			
Infill Density		50.0	%
Infill Pattern	f_x	Lines	
Material			
Printing Temperature	f_x	215.0	°C
Build Plate Temperature		60.0	°C
Speed			
Print Speed		60.0	mm/s

Figura 34 - Parâmetros de impressão aplicados no *slicer* Ultimaker Cura®

Após a introdução dos parâmetros no *software* e definição da posição dos elementos a imprimir relativamente à mesa de adesão, o *slicer* indica automaticamente o tempo e a quantidade de material gasto em cada impressão.

3.1.1.3. Fabrico de provetes *bulk*

De forma a obter as propriedades dos materiais nas condições indicadas na Tabela 12, foram impressos quatro provetes *bulk* de cada material para que pudessem ser testados e extraídas as propriedades mecânicas dos mesmos.

O fabrico e ensaio destes provetes seguiram a norma ASTM D638 [94], sendo as suas dimensões as indicadas na Figura 35. As dimensões resultam de os materiais se tratarem de plásticos rígidos e semirrígidos, sendo do Tipo I.

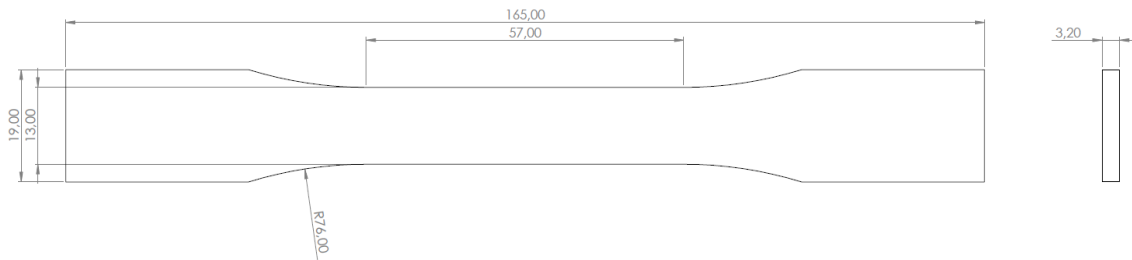


Figura 35 - Dimensões de provete *bulk* - Norma ASTM D638 Tipo I

Como fora indicado no ponto 3.1.1.1, os elementos foram impressos em dois locais, sendo que o fabrico dos provetes *bulk* de PLA e PETG demorou cerca de 55 min por provete, enquanto a impressão em ABS demorou ligeiramente menos, cerca de 40 min por provete.

Como é visível na Figura 36, os elementos são impressos com uma borda, conhecida por *skirt*, que consiste num conjunto de linhas impressas previamente ao componente de forma a evitar fenômenos como “pé de elefante” (compressão das camadas iniciais resultando num esmagamento do componente) e má adesão à mesa devido a diferenças de temperatura. Por outro lado, esta borda ainda permite verificar se o nivelamento da base é constante na área do componente. Este problema é visível na Figura 37, caso em que se observa que, no lado esquerdo, é clara a má adesão entre linhas e, do lado direito, após nivelamento, a adesão das linhas é homogénea. Com a *skirt*, ao invés de o componente ser impresso diretamente na base, a linha mais exterior é fundida parcial ou totalmente à última linha da borda. Esta permite resolver os problemas referidos, embora conduza a um desperdício de material e tempo. Contudo, é possível reutilizar o filamento utilizado na *skirt* através da reciclagem e reprodução de novos filamentos a partir do material desperdiçado [95]. Ainda na Figura 36 se pode identificar facilmente cada zona de impressão, o enchimento a 50% nas camadas interiores e as camadas exteriores.

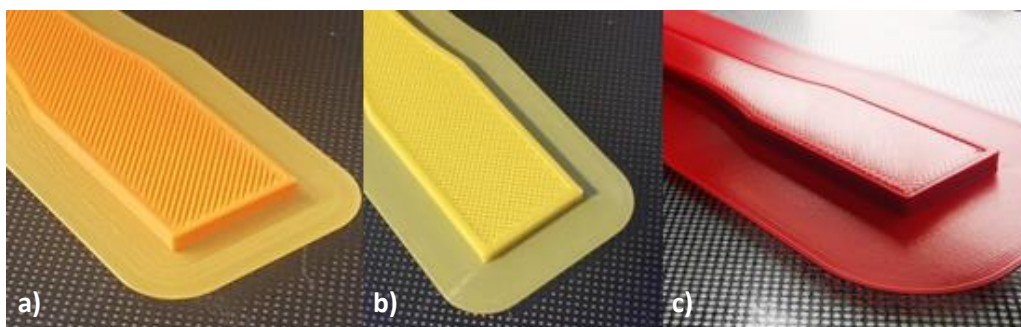


Figura 36 - Impressão de provetes *bulk*: a) PLA laranja; b) PETG amarelo e c) ABS vermelho



Figura 37 - Exemplo de má adesão após retirada da mesa de impressão

3.1.1.4. Ensaio de tração

Para a obtenção das propriedades dos provetes *bulk*, foram impressos 4 elementos de cada material, tal como mostra a Figura 38. Na Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 são indicadas as medidas da espessura e largura de zona útil de cada provete, estas realizadas com um paquímetro digital com resolução de 0,1 mm. As medidas apresentadas foram obtidas na zona útil do provete. Realizou-se uma medida no centro da zona útil e outras duas distanciadas simetricamente do centro antes de se atingir a curvatura do provete.



Figura 38 - Provetes *bulk* (PLA laranja à esquerda; PETG amarelo ao centro; ABS vermelho à direita)

Tabela 13 - Dimensões dos provetes *bulk* de PLA

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Área [mm ²]	Área média [mm ²]
1	13,0	3,0	39,0	39,2
	13,0	3,0	39,0	
	13,2	3,0	39,6	
2	13,0	3,0	39,0	39,7
	13,1	3,1	40,6	
	13,2	3,0	39,6	
3	13,2	3,1	40,9	40,7
	13,3	3,1	41,2	
	13,3	3,0	39,9	
4	13,2	3,1	40,9	40,0
	13,2	3,0	39,6	
	13,2	3,0	39,6	

Tabela 14 - Dimensões dos provetes *bulk* de PETG

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Área [mm ²]	Área média [mm ²]
1	13,1	3,1	40,6	39,9
	13,0	3,1	40,3	
	13,0	3,0	39,0	
2	13,0	3,1	40,3	40,4
	13,0	3,1	40,3	
	13,1	3,1	40,6	
3	12,9	3,1	40,0	40,3
	13,0	3,1	40,3	
	13,1	3,1	40,6	
4	13,1	3,1	40,6	40,3
	13,1	3,1	40,6	
	13,2	3,0	39,6	

Tabela 15 - Dimensões dos provetes *bulk* de ABS

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Área [mm ²]	Área média [mm ²]
1	13,0	3,1	40,3	41,5
	13,1	3,2	41,9	
	13,2	3,2	42,2	
2	13,1	3,2	41,9	42,6
	13,2	3,2	42,2	
	13,2	3,3	43,6	
3	13,0	3,2	41,6	41,4
	13,1	3,2	41,9	
	13,1	3,1	40,6	
4	13,2	3,0	39,6	40,3
	13,0	3,2	41,6	
	13,2	3,0	39,6	

Os ensaios de tração aos provetes foram realizados na máquina de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 presente no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP (Figura 39). A máquina é suportada pelo *software* TRAPEZIUM X disponível num computador ao seu lado para registo e controlo dos dados. A máquina de tração é equipada com uma célula de carga de 100 kN, utilizada para a medição da força aplicada durante o ensaio.

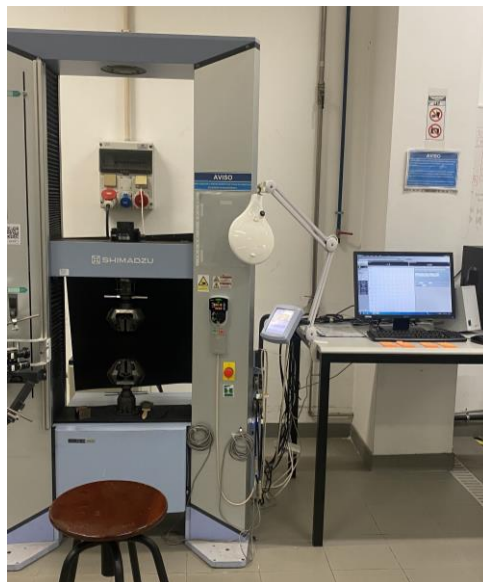


Figura 39 – Máquina de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100

A fixação dos provetes foi feita através de amarras de cunha de forma a evitar escorregamentos durante os ensaios, evitando deslizamentos entre provetes e amarras. A medição de deformações longitudinais é feita com a ajuda de um extensómetro mecânico. Como preparação para o ensaio, o equipamento é inicialmente calibrado para que o deslocamento inicial seja considerado zero em cada execução e a distância entre amarras seja de 115 mm. A velocidade de ensaio foi mantida constante em 5 mm/min e o extensómetro mecânico foi retirado após 0,5 mm de extensão. A

aplicação do extensómetro (Figura 40a) permite ler dados para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal, E , e os dados obtidos após retirada do extensómetro (Figura 40b) permitem a determinação das propriedades de resistência como a tensão de rotura.

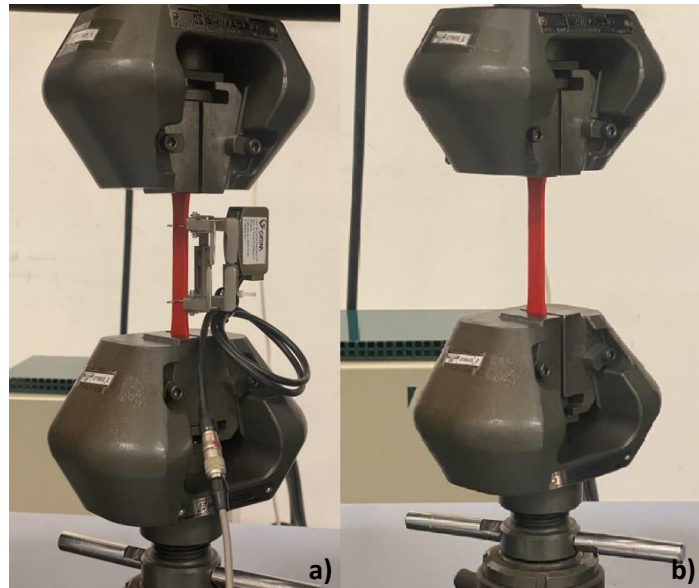


Figura 40 - Ensaio de tração de provete ABS: a) com extensómetro mecânico e b) após remoção do extensómetro

O extensómetro mecânico tem um comprimento-base (l_e) de 50 mm e é colocado na zona útil dos provetes. Devido a se tratar de um extensómetro mecânico de contacto, este deve ser colocado com algum cuidado e deve ser retirado antes de se atingir o limite elástico e rotura do provete, evitando danos no corpo de prova e no extensómetro em si. Por esta razão, nos primeiros ensaios foi optado por uma retirada do extensómetro nos 2 mm de extensão, tendo este terminado de ser retirado após 0,5 mm devido ao conhecimento prévio do comportamento dos diferentes materiais.

Os provetes foram tracionados até à sua rutura, que ocorreram maioritariamente nas extremidades da zona útil dos provetes, como é visível na Figura 41. Na Figura 42 é possível observar as superfícies de rotura dos provetes, e ainda as camadas inferiores e superiores, as paredes externas e o enchimento de 50% de todos os provetes.

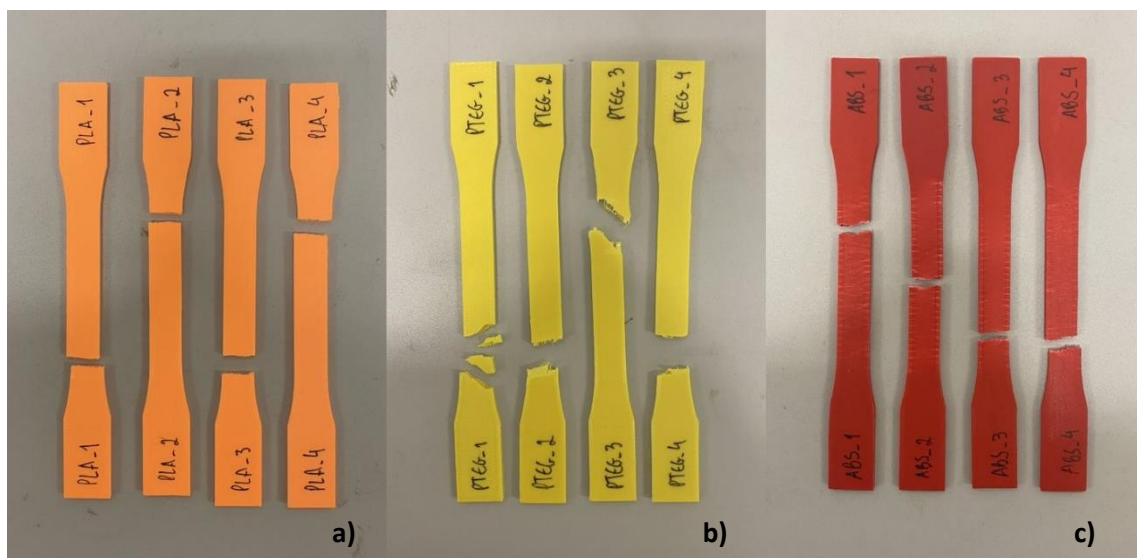


Figura 41 - Roturas dos provetes *bulk*: a) PLA; b) PETG e c) ABS



Figura 42 - Secções dos provetes *bulk* após rotura: a) PLA; b) PETG e c) ABS

Após a realização de todos os ensaios, os dados foram tratados através de uma folha de cálculo Excel® de forma a calcular o E , a tensão limite elástico, a tensão de rotura e o alongamento máximo.

3.1.1.5. Modos de rotura

Através da observação da Figura 41 verifica-se que as roturas não se deram na totalidade na zona útil dos provetes. Uma justificação plausível para este acontecimento poderá ser o mau nivelamento da mesa de adesão. Durante o nivelamento e impressão dos provetes, a base de adesão poderá ter ficado ligeiramente inclinada. Como resultado, aquando da passagem do extrusor num dos lados da mesa cuja distância entre os elementos seja maior, a fusão entre as linhas pode não ter ocorrido de forma homogênea, como mostrado previamente na Figura 37. A má homogeneização da fusão poderá ter provocado o desvio da rotura dos provetes para fora da zona útil. Apesar das roturas surgirem na zona útil do provete ou muito perto do início do raio de curvatura destes elementos, os casos em que as roturas surgiram mais afastadas do centro da zona útil não foram descartados. Como será possível de verificar ao longo dos próximos capítulos, os resultados obtidos foram bastante próximos entre os diferentes provetes, com desvios padrões e coeficientes de variação aceitáveis.

3.1.1.6. Análise de resultados

As propriedades mecânicas à tração são calculadas tendo como base a norma EN ISO 527-1 [96]. O valor de E é calculado através da equação (2), em que $\Delta\sigma$ [MPa] representa a diferença de tensão e $\Delta\varepsilon$ a variação da deformação entre os pontos de $\varepsilon = 0,05\%$ e $0,25\%$.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2)$$

Para o cálculo de E , são selecionadas, nos gráficos resultantes do ensaio de tração, as tensões correspondentes a deformações de $0,05\%$ e $0,25\%$. A tensão limite elástico é obtida para uma deformação de $0,2\%$, traçando uma reta paralela à curva de proporcionalidade entre a tensão e a deformação. O resultado da interseção entre as duas linhas indica a tensão limite de proporcionalidade $0,2$ ($R_{p0,2}$), ou também conhecida tensão limite elástico a $0,2\%$. O cálculo da tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}x}$, segue a equação (3), em que $P_{m\acute{a}x}$ [N] corresponde à força máxima aplicada sobre A [mm²], área inicial do provete.

$$\sigma = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad (3)$$

A deformação máxima, $\varepsilon_{m\acute{a}x}$, correspondente ao alongamento máximo, também foi anotada.

3.1.1.7. Curvas $P-\delta$

Com os dados recolhidos durante os ensaios de tração é possível obter as curvas $P-\delta$. A Figura 43, Figura 44 e Figura 45 mostra as curvas $P-\delta$, dos provetes em PLA, PETG e ABS, respetivamente. É possível verificar que, em cada ensaio, existe na zona elástica instantes em que ocorrem pequenas quebras de rigidez. Estas quebras resultam da remoção do extensómetro, pelo que são desconsideradas para efeitos de cálculo da zona elástica. Após análise das curvas $P-\delta$, é feita uma análise dos dados obtidos, com o cálculo de médias de forças máximas, deslocamentos máximos, mas pela observação dos gráficos é possível retirar algumas conclusões:

- Os ensaios dos provetes de PLA mostram uma repetibilidade dos resultados na zona elástica e as forças máximas atingidas são praticamente idênticas. Na zona dúctil, os deslocamentos de cada provete diferem relativamente pouco entre si.

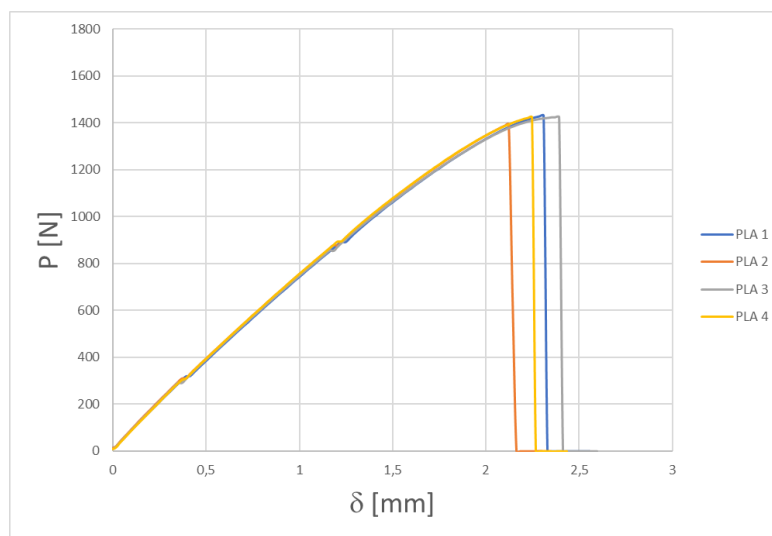


Figura 43 - Curvas $P-\delta$ dos provetes *bulk* de PLA

- Os ensaios dos provetes de PETG mostram uma estabilidade de resultados na zona elástica e na força máxima atingida. Porém, na zona dúctil os provetes 2 e 3 revelam um comportamento anormal por não apresentarem uma rotura abrupta, comparativamente aos outros dois ensaios. Estes dois provetes sofreram um maior alongamento após obtenção das forças máximas. Este acontecimento pode estar correlacionado com melhores fusões das camadas exteriores, pois as camadas internas rompem previamente às exteriores

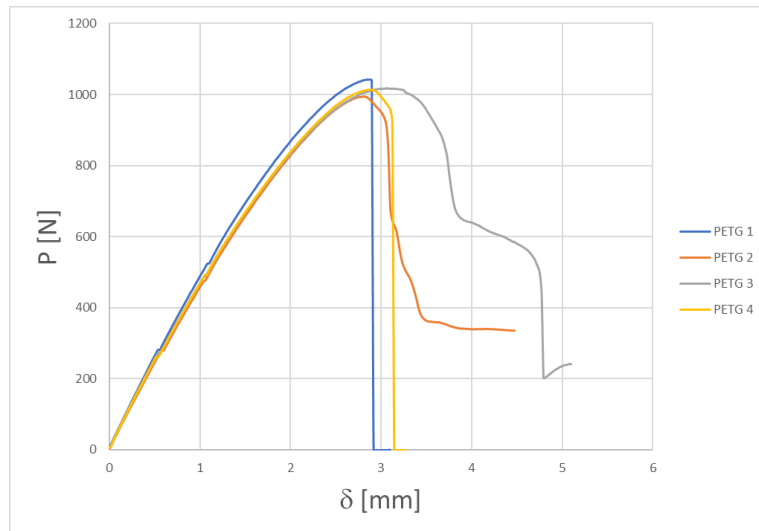


Figura 44 - Curvas P - δ dos provetes *bulk* de PETG

- Os ensaios dos provetes de ABS mostram uma similaridade quer na zona elástica, quer na zona dúctil e na força máxima atingida, variando apenas o deslocamento até a ocorrência da rotura. Verifica-se que os provetes, após obtenção das forças máximas, continuaram a ser deformados plasticamente, resultando numa zona plástica bem pronunciada, o que constitui uma diferença de comportamento relativamente aos materiais anteriormente testados.

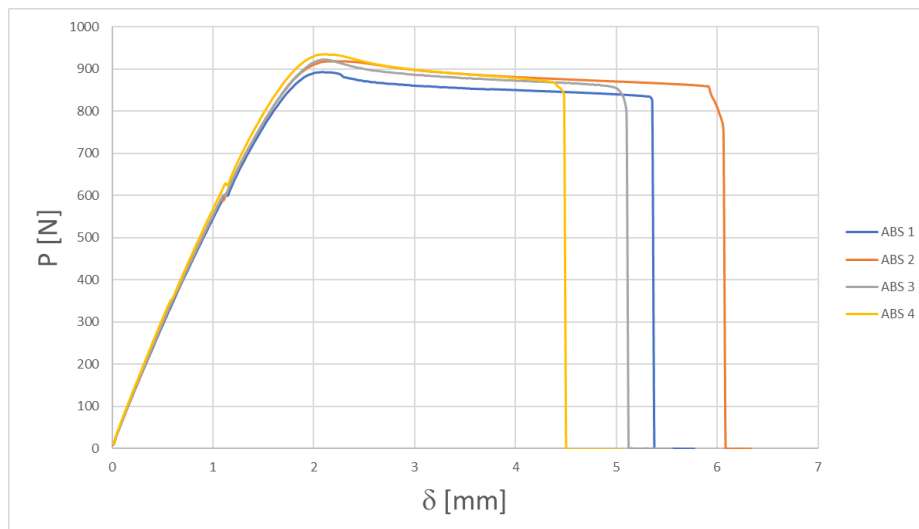


Figura 45 – Curvas P - δ dos provetes *bulk* de ABS

3.1.1.8. Curvas σ - ϵ nominais e reais

A Figura 46, Figura 47 e Figura 48 representa as curvas σ - ϵ nominais que resultam da aplicação da equação (3) para o cálculo das tensões e deformações.

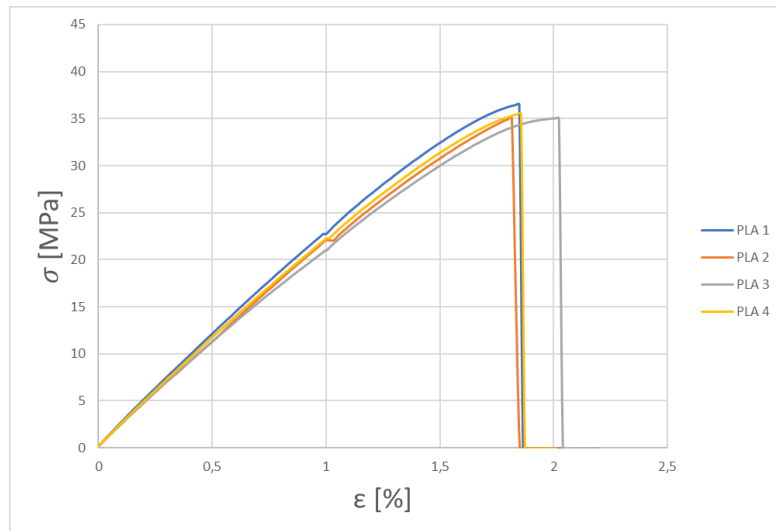


Figura 46 - Curvas σ - ε dos provetes *bulk* de PLA

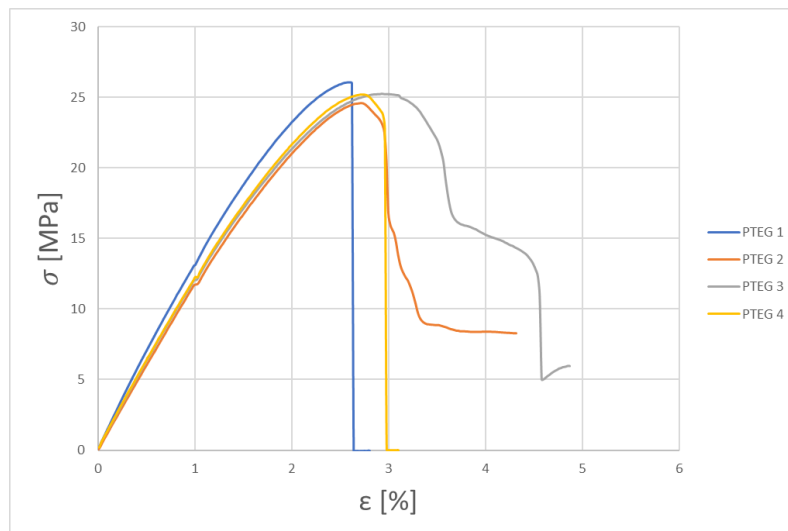


Figura 47 - Curvas σ - ε dos provetes *bulk* de PETG

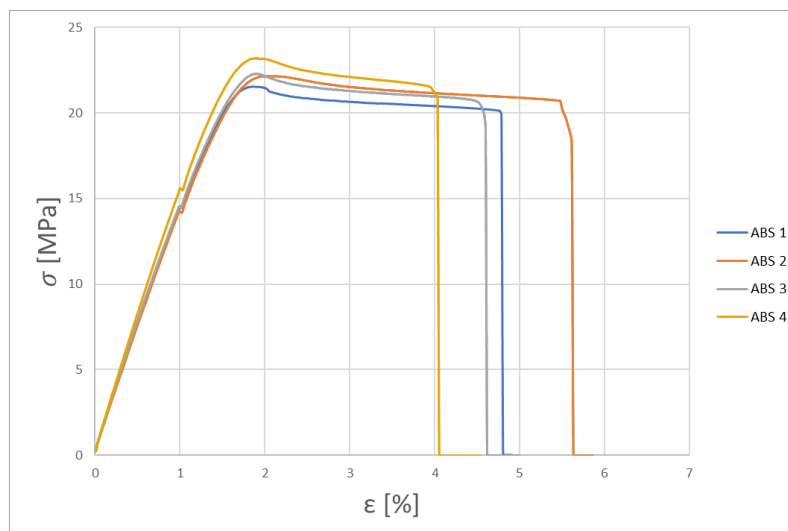


Figura 48 - Curvas σ - ε dos provetes *bulk* de ABS

O cálculo da tensão limite elástico à tração é feito recorrendo à interseção de uma reta com declive paralelo à curva σ - ε , para uma deformação de 0,2%. A Figura 49 mostra o processo para o provete 2 no material ABS.

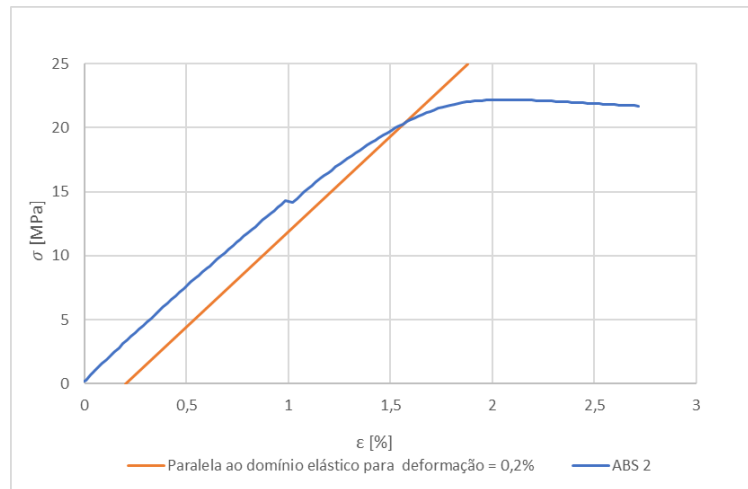


Figura 49 - Determinação da tensão limite elástico à tração a 0,2% (ABS - provete 2)

Foi ainda calculado a tensão real a 0,2% da deformação através da equação (4), que correlaciona a tensão obtida a 0,2% de deformação com o coeficiente de Poisson, ν , e E .

$$\sigma_{R0.2} = \frac{\sigma_{0.2}}{\left(1 - \frac{\nu * \sigma_{0.2}}{E}\right)^2} \quad (4)$$

Os coeficientes de Poisson foram obtidos por trabalhos realizados por Lokesh, et al. [93], Guessasma, et al. [97] e Zou, et al. [98], e são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Coeficientes de Poisson dos materiais impressos, [93], [97], [98]

Material	Coefficiente
PLA [93]	0,36
PETG	0,4
ABS	0,37

3.1.1.9. Resumo e análise de resultados

Após toda a análise e tratamento dos dados obtidos, são apresentados os dados importantes para a continuação do projeto. A Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19 apresenta as propriedades mecânicas dos três materiais possíveis de retirar com os ensaios de tração efetuados.

Tabela 17 - Propriedades mecânicas obtidas à tração do PLA

Provete	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Tensão a 0,2% real [MPa]	Along. máximo [%]	Tensão a 0,05%	Tensão a 0,25%	Módulo de Young [MPa]
1	1431,70	2,56	35,22	36,52	35,60	2,04	1,36	6,08	2360,87
2	1394,78	2,35	29,80	35,10	30,07	2,01	0,95	5,75	2400,99
3	1425,39	2,60	30,25	35,04	30,54	2,19	1,33	5,94	2306,44
4	1423,26	2,44	33,00	35,55	33,34	2,01	1,28	5,97	2346,67
Média	1418,79	2,48	32,07	35,55	32,39	2,06	1,23	5,94	2353,74
Desvio Padrão	16,40	0,11	2,53	0,69	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

Tabela 18 - Propriedades mecânicas obtidas à tração do PETG

Provete	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Tensão a 0,2% Real [MPa]	Along. Máximo [%]	Tensão a 0,05%	Tensão a 0,25%	Módulo de Young [MPa]
1	1041,41	3,10	17,20	26,05	17,36	2,80	0,62	3,64	1510,12
2	993,73	4,47	16,90	24,60	17,08	4,32	0,52	3,08	1283,46
3	1018,46	5,09	17,20	25,27	17,38	4,87	0,63	3,27	1319,88
4	1014,31	3,27	17,30	25,19	17,48	3,10	0,56	3,23	1334,57
Média	1016,98	3,98	17,15	25,28	17,32	3,77	0,58	3,31	1362,01
Desvio Padrão	19,55	0,96	0,17	0,60	0,17	0,98	0,05	0,24	101,05
CoV [%]	1,92	24,08	1,01	2,37	0,99	26,02	9,00	7,21	7,42

Tabela 19 - Propriedades mecânicas obtidas à tração do ABS

Provete	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Tensão a 0,2% Real [MPa]	Along. Máximo [%]	Tensão a 0,05%	Tensão a 0,25%	Módulo de Young [MPa]
1	893,80	5,35	20,58	21,54	20,79	5,68	0,98	3,96	1487,10
2	919,47	5,35	20,27	22,16	20,47	5,86	1,00	3,98	1489,59
3	921,79	5,35	20,89	22,28	21,10	5,01	1,00	4,01	1507,76
4	934,66	5,05	18,70	23,21	18,84	4,55	0,78	4,28	1751,63
Média	917,43	5,28	20,11	22,30	20,30	5,27	0,94	4,06	1559,02
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

Pela análise dos dados apresentados e pela Figura 50 é possível reter que o PLA apresentou um comportamento predominantemente elástico até à rotura. O comportamento elástico é caracterizado pela evolução linear das forças em relação ao deslocamento até à rotura. O PLA foi o material que resistiu a um maior carregamento, atingindo forças máximas de $1418,79 \pm 16,40$ N superior em comparação com os restantes materiais. Paralelamente ao carregamento superior, o PLA foi o material que sofreu menos deformações de rotura, $2,48 \pm 0,17$ mm. O cálculo do módulo de Young mostra que o PLA obteve o valor mais elevado $2353,74 \pm 39,02$ MPa. A análise dos resultados do PETG mostra que, dois provetes apresentam um comportamento elástico, ocorrendo a rotura assim que atingida a força máxima. Os outros dois provetes deformam-se plasticamente até ocorrência de rotura. O PETG foi o segundo material a resistir a mais carregamento ($1016,98 \pm 16,40$ N). Apesar de ser o segundo material com maior carga, é o material que apresenta um módulo de Young mais baixo ($1362,01 \pm 101,05$ MPa). O ABS foi o material que resistiu a menor carregamento ($917,41 \pm 17,11$ N) mas, após o regime elástico, verifica-se um comportamento plástico. O módulo de Young do ABS foi o segundo mais elevado ($1559,02 \pm 128,73$ MPa) devido a menores deformações para o mesmo valor de carregamento do que o PETG. Visualmente, na Figura 50, a zona elástica do ABS é mais inclinada do que a do PETG.

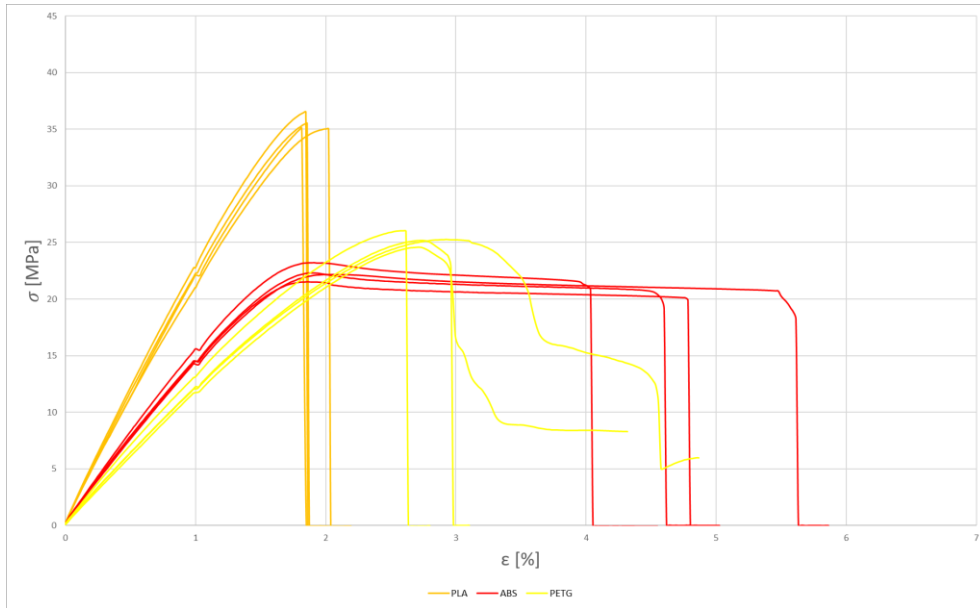


Figura 50 - Comparação de curvas σ - ε dos diferentes materiais

3.1.2. Ensaio das juntas adesivas

Neste subcapítulo são descritas todas as variantes de geometrias das juntas, os adesivos utilizados, processos de fabricos das ligações adesivas, os respetivos ensaios de tração das mesmas e discussão de resultados.

3.1.2.1. Geometria das juntas

No decorrer deste trabalho são analisadas 3 diferentes geometrias de juntas designadamente SLJ, chanfro interior (*scarf*) e com degrau (*single step* ou *step*). A Figura 51 mostra os diferentes tipos de geometria em estudo e a Tabela 20 indica os diferentes parâmetros em cada geometria.

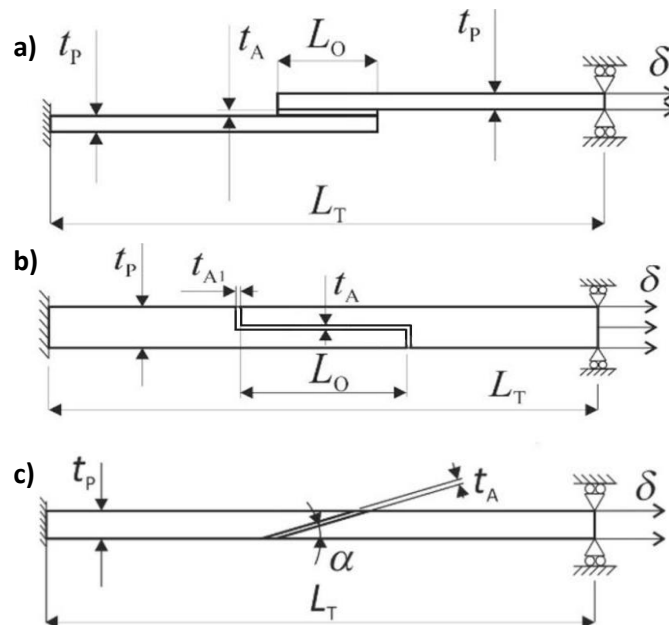


Figura 51 - Diferentes geometrias de junta: a) SLJ; b) *step*; c) *scarf*

Tabela 20 - Diferentes parâmetros aplicados nas diferentes geometrias de junta

Parâmetro \ Geometria	SLJ	Step	Scarf
L_T [mm]	180	180	180
L_O [mm]	5	5	-
	10	10	-
	20	20	-
t_A [mm]	0,2	0,2	0,2
t_{A1} [mm]	-	0,2	-
t_P [mm]	5	5	5
α [°]	-	-	90
	-	-	28,85
	-	-	13,9
b [mm]	25,4	25,4	25,4

Os valores de α , para a geometria *scarf* indicados na Tabela 20, apresentam valores anormais no estudo de juntas adesivas, devido à intenção de no final dos ensaios experimentais e numéricos ser possível fazer uma comparação direta deste tipo de juntas com as restantes geometrias SLJ e *step*. Com $\alpha = 90^\circ$ é o equivalente a um $L_O = 5$ mm, com $\alpha = 28,85^\circ$ é o equivalente a $L_O = 10$ mm e $\alpha = 13,9^\circ$ é o equivalente a $L_O = 20$ mm, como mostra a Figura 52 a), b) e c), respetivamente. No decorrer deste trabalho, e para facilitar a nomenclatura das juntas e futuras discussões de resultados, as juntas *scarf* serão analisadas pelo L_O ao invés de α para que a comparação com outras geometrias seja mais fácil.

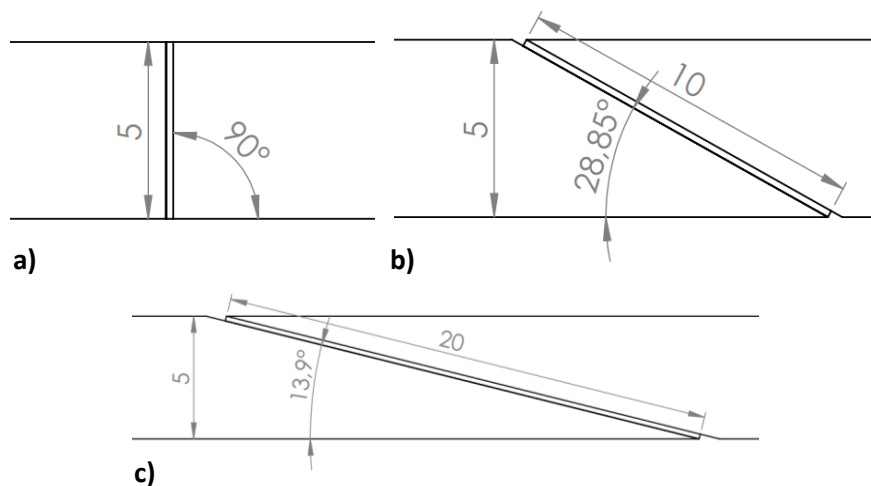


Figura 52 - Geometria *scarf* com os diversos valores de α e respetivos valores de L_O : a) $L_O = 5$ mm; b) $L_O = 10$ mm; c) $L_O = 20$ mm

3.1.2.2. Adesivos utilizados

Além dos 3 materiais utilizados nos aderentes, são considerados dois adesivos, Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752.

O adesivo Araldite® 2015 da Huntsman® (Figura 53), é uma pasta epóxida de dois componentes de iguais proporções (componente A e B, resina e endurecedor). A aplicação deste adesivo dá-se com

a ajuda de uma pistola e bico misturador que promove a mistura dos dois componentes no seu interior. Na saída do bico, a mistura é homogênea de tonalidade branca. Este adesivo apresenta um comportamento dúctil de alta resistência [99] e com boa resistência à clivagem [100]. Após aplicação do adesivo, o tempo de cura varia com a temperatura, cerca de 10h a 23°C. A Figura 54 mostra as curvas σ - ε de provetes *bulk* do adesivo Araldite® 2015 e a Tabela 21 apresenta as propriedades do adesivo. Estas e outras informações podem ser consultadas na ficha técnica disponibilizada pelo fabricante e possível de consultar no Anexo D.



Figura 53 - Adesivo Araldite® 2015

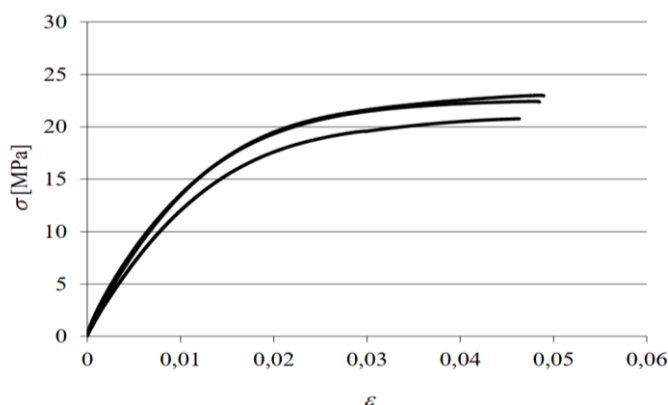


Figura 54 - Curvas σ - ε obtidas por ensaios a provetes *bulk* de adesivo Araldite®2015 [101]

Tabela 21 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [101]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente de Poisson, ν^*	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$14,60 \pm 1,30$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$17,90 \pm 1,80$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$43,90 \pm 3,40$
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	$4,70 \pm 0,34$

* Valores do fabricante

O adesivo Sikaforce® 7752 FRW L60 da Sika® é um adesivo composto por dois componentes de diferentes proporções (5 proporções mássicas de componente A, resina, para 1 proporção mássica de componente B, endurecedor). Como é possível verificar na Figura 55, este adesivo é fornecido em 2 bidões, pelo que a sua mistura deve ser feita manualmente com a ajuda de uma balança de forma a medir a relação de peso dos componentes. A sua aplicação nos aderentes é feita com uma espátula apenas quando a mistura apresentar uma homogeneidade de tonalidade bege. Esta tonalidade provém do endurecedor. O resultado desta mistura resulta um adesivo com elevada ductilidade e flexibilidade [102]. O adesivo apresenta um tempo de cura relativamente elevado quando curado à temperatura ambiente, de 48h. Porém, este tempo pode ser acelerado com ajuda do aumento de temperatura. A Figura 56 mostra as curvas σ - ε de provetes *bulk* do adesivo Sikaforce® 7752 e a Tabela 22 apresenta as propriedades do adesivo Estas e outras informações podem ser consultadas na ficha técnica disponibilizada pelo fabricante e possível de consultar no Anexo E.



Figura 55 - Adesivo Sikaforce® 7752 FRW L60

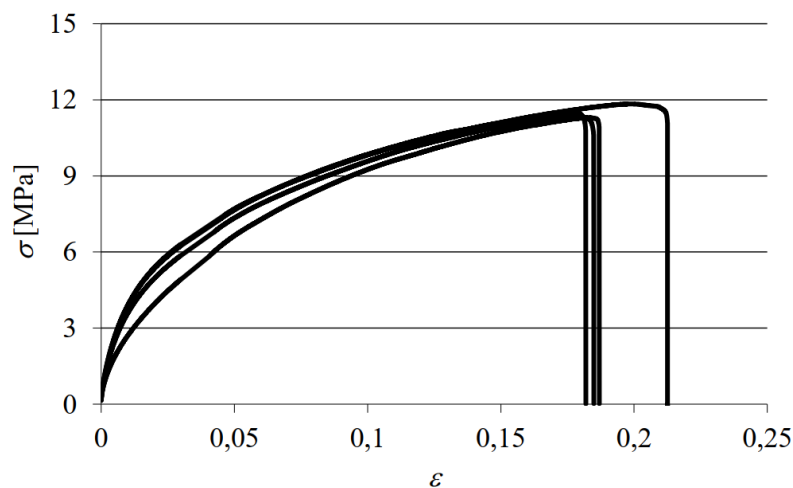


Figura 56 - Curvas σ - ε obtidas por ensaios a provetes *bulk* de adesivo Sikaforce®7752 [102]

Tabela 22 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [102]

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, E [GPa]	$0,49 \pm 0,09$
Coefficiente de Poisson, ν^*	0,30
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$3,24 \pm 0,48$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$11,48 \pm 0,25$
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	$19,18 \pm 1,40$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$0,19 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$5,16 \pm 1,14$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$10,17 \pm 0,61$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$54,82 \pm 6,38$
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	$2,36 \pm 0,17$
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	$5,71 \pm 0,47$

* Valores do fabricante

No decorrer o trabalho, com a finalidade de facilitar a leitura do processo experimental, numérico e resultados, são adotadas abreviaturas para a designação dos adesivos em estudo, como se pode verificar na Tabela 23.

Tabela 23 - Correspondência da designação comercial dos adesivos em estudo e sua respetiva designação curta

Designação curta	Adesivo
2015	Araldite®2015
7752	Sikaforce®7752

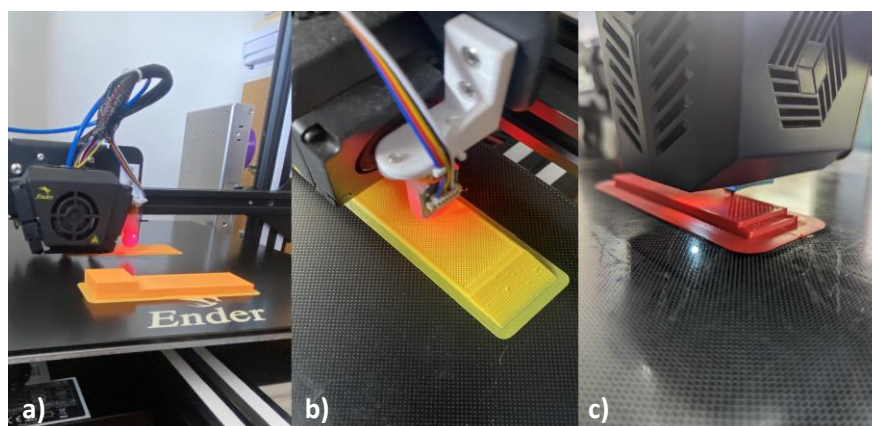
3.1.3. Processo de fabrico

O estudo experimental incide no ensaio de tração das geometrias descritas em 3.1.2.1. Devido às diferentes configurações de geometria, material de aderentes e adesivo, foi realizado um plano de fabrico, apresentado na Tabela 24, que possibilita uma melhor organização das quantidades dos elementos a imprimir. De forma resumida são estudadas 54 diferentes configurações: 3 (materiais) x 2 (aderentes) x 3 (tipos de junta) x 3 (variantes do tipo de junta). Serão testados 4 juntas por cada condição, o que na totalidade resulta em 216 juntas, ou seja, 432 aderentes a serem impressos.

Tabela 24 - Plano de fabrico de juntas

	L_o / θ	Araldite® 2015			Sikaforce® 7752			TOTAL
		5	10	20	5	10	20	
PLA	SLJ	4	4	4	4	4	4	24
	scarf	4	4	4	4	4	4	24
	step	4	4	4	4	4	4	24
PETG	SLJ	4	4	4	4	4	4	24
	scarf	4	4	4	4	4	4	24
	step	4	4	4	4	4	4	24
ABS	SLJ	4	4	4	4	4	4	24
	scarf	4	4	4	4	4	4	24
	step	4	4	4	4	4	4	24
TOTAL		24	24	24	24	24	24	216

De forma semelhante aos provetes *bulk*, comentado no capítulo 3.1.1, os aderentes ABS foram fabricados pela empresa 3DMaker e os restantes em PLA e PETG por fabrico próprio. Os parâmetros de impressão indicados na Tabela 12 mantiveram-se inalterados, tal como o *software slicer* para o fabrico dos aderentes. O tempo de fabrico demorou 2 horas para 2 aderentes para os casos de PLA e PETG. Para o ABS, devido à velocidade de impressão mais elevada, demoraram relativamente menos, cerca de 1h40 min. A Figura 57 mostra a impressão de diferentes geometrias em diferentes materiais. Nos aderentes ABS verificaram-se alguns problemas de impressão, tais como fusão incompleta de camadas e má adesão à mesa de impressão. Este facto pode estar correlacionado com o facto de o ABS ser um material bastante sensível à temperatura, pelo que a impressão sem controlo da temperatura ambiente pode fornecer resultados indesejados.

Figura 57 - Impressão 3D de aderentes: a) SLJ em PLA; b) *scarf* em PETG e c) *step* em ABS

Devido ao elevado número de juntas a fabricar, o processo de fabrico foi seccionado em diferentes “sessões”. Em cada sessão eram preparadas 36 juntas, apenas se trabalhando um material aderente e adesivo por sessão. Como exemplo, numa sessão foram fabricadas todas as juntas com o PLA e o adesivo 2015. No fim, foram realizadas 6 sessões de fabrico de juntas.

Em cada sessão, as faces de aplicação do adesivo eram preparadas com uma lixagem e limpeza, de forma a aumentar a rugosidade, eliminar sujidade e remover pequenas falhas que pudessem surgir durante a impressão dos aderentes. Na Figura 57b) há a presença de pequenos nódulos de

filamento resultantes de restos de filamento no interior do extrusor. Nas juntas *scarf*, as faces inclinadas apresentam na verdade pequenos degraus, como mostra a Figura 58. Estes e outros problemas podem conduzir a falhas de adesão na junta, daí que todas as faces dos aderentes foram previamente lixadas com lixa de grau 80 e posteriormente limpas com acetona no caso de PLA e PETG e álcool isopropílico no ABS. A utilização de diferentes líquidos de limpeza deve-se ao facto de o ABS reagir facilmente com a acetona, danificando a superfície de adesão. Durante a limpeza dos aderentes reparou-se que no caso do PLA, acetona reagia com a superfície, caso o tempo de contacto entres os dois elementos fosse demorado, pelo que se optou por limpar as superfícies com álcool isopropílico. A Figura 58 mostra um pré e pós processamento de limpeza para as faces de geometrias *scarf*. É de notar uma melhor homogeneização da superfície após a remoção dos pequenos degraus decorrentes do processo de fabrico.

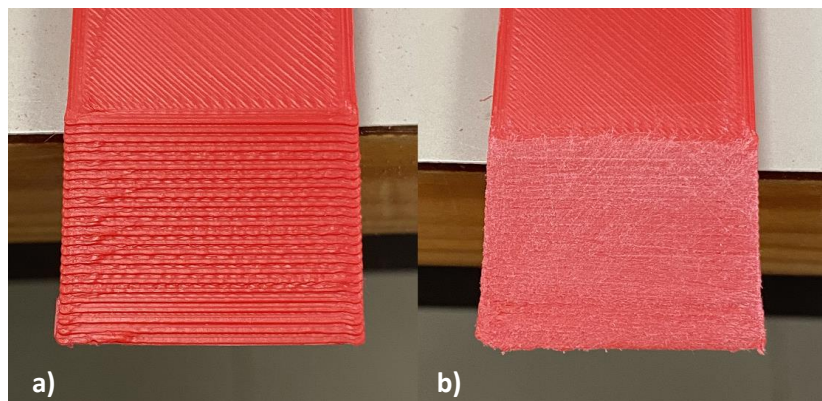


Figura 58 – Processo de lixagem e limpeza: a) sem preparação da superfície; b) após preparação da superfície

Assim que as faces eram tratadas, procedia-se à aplicação de fios de cobre com 0,2 mm de diâmetro sob a zona de sobreposição dos aderentes com fita cola, para permitir que a espessura de adesivo se mantenha constante. A Figura 59 mostra a aplicação do adesivo 2015 nos aderentes de ABS e é possível visualizar o bico misturador. O adesivo 7752 necessita de ser preparado e misturado antes da sua aplicação. Eram preparados 120 g de adesivo por sessão, sendo 100 g resina e os restantes 20 g de endurecedor, resultando numa proporção mássica de 5 para 1. A Figura 60 mostra a medição e a mistura dos elementos até obtenção de uma pasta homogênea de tons beges.



Figura 59 - Aplicação de adesivo Araldite® 2015



Figura 60 - Preparação de adesivo Sikaforce® 7752: a) pesagem de 100 g de resina e aplicação do endurecedor; b) mistura homogênea dos componentes

Após a aplicação dos adesivos nos aderentes, estes eram fixos temporariamente com molas para que, durante o processo de cura, as juntas não percam o alinhamento, pois com o adesivo no estado líquido facilmente um dos aderentes pode se deslocar relativamente ao outro. A Figura 61 e Figura 62 mostra alguns exemplos da aplicação das molas durante o processo de cura.



Figura 61 - Sessão de preparação de juntas PETG com Araldite® 2015

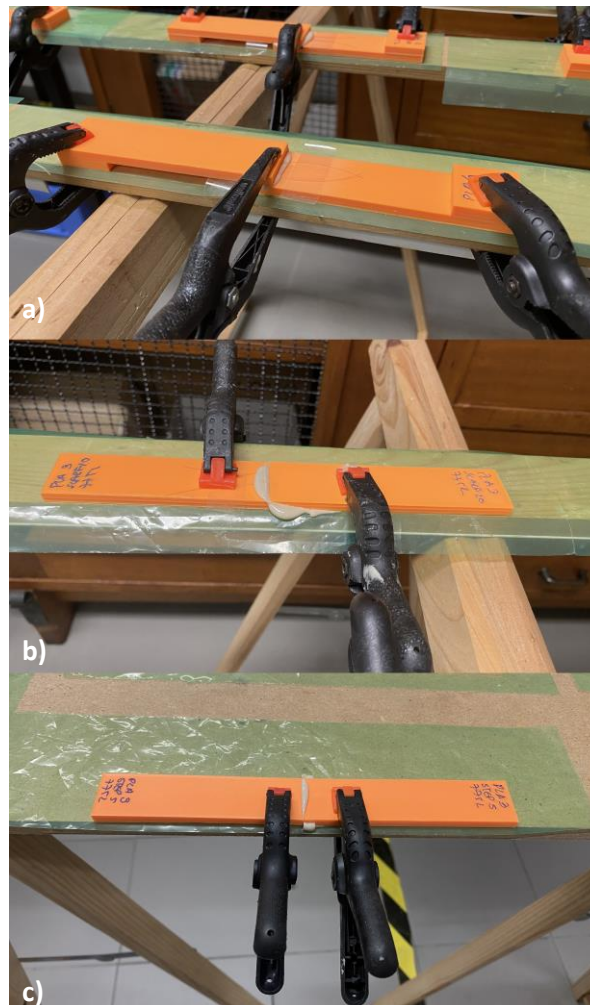


Figura 62 – Fixação das juntas durante o processo de cura do adesivo: a) SLJ; b) junta *scarf* e c) junta *step*

Com a visualização da Figura 61 e Figura 62 é de notar o excesso de adesivo nas bordas dos aderentes. Este excesso influencia os campos de tensões na zona de sobreposição, como tal, também o valor da resistência da junta. Após a cura total do adesivo, o excesso é removido com a ajuda de alicates e uma furadora equipada com uma mó, para criar uma superfície lisa no qual o adesivo fica à face dos aderentes, tal como mostra a Figura 63. A utilização da furadora com a mó pode danificar os aderentes, pelo que foi deixada uma camada muito fina de adesivo em excesso como mostra a Figura 63 b).

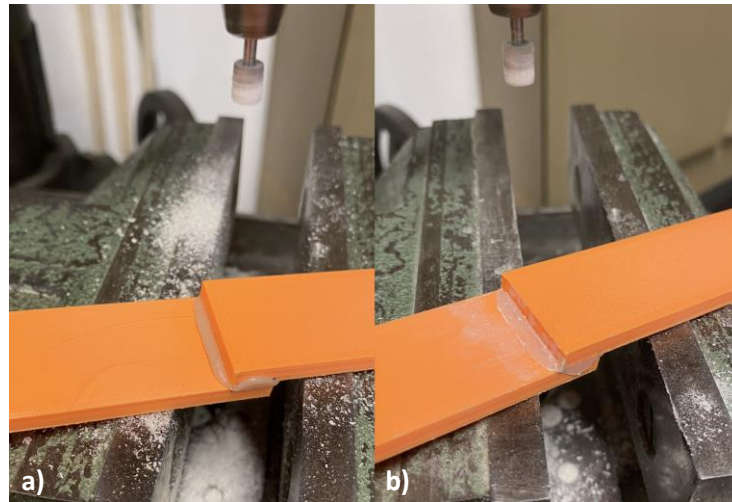


Figura 63 – Remoção do excesso de adesivo na furadora equipada com mó: a) antes da limpeza e b) após a limpeza

3.1.4. Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados na mesma máquina utilizada para os ensaios de tração dos provetes *bulk*, descrita no capítulo 3.1.1.3. As condições de ensaio foram alteradas para uma velocidade constante de 1mm/min. A Figura 64 mostra os ensaios de cada geometria em diferentes materiais de aderente.

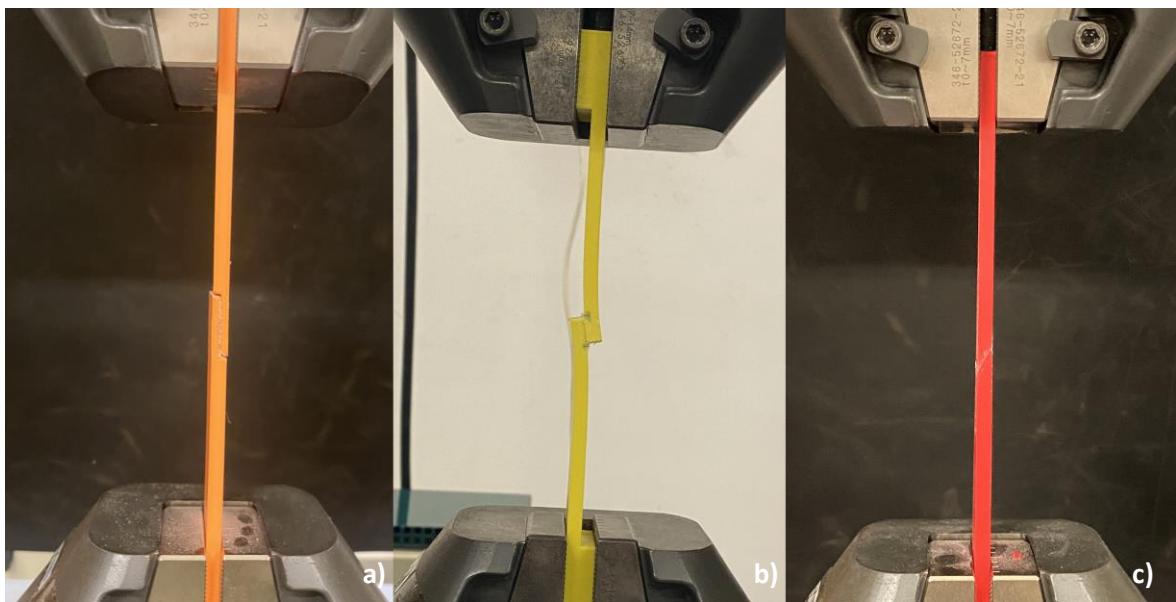


Figura 64 - Ensaio de tração das juntas: a) *step* com PLA; b) SLJ com PETG; c) *scarf* com ABS

As juntas foram submetidas até à rotura ou perto da sua ocorrência já que determinadas juntas, após atingirem a força máxima, prolongaram o seu deslocamento em que a rotura era iminente. O sucedido deve-se à rotura nas camadas internas dos aderentes ocorrer prematuramente, devido ao seu enchimento de 50%, ficando por fim as camadas exteriores a suportar uma carga residual, como mostra a Figura 65.

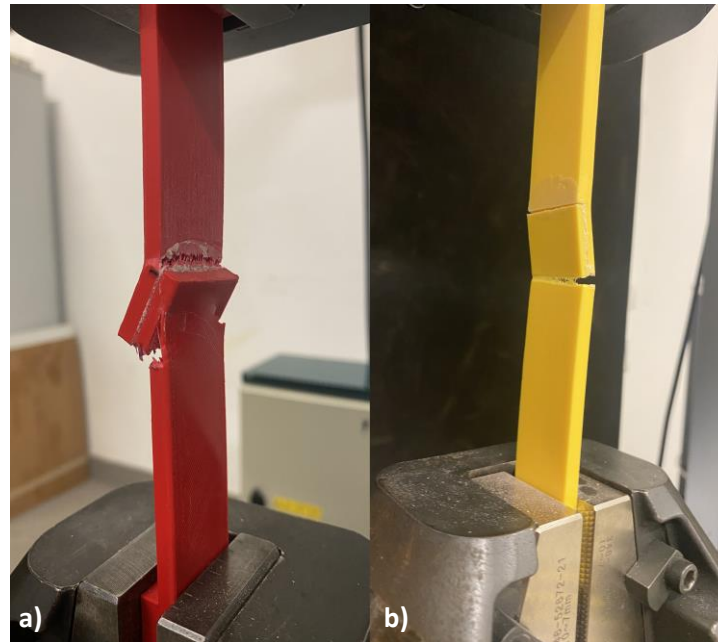


Figura 65 - Ensaio de tração das juntas com rotura iminente: a) SLJ com ABS; b) *step* com PETG

Terminados os ensaios de tração das juntas, executou-se o tratamento de dados, recorrendo a folhas de cálculo Excel®, de forma a obter a força máxima, rigidez máxima e energia de rotura.

3.1.4.1. Modos de rotura

Os modos de rotura das juntas adesivas ocorreram maioritariamente no aderente, havendo casos em que a rotura ocorreu de forma coesiva. A Tabela 25, Tabela 26 e Tabela 27 mostra os modos de rotura para cada geometria, subdivididas por material aderente, adesivo e L_0 . O modo de rotura preferencial é o modo coesivo, que consiste na rotura no interior do adesivo quando a ligação entre o aderente e adesivo é mais forte que a resistência interna do adesivo [50]. Contudo, o modo de rotura pelo aderente é um bom indicador da utilização da total resistência pelo aderente [50].

Com a utilização dos aderentes de PLA e adesivo 2015, as roturas surgiram sempre no aderente, enquanto com o adesivo 7752 surgem sempre de forma coesiva, para as diferentes geometrias e L_0 . Nas juntas com os aderentes de ABS, para os diferentes adesivos e geometrias de juntas, as roturas surgiram maioritariamente pelo aderente, com exceção da condição $L_0=5$ mm nas juntas *scarf* com o adesivo 7752. Contudo, na maioria das juntas com $L_0=5$ mm e o adesivo 7752 a rotura do aderente deveu-se à falta de fusão entre as camadas interiores e exteriores. Este problema foi regular, porque este material é bastante sensível a diferenças de temperatura, pelo que, não estando num ambiente controlado a infusão entre camadas aumenta. Apesar de a impressora Ender 6, utilizada no fabrico dos aderentes de ABS, permitir um melhor controlo de temperatura devido à sua proteção em acrílico ou vidro, como mostra a Figura 32 b), a parte superior é aberta. Com a existência desta abertura, o controlo da temperatura não é o mais indicado. As juntas com os aderentes de PETG, apresentaram sempre roturas pelo aderente, fora o caso de $L_0=5$ mm nas juntas *scarf*.

Tabela 25 - Modos de rotura SLJ

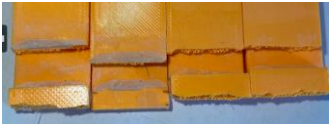

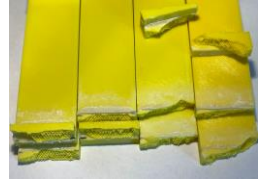














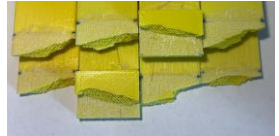



Adesivo	Lo	PLA	ABS	PETG			
					4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente
Araldite® 2015	5				4 Aderente	3 Aderente + 1 Coesiva adesiva	4 Aderente
	10				4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente
	20				4 Coesiva adesiva	4 Aderente	4 Aderente
Sikaforce® 7752	5				4 Coesiva adesiva	2 Aderente + 2 Coesiva adesiva	4 Aderente
	10				4 Coesiva adesiva	4 Aderente	4 Aderente
	20				4 Coesiva adesiva	4 Aderente	4 Aderente

Tabela 26 - Modos de rotura das juntas *step*





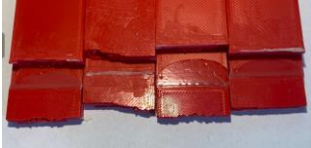

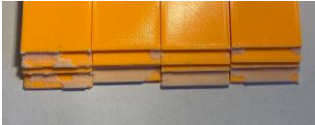
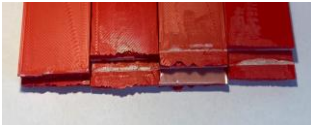



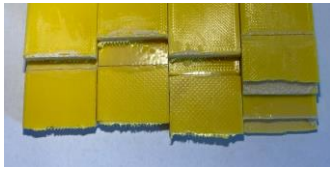




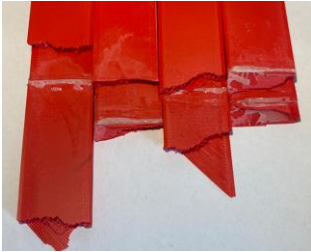

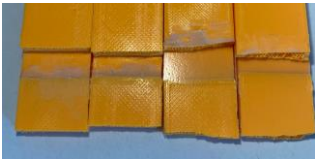
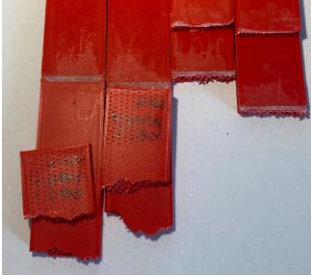
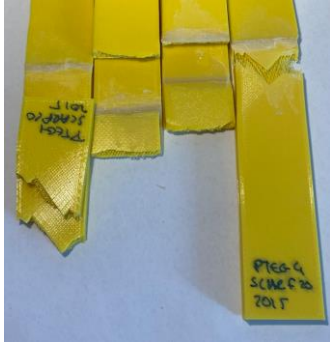
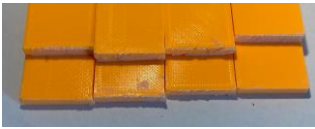


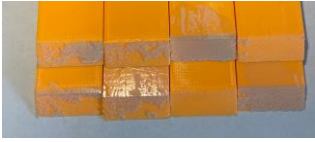
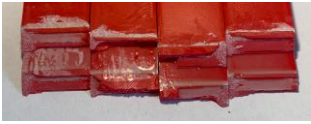
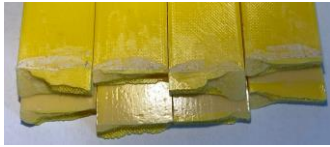



Adesivo	Lo	PLA	ABS	PETG
				
Araldite® 2015	5	4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente
	10			
	20	4 Aderente	4 Aderente	4 Aderente
Sikaforce® 7752	5			
	10	4 Coesiva Adesiva	4 Aderente	4 Aderente
	20			
		4 Coesiva Adesiva	4 Aderente	4 Aderente

Tabela 27 - Modos de rotura das juntas scarf

Adesivo	Lo	PLA	ABS	PETG
Araldite®2015	5	 4 Coesiva adesiva	 4 Aderente	 4 Aderente
	10	 4 Aderente	 4 Aderente	 4 Aderente
	20	 4 Aderente	 4 Aderente	 4 Aderente
Sikaforce®7752	5	 4 Coesiva adesiva	 3 Aderente + 1 Coesiva adesiva	 2 Coesiva adesiva + 2 Aderente
	10	 4 Coesiva adesiva	 4 Aderente	 4 Aderente
	20	 1 Aderente + 3 Coesiva adesiva	 4 Aderente	 4 Aderente

3.1.4.2. Curvas $P-\delta$ e resistência das juntas

As curvas $P-\delta$ consistem na representação gráfica da força em função do deslocamento. Através destas curvas, é possível retirar a força máxima ($P_{m\acute{a}x}$) suportada pela junta até à rotura, tal como o deslocamento em que tal se sucede. No seguimento deste trabalho, são apresentadas as curvas $P-\delta$ de cada geometria em função do comprimento de sobreposição, adesivo e aderente. Após o tratamento e análise dos quatros provetes em cada condição, foi retirado o provete que se mais se afastava da média, de forma a se obter dados mais precisos e obter desvios padrões e coeficientes de variação inferiores e aceitáveis. Com este tratamento de dados, é possível ainda calcular a rigidez da junta. A rigidez, definida como k [N/mm], é a capacidade de um elemento resistir à deformação provocada por uma força externa.

A Figura 66 a) e b) mostra as curvas $P-\delta$ para a geometria SLJ, com aderente PLA e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Verifica-se que as juntas apresentam um comportamento elástico até à sua rotura. O comportamento essencialmente elástico de uma junta é caracterizado pela evolução perto de linear das forças máximas em relação ao deslocamento até à rotura.

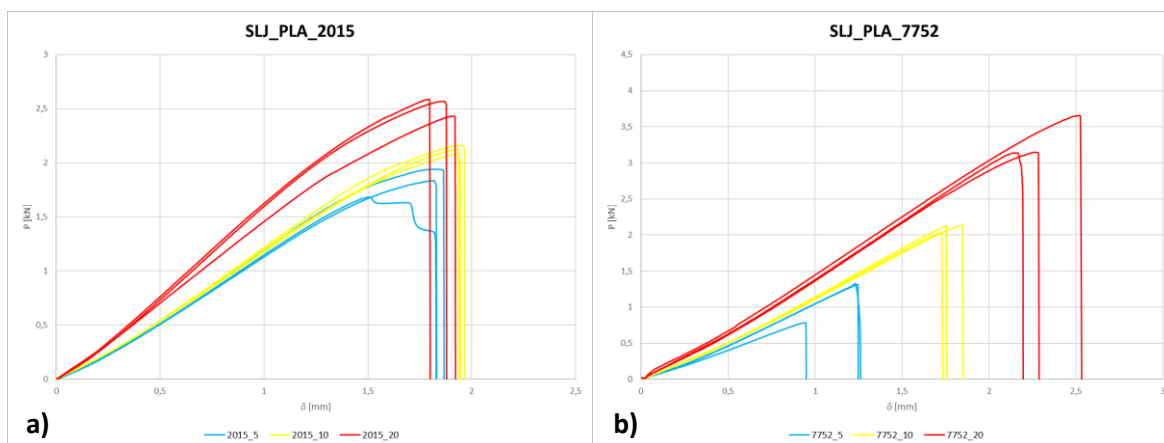


Figura 66 - Curvas $P-\delta$ para as SLJ com PLA: a) 2015; b) 7752

Com o adesivo 2015, verifica-se um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 da mesma forma que se verifica com o adesivo 7752. Contudo a diferença surge na variação dos deslocamentos de rotura. As juntas com adesivo 2015 resultaram roturas no aderente e os deslocamentos na rotura são bastante próximos para os diferentes L_0 . No caso das juntas 7752, como as roturas ocorreram de forma coesiva no adesivo verifica-se um aumento do deslocamento na rotura. Para cada condição de adesivo e de L_0 , existem ligeiras divergências nos deslocamentos que podem estar correlacionadas com o processo de fabrico dos aderentes ou das juntas.

A Figura 67 a) e b) mostra as curvas $P-\delta$ para as SLJ, com aderente ABS e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Verifica-se que as juntas com $L_0=5$ mm apresentam um comportamento predominantemente elástico até $P_{m\acute{a}x}$. Para os restantes L_0 após ser atingido $P_{m\acute{a}x}$, a rotura apenas acontece após alguma deformação dos aderentes. Este acontecimento surge devido à rotura prematura das camadas internas com densidade de 50% e só depois das camadas exteriores a 100% que suportam as cargas residuais, como visto anteriormente na Figura 65.

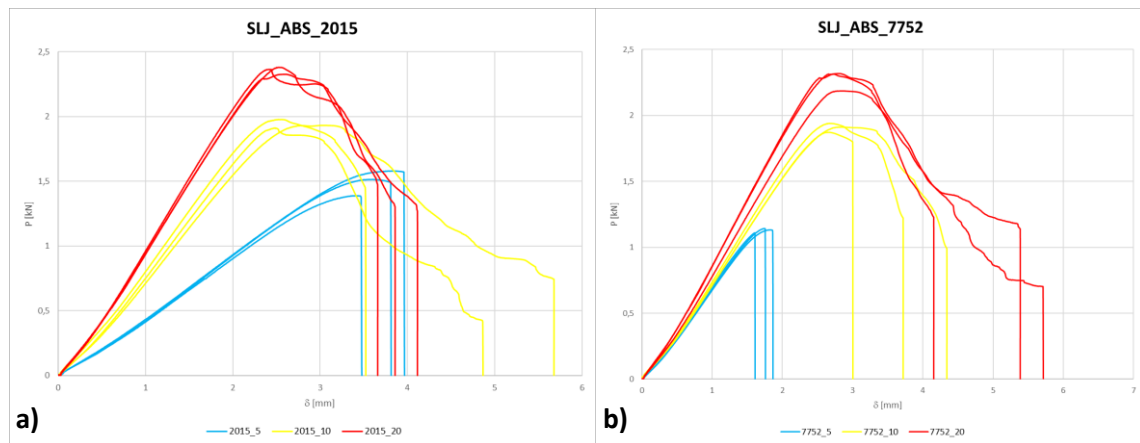


Figura 67 - Curvas P - δ para as SLJ com ABS: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752

Em cada condição de adesivo e L_0 surgem algumas variações de deslocamentos na rotura. Esta variação pode estar relacionada com possíveis falhas na fusão entre as camadas visto que o ABS é um material sensível à temperatura e relativamente difícil de trabalhar em ambientes não controlados. Associado a estes problemas de fusão também é possível que tenham existido alguns defeitos na aplicação dos adesivos e escorregamento das amarras durante os ensaios de tração.

A Figura 68 a) e b) mostra as curvas P - δ para as SLJ, com aderente PETG e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Verifica-se que as juntas apresentam um comportamento essencialmente elástico até $P_{máx}$ e com o aumento do L_0 observa-se o aumento do declive das curvas. Em algumas condições de L_0 com os diferentes adesivos verificam-se variações nos deslocamentos na rotura, resultantes de defeitos de fabrico dos aderentes e das juntas adesivas. Para o PETG com adesivo 2015 para $L_0=20$ mm verificam-se algumas variações na resistência da junta, o que está correlacionado com a rotura de algumas camadas interiores.

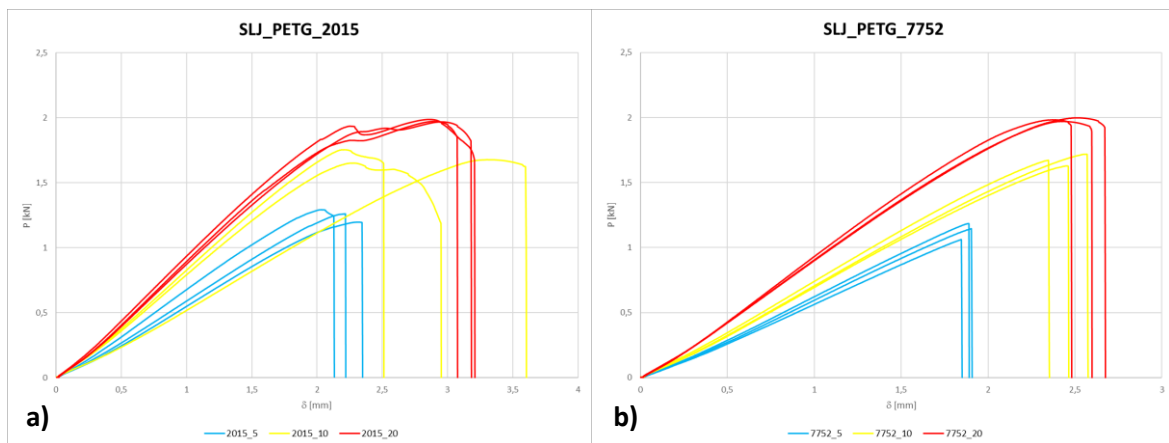


Figura 68 - Curvas P - δ para as SLJ com PETG: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752

A Figura 69 e Tabela 28 apresentam os valores médios de $P_{máx}$, desvio padrão e os coeficientes de variação. Na Figura 69 verifica-se um aumento de $P_{máx}$ com o aumento de L_0 . Analisando com mais detalhe, verifica-se que a evolução de $P_{máx}$ também ocorre entre aderentes e adesivos: os valores máximos de $P_{máx}$ ocorreram com PLA, seguidos de ABS e PETG. Por outro lado, o adesivo 2015 apresenta maior resistência do que o 7752, exceto no caso de PLA com $L_0=20$ mm, justificável com o comportamento destes adesivos. De facto, com aumentos de L_0 o adesivo 2015 apresenta um $P_{máx}$ superior para L_0 inferiores. Com o aumento de L_0 , o adesivo 2015 apresenta mais picos de

tensão e a sua resistência não aumenta proporcionalmente. O adesivo 7752 com o aumento de L_0 aumenta a sua resistência devido à sua flexibilidade e capacidade de melhor distribuir as tensões sobre a camada adesiva.

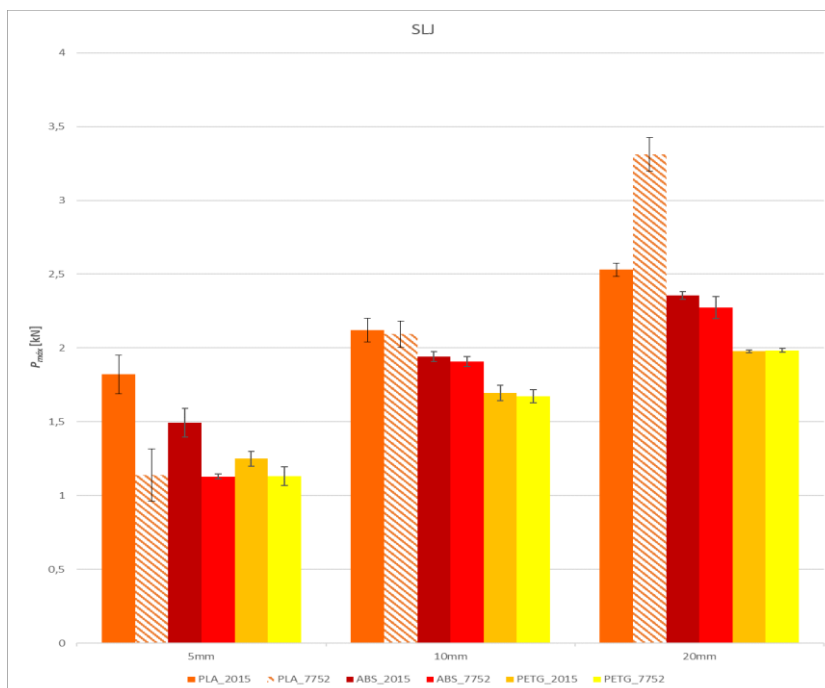


Figura 69 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_0 por adesivo e aderente para as SLJ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo

Com a análise da Figura 69 e Tabela 28 verifica-se que as SLJ aumentam a sua resistência com o aumento de L_0 para ambos os adesivos. As juntas PLA apresentam a maior resistência e as juntas de PETG a menor resistência devido às propriedades do aderente serem as mais baixas. Em termos de evolução da resistência, as juntas com PLA e adesivo 7752 foram as que apresentaram melhorias relativas superiores entre os diferentes L_0 .

- Nas juntas com PLA e adesivo 2015, entre L_0 de 5 e 10 mm verifica-se um aumento de $P_{máx}$ em 16,5% e entre $L_0=10-20$ mm um aumento de 19,3%. Com o adesivo 7752 o aumento de $P_{máx}$ ocorre de forma mais intensa, 83,7% entre $L_0=5-10$ mm e de 58,2% entre $L_0=10-20$ mm. Através da Figura 69, observa-se que o aumento de L_0 provoca um aumento de $P_{máx}$ nas juntas com adesivo 7752 de tal forma que com $L_0=20$ mm, o adesivo 7752 supera a resistência do adesivo 2015. Para $L_0=5$ e 10 mm, o adesivo 2015 é superior ao 7752 em 59,8 e 1,3%, mas com $L_0=20$ mm o $P_{máx}$ do adesivo 7752 é 30,9% superior ao obtido com 2015;
- Nas SLJ com ABS com adesivo 2015 verifica-se um aumento em termos percentuais de 29,9 e 21,4% entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm, respetivamente. Relativamente ao adesivo 7752, o aumento da resistência foi de 69% entre $L_0=5-10$ mm e de 19% entre $L_0=10-20$ mm. No caso do ABS para $L_0=5$ mm a resistência da junta com adesivo 2015 é 32,4% superior à junta com 7752. O aumento de L_0 reduz essa percentagem para 1,72 e 3,7% para $L_0=10$ e 20 mm, respetivamente;
- Nas SLJ com PETG e adesivo 2015 o aumento de $L_0=5$ para 10 mm resultou num aumento de resistência de 35,6% e 16,6% entre $L_0=10-20$ mm. Com o adesivo 7752, o aumento de $P_{máx}$ foi de 48 e 18,65% entre os $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm. Nas juntas com PETG a

superioridade do adesivo 2015 reflete-se em 10,6% para $L_0=5\text{mm}$, mas com $L_0=20\text{ mm}$ a resistência é semelhante, sendo a resistência da junta com adesivo 7752, 0,35% superior à da junta com 2015.

Como verificado, o adesivo 7752 apresenta aumentos relativos bastante superiores ao adesivo 2015 e nas juntas com PLA a sua superioridade revela-se bastante superior ao adesivo 2015 devido às roturas coesivas no adesivo. Estas roturas permitiram levar o adesivo até ao seu limite fazendo com que a junta atingisse valores de resistência superiores. Nas juntas ABS e PETG a superioridade não se revelou devido às roturas nos aderentes, contudo verifica-se uma aproximação de $P_{m\acute{a}x}$ entre os dois adesivos com o aumento de L_0 .

Tabela 28 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] em função de L_0 para as SLJ

Aderente		PLA			ABS			PETG		
Adesivo	L_0 [mm]	5	10	20	5	10	20	5	10	20
2015	Média	1,820	2,120	2,530	1,494	1,941	2,357	1,249	1,695	1,978
	Desvio Padrão	0,130	0,080	0,046	0,098	0,034	0,026	0,049	0,054	0,009
	CoV [%]	7,15	3,79	1,81	6,56	1,75	1,11	3,96	3,16	0,46
7752	Média	1,139	2,094	3,312	1,128	1,908	2,273	1,130	1,672	1,984
	Desvio Padrão	0,177	0,090	0,115	0,017	0,035	0,007	0,064	0,046	0,012
	CoV [%]	15,51	4,28	3,48	1,51	1,82	3,26	5,64	2,75	0,62

No que diz respeito às juntas *step*, a Figura 70 a) e b) representa as curvas $P-\delta$ para estas juntas, com aderente PLA e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Verifica-se que as juntas apresentam um comportamento praticamente elástico até à sua rotura. As $P_{m\acute{a}x}$ obtidas para as juntas com o adesivo 2015 são semelhantes para os diferentes L_0 , visto que o modo de rotura ocorreu sempre no aderente, pelo que seria de esperar os valores serem bastante próximos. Nas juntas com o adesivo 7752, como as roturas ocorreram pelo adesivo existe um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 . Nas juntas com os diferentes adesivos, verifica-se que os deslocamentos na rotura apresentam algumas divergências. Estas podem ter resultado devido a defeitos de fabrico dos aderentes, aplicação de adesivo ou escorregamento de amarras durante os ensaios. Nas juntas com adesivo 2015 com $L_0=5\text{ mm}$ e nas juntas 7752 para os diferentes L_0 , durante o carregamento observa-se uma ligeira queda na força sustentada pelas juntas que corresponde à rotura prematura das faces de adesivo perpendiculares ao carregamento.

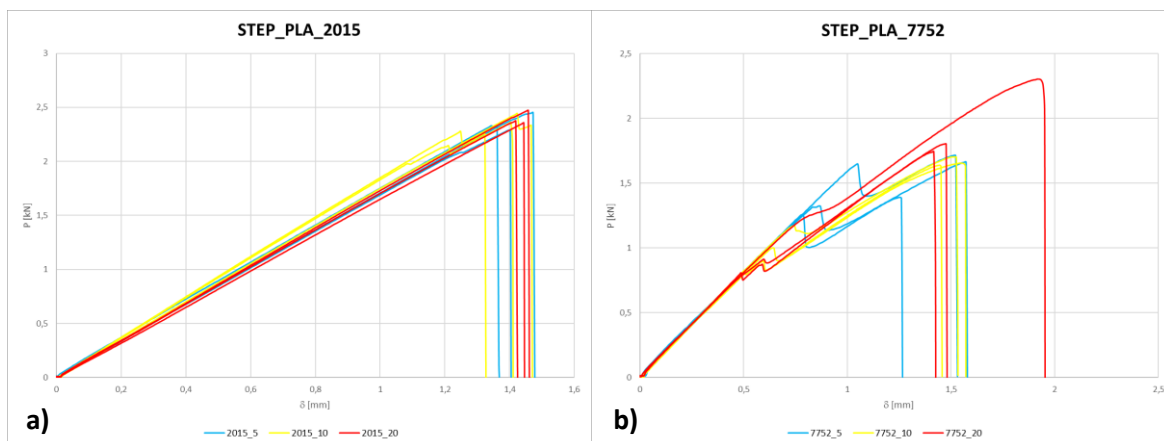


Figura 70 - Curvas P - δ para as juntas *step* com PLA: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752

A Figura 71 a) e b) apresenta as curvas P - δ para as juntas *step*, com aderente ABS e adesivo 2015 e 7752, respetivamente. Em ambos os casos, verifica-se um comportamento praticamente elástico até à rotura da junta. As $P_{máx}$ e os deslocamentos na rotura são bastantes semelhantes, devido à rotura ocorrer sempre pelo aderente. Em cada condição, de adesivo e L_0 , existem algumas divergências de deslocamento na rotura justificáveis com defeitos no fabrico das juntas ou durante a realização dos ensaios.

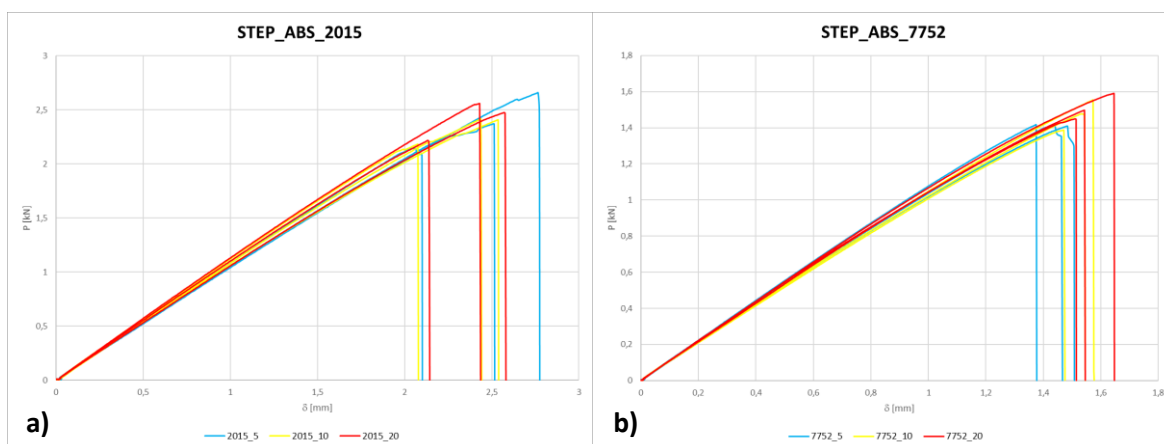


Figura 71 - Curvas P - δ para as juntas *step* com ABS: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752

A Figura 72 a) e b) apresenta as curvas P - δ para as juntas *step*, com o aderente PETG e adesivo 2015 e 7752, respetivamente. As juntas com adesivo 2015 apresentam um comportamento elástico até à rotura, sendo que as $P_{máx}$ e os deslocamentos apresentam pequenas diferenças. No caso das juntas com adesivo 7752, verifica-se o pequeno degrau resultado da rotura prematura das faces perpendiculares ao carregamento para os $L_0=10$ e 20 mm. Este degrau não se verificou com o adesivo 2015 devido à rotura do aderente surgir no mesmo instante em que ocorre a roturas das faces verticais de adesivo. Verifica-se que em cada condição, por adesivo e L_0 existe uma variação dos deslocamentos de rotura. Esta variação pode ser resultado de defeitos de fabrico dos aderentes que levaram a fusões de camadas disformes, que permitem resistir a diferentes carregamentos e a plastificações também diferentes.

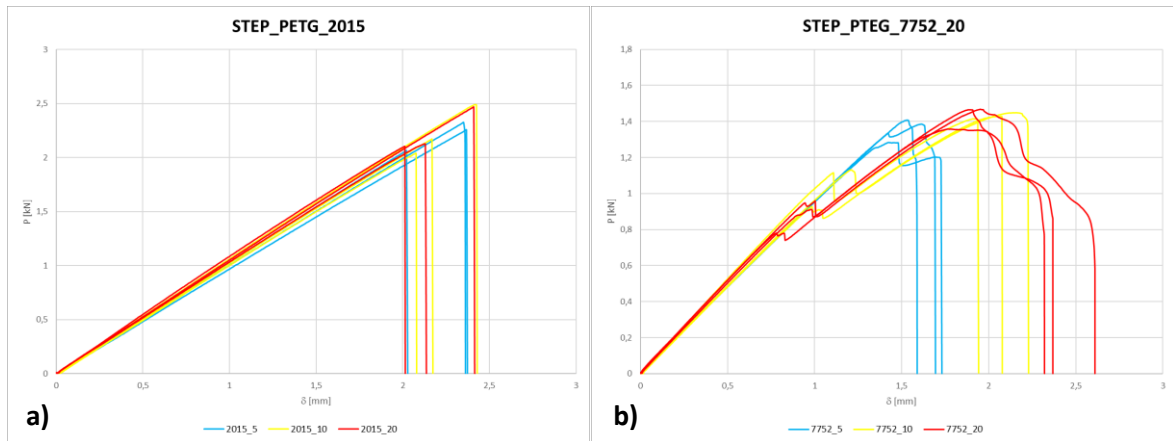


Figura 72 - Curvas P - δ para as juntas *step* com PETG: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752

A Figura 73 e Tabela 29 apresentam os valores médios das $P_{máx}$ e os respectivos desvios padrões. Verifica-se que, para as condições com o adesivo 2015, as $P_{máx}$ mantêm-se constantes para os diferentes aderentes, visto que as roturas ocorreram sempre no aderente. Com o adesivo 2015 esperava-se que as cargas máximas ocorressem no aderente PLA e que surgissem diferenças entre os valores de $P_{máx}$ entre os diferentes aderentes. Com adesivo 7752, os aderentes ABS e PETG, têm um comportamento similar com o adesivo 2015, cargas máximas constantes para os diferentes L_o e valores de carregamento similares. Estes acontecimentos permitem afirmar que nas juntas *step* o elemento que mais influência a resistência da junta é o adesivo. A presença das faces verticais de adesivo, sujeitas ao esforço de arrancamento, criam uma zona de elevada concentração de tensões que faz com na rotura destas faces verticais ocorra também a rotura no aderente. As roturas observadas com o adesivo 2015 ocorreram sempre na zona de transição do degrau com espessura de 2,4 mm para a espessura total do aderente, 5 mm. No caso de 7752 com PLA, devido às roturas ocorrerem pelo adesivo, verifica-se uma evolução das cargas com o aumento de L_o .

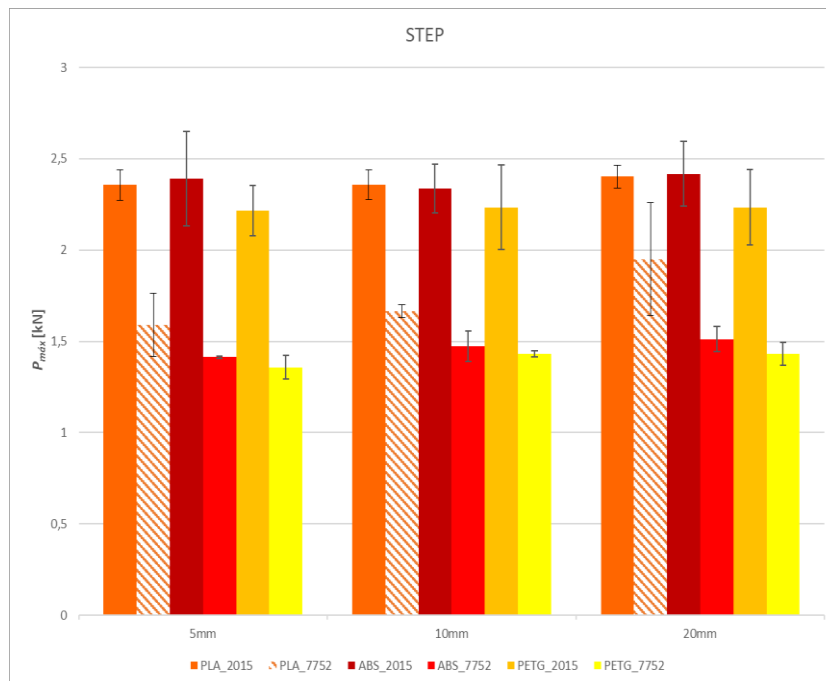


Figura 73 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_o por adesivo e aderente para a geometria *step*; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo

Com a Tabela 29 é possível fazer uma análise mais detalhada da forma como se comporta a resistência das juntas *step* para os diferentes aderentes e adesivos. Como mencionado, as juntas em que a rotura ocorre no aderente, o $P_{máx}$ é bastante semelhante.

- Nas juntas *step* com aderente PLA e o adesivo 2015, o aumento de $P_{máx}$ de 0,12 e 1,86% entre os intervalos de $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm respetivamente. As juntas de PLA com 7752, devido à sua rotura coesiva no adesivo, verifica-se um aumento mais elevado de $P_{máx}$ em função de L_0 , 4,7 e 17,1% entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm, respetivamente. Nestas juntas de PLA verificou-se que as juntas com 2015 apresentam uma resistência superior ao 7752 em 48,2, 41,6 e 23,2% para os $L_0=5$, 10 e 20 mm. Com estas percentagens verifica-se que o aumento de L_0 aproxima as resistências das juntas com o adesivo 7752 às juntas com o adesivo 2015;
- Nas juntas com aderentes de ABS e o adesivo 2015, as juntas com $L_0=5$ mm apresentam um $P_{máx}$ superior em 2,4% do que as juntas com $L_0=10$ mm, enquanto que entre $L_0=10-20$ mm, a junta com $L_0=20$ mm apresenta uma resistência 3,5% superior. O $P_{máx}$ mais elevado na junta com $L_0=5$ mm do que com $L_0=10$ mm pode estar correlacionado com uma melhor fusão nas camadas. Com o aderente de ABS e adesivo 7752, entre de $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm verificaram-se aumentos de 4,1 e 2,7%. As percentagens relativas entre os adesivos 2015 e 7752 para $L_0=5$, 10 e 20 mm, são cerca de 69,2, 58,6 e 59,8% superiores no adesivo 2015;
- As juntas com PETG e adesivo 2015 apresentam um ligeiro aumento de $P_{máx}$ entre $L_0=5$ mm para $L_0=10$ e 20 mm cerca de 0,81%. Acerca das juntas com adesivo 7752, verificam-se ligeiros aumentos de $P_{máx}$ com o aumento de L_0 devido à maior flexibilidade do adesivo, mas como as roturas também ocorrem nos aderentes, as percentagens relativas são bastantes baixas. Nas juntas com PETG verificou-se um aumento $P_{máx}$ de 5,3% entre $L_0=5-10$ mm e entre $L_0=10-20$ mm, o $P_{máx}$ registado foi o mesmo. Entre os adesivos, as juntas com 2015 para $L_0=5$, 10 e 20 mm, apresentam resistência de 63,2, 56,2 e 56,3% superiores às obtidas com o adesivo 7752;

Comparando os dois adesivos, as juntas com adesivo 2015 mostraram suportar mais carregamento que as juntas com 7752, e entre aderentes o $P_{máx}$ obtido foi praticamente o mesmo.

Tabela 29 - Valores médios de $P_{máx}$ [kN] em função de L_0 para as juntas *step*

Adesivo	Aderente L_0 [mm]	PLA			ABS			PETG		
		5	10	20	5	10	20	5	10	20
2015	Média	2,356	2,359	2,403	2,391	2,336	2,417	2,216	2,234	2,234
	Desvio Padrão	0,084	0,082	0,062	0,257	0,134	0,178	0,136	0,231	0,205
	CoV [%]	3,56	3,47	2,57	10,76	5,72	7,37	6,15	10,32	9,19
7752	Média	1,590	1,665	1,951	1,413	1,472	1,513	1,358	1,431	1,431
	Desvio Padrão	0,174	0,034	0,308	0,005	0,083	0,071	0,065	0,017	0,062
	CoV [%]	10,91	2,03	15,76	0,36	5,67	4,66	4,79	1,22	4,36

Relativamente às juntas *scarf*, a Figura 74 a) e b) apresenta as curvas $P-\delta$ para as juntas *scarf*, com aderente PLA e adesivo 2015 e 7752, respetivamente. A maioria das juntas com o aderente de PLA apresentou um comportamento praticamente elástico, com a exceção da junta com o adesivo 2015 e $L_0=20$ mm, que apresenta um alisamento da curva antes da rotura devido à plastificação dos aderentes, que resultam na sua rotura. Em ambos os casos, para adesivo 2015 e 7752, verifica-se uma evolução nas $P_{máx}$. No caso de adesivo 2015, com $L_0=10$ e 20mm a carga máxima é semelhante, devido ao modo de rotura ocorrer em ambos no aderente. Verifica-se que na condição de $L_0=20$ mm existe a plastificação do aderente e que provoca um maior deslocamento até à rotura. Nas juntas com o adesivo 7752, verifica-se que o aumento de $P_{máx}$ é constante com o aumento de L_0 devido às roturas coesivas nos adesivos. As variações de deslocamentos de rotura podem estar correlacionadas com pequenos defeitos de fabrico ou realização de ensaios.

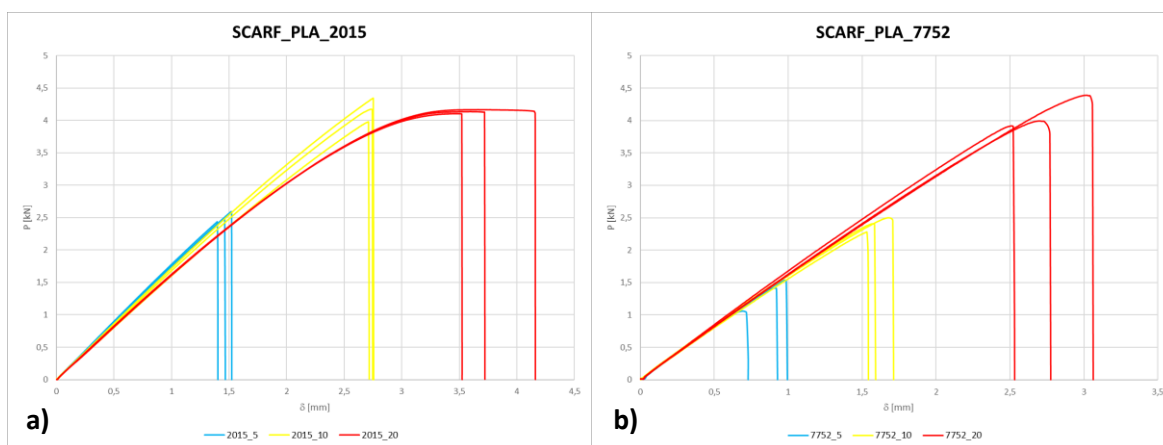


Figura 74 - Curvas $P-\delta$ para as juntas *scarf* com PLA: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752

A Figura 75 a) e b) apresenta as curvas $P-\delta$ para as juntas *scarf*, com aderente de ABS e adesivo 2015 e 7752, respetivamente. As $P_{máx}$, para as diferentes condições, apresentam um valor semelhante devido ao modo de rotura ocorrer sempre pelo aderente, exceto o caso de adesivo 7752 com $L_0=5$ mm, caso em que a rotura ocorre de forma coesiva no adesivo devido à face de união ser perpendicular ao carregamento. Nas juntas com o adesivo 2015 e 7752 para $L_0=20$ mm verifica-se que as curvas $P-\delta$ apresentam uma redução do declive antes da rotura. Estas reduções de declive devem-se às plastificações dos aderentes ABS, mais concretamente a rotura das camadas internas fazem com que sejam as camadas externas a suportar o carregamento e estas por serem impressas com *infill* de 100% prolongam a sua deformação e por consequência a sua rotura, como mostrado na Figura 65. Ligeiras diferenças nos deslocamentos na rotura podem estar ligadas a pequenos defeitos de fabrico dos componentes ou na realização de ensaios.

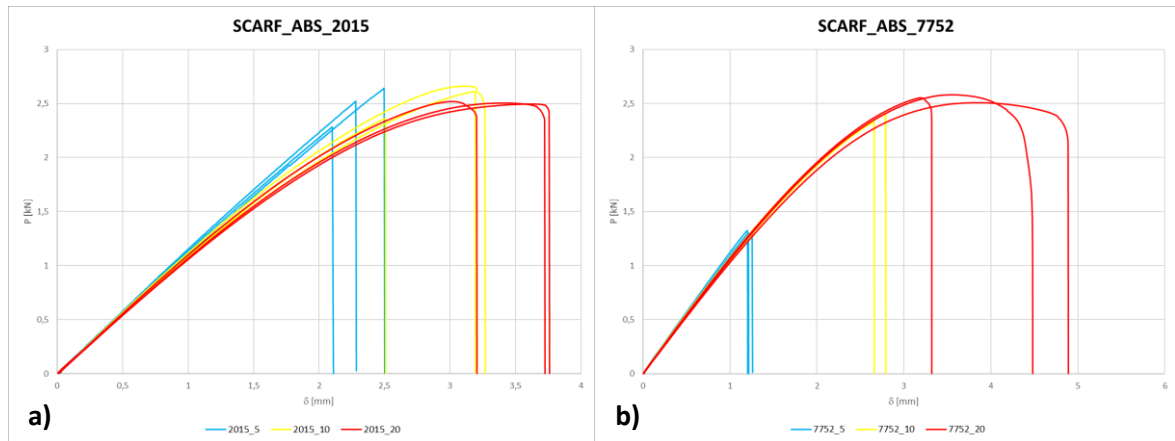


Figura 75 - Curvas P - δ para as juntas *scarf* com ABS: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752

A Figura 76 a) e b) apresenta as curvas P - δ para as juntas *scarf*, com aderente de PETG e adesivo 2015 e 7752, respetivamente. As juntas têm um comportamento predominantemente elástico até à rotura, fora o caso de adesivo 2015 com $L_0=20$ mm, caso em que as juntas apresentam um comportamento mais dúctil, devido à plastificação dos aderentes. Esta plastificação deve-se à rotura das camadas interiores do aderente, deixando as camadas exterior a suportar todo o carregamento, como mostrado na Figura 65 b). Contudo e devido ao modo de rotura ocorrer repetidamente no aderente, as forças máximas rondam o mesmo valor. O caso de PETG com adesivo 7752 e $L_0=5$ mm é exceção porque a face de adesivo é perpendicular ao carregamento, pelo que seria de esperar uma rotura prematura, resultando em roturas pelo adesivo.

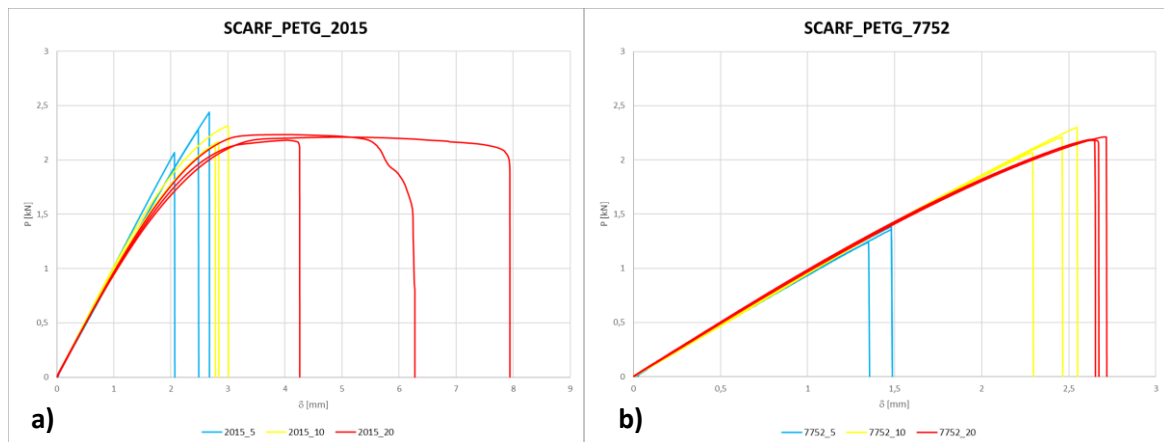


Figura 76 - Curvas P - δ para as juntas *scarf* com PETG: a) Araldite®2015; b) Sikaforce®7752

A Figura 77 e a Tabela 30 apresentam os valores médios das $P_{máx}$ e os respetivos desvios padrão. Nas condições com PLA, verifica-se um aumento das $P_{máx}$ com o aumento de L_0 para as condições com adesivo 7752. Com o adesivo 2015, devido aos diferentes modos de rotura verificados entre $L_0=5$ mm, rotura coesiva no adesivo, e $L_0=10$ e 20mm, rotura aderente, a evolução ocorre apenas entre os dois primeiros L_0 . A rotura coesiva adesiva ocorre com $L_0= 5$ mm devido à face estar posicionada perpendicularmente ao carregamento, o que faz que com $L_0= 5$ mm apenas exista esforço de arrancamento. Com o aumento de L_0 , parte do esforço de arrancamento transforma-se em esforço de corte devido à inclinação da face adesiva face ao carregamento. Esta diferença de

$P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5$ mm e $L_0=10$ e 20 mm também ocorre nas condições com os aderentes de ABS e PETG com o adesivo 7752, onde se verificaram roturas coesivas no adesivo e aderente.

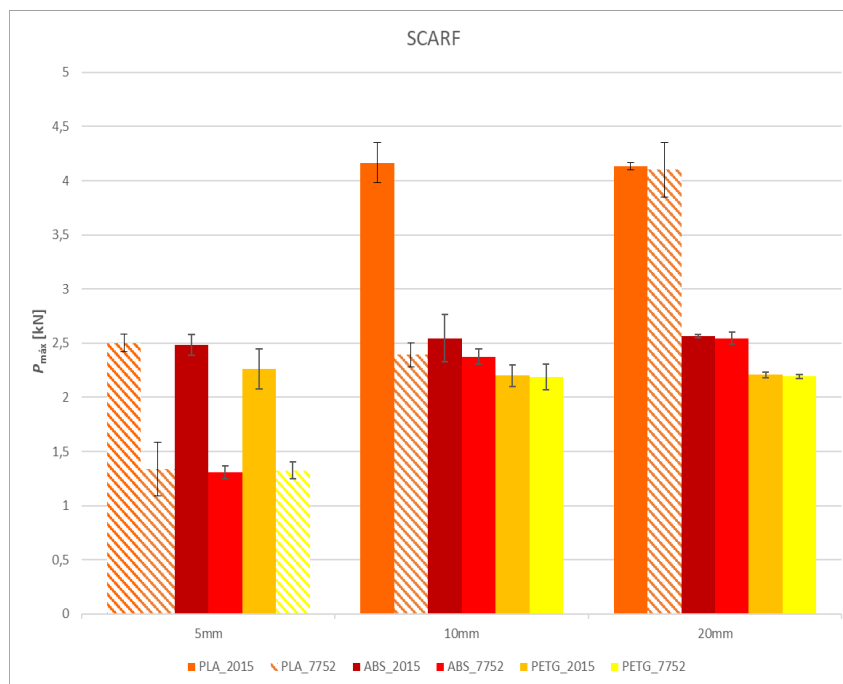


Figura 77 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria scarf; cor sólida = rotura no aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo

Com a Tabela 30 é possível fazer uma análise mais detalhada e relativa entre os L_0 da forma como se comporta a resistência das juntas scarf.

- Nas juntas com PLA e adesivo 2015 verifica-se que existe um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5$ -10 mm e $L_0=10$ -20 mm. O aumento surge apenas entre os primeiros L_0 devido às diferentes roturas obtidas, rotura coesiva adesiva e aderente, respetivamente. A evolução de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5$ -10 mm é de 66,5%. Com adesivo 7752, o aumento de L_0 promove o constante aumento de $P_{m\acute{a}x}$ devido à ocorrência de roturas coesivas em todas as condições. A evolução relativa entre $L_0=5$ -10 mm é de 79,0% e 71,4% entre $L_0=10$ -20 mm. Pela visualização da Tabela 30 verifica-se que com o adesivo 2015 e $L_0=10$ mm apresenta um $P_{m\acute{a}x}$ ligeiramente superior a $L_0=20$ mm. Esta superioridade pode estar correlacionada com a melhor fusão das camadas de aderente na face adesiva para $L_0=10$ mm, o que permite resistir a um maior carregamento. Entre adesivos, o adesivo 2015 apresenta uma superioridade de 87,0% com $L_0=5$ mm, 74,0% com $L_0=10$ mm e 0,8% com $L_0=20$ mm sobre o adesivo 7752. Porém, o aumento de L_0 promove uma aproximação da resistência do adesivo 7752 ao 2015.
- Acerca das juntas com aderentes de ABS e PETG com o adesivo 2015 praticamente não existe aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 devido às roturas ocorrerem sempre nos aderentes. Com o aderente de ABS e o adesivo 7752 existe um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5$ -10 mm. Apesar do modo de rotura verificado com $L_0=5$ mm ser maioritariamente no aderente, seria de esperar que ocorressem no adesivo. As roturas nos aderentes com $L_0=5$ mm devem-se à fusão incompleta de camadas dos aderentes de ABS. Contudo, entre $L_0=5$ -10 mm verificou-se um aumento de 81,6% e entre $L_0=10$ -20 mm aumento de 7,2%. O aumento de 7,2% está relacionado com a capacidade do ABS resistir a esforço de corte, verificado também nas SLJ. Para os diferentes L_0 , a superioridade do adesivo 2015 mantém-

se superior ao adesivo 7752, sendo 89,8% superior com $L_0=5$ mm, 7,1% com $L_0=10$ mm e 0,6% com $L_0=20$ mm.

- As juntas com aderentes de PETG com o adesivo 7752 revelam um aumento percentual de resistência entre $L_0=5-10$ mm de 65% e entre $L_0=10-20$ mm o $P_{m\acute{a}x}$ obtido foi praticamente o mesmo. O aumento de 65% deve-se ao esforço a que a junta está sujeita e aos modos de rotura verificados, rotura coesivas no adesivo com $L_0=5$ mm e rotura no aderente com $L_0=10$ e 20 mm. Relativamente à resistência entre os dois adesivos, o 2015 mostrou ser capaz de resistir a mais carregamento. O 2015 apresenta valores de $P_{m\acute{a}x}$ 70,5% superior ao adesivo 7752 para $L_0=5$ mm e com $L_0=10$ e 20 mm valores 0,5% superiores.

Para os três aderentes verificou-se que o aumento de L_0 promove o aumento da resistência do adesivo 7752 com a aproximação ao adesivo 2015. Entre aderentes, o PLA mostrou ser o aderente mais resistente, seguido do ABS e PETG.

Tabela 30 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] em função de L_0 para as geometrias *scarf*

Adesivo	Aderente	PLA			ABS			PETG		
		L_0 [mm]	5	10	20	5	10	20	5	10
2015	Média	2,501	4,165	4,133	2,481	2,544	2,562	2,262	2,201	2,208
	Desvio Padrão	0,080	0,185	0,031	0,096	0,217	0,015	0,186	0,098	0,026
	CoV [%]	3,18	4,45	0,74	3,89	8,55	0,58	8,23	4,45	1,17
7752	Média	1,337	2,393	4,101	1,308	2,375	2,546	1,326	2,190	2,194
	Desvio Padrão	0,245	0,111	0,253	0,059	0,072	0,056	0,078	0,119	0,017
	CoV [%]	18,70	4,64	6,17	4,49	3,04	2,18	5,89	5,42	0,79

Após a obtenção de propriedades dos aderentes no capítulo 3.1.1 seria de esperar que, entre os diferentes materiais, os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$ ocorressem nas juntas com aderentes de PLA, seguidos de ABS e PETG, com alguma diferença entre $P_{m\acute{a}x}$ de cada aderente. Contudo, para as geometrias SLJ verificou-se uma proximidade de $P_{m\acute{a}x}$ entre o PLA e ABS, e nas juntas *step* uma proximidade de $P_{m\acute{a}x}$ entre os três materiais de aderente para a geometria *step*. Esta proximidade entre os três materiais para a geometria mencionada, pode estar correlacionada com o facto de existir da existência da face vertical de adesivo. Esta face antes de romper, cria uma zona de concentração de tensões na zona mais frágil dos aderentes. A zona frágil surge na transição de degrau, da espessura de 2,4 mm para a espessura total de 5 mm. Devido à concentração de tensões nessa zona, quando ocorre a rotura das faces de adesivo verticais, ocorre também a rotura do aderente, o que promove valores de $P_{m\acute{a}x}$ muito semelhantes na geometria *step* para os diferentes materiais aderentes. Contudo, o PLA foi superior em todas as condições de geometria e adesivo utilizado. O adesivo 2015 aguentou mais esforços que o 7752, com exceção nas condições de $L_0=20$ mm para a geometria SLJ. É também de realçar a proximidade de $P_{m\acute{a}x}$ entre os dois adesivos na geometria *scarf* para $L_0=20$ mm. As condições com os aderentes de ABS e PETG obtiveram resultados semelhantes, com superioridade de ABS para os diferentes adesivos. Com estes dois aderentes, $P_{m\acute{a}x}$ obtido com o adesivo 2015 foi sempre superior ao 7752, com boas aproximações conforme o aumento de L_0 nas diversas geometrias de junta. A proximidade de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos deve-se à tensão de cedência e módulo de Young destes materiais aderentes serem relativamente próximos.

De todas as condições, a junta *scarf* com aderentes de PLA com o adesivo 2015 e $L_0 = 10\text{mm}$ foi a que resistiu a maior $P_{m\acute{a}x}$. Contudo, para $L_0 = 20\text{mm}$ o resultado foi bastante próximo com $L_0 = 10\text{mm}$ com uma diferença de apenas 0,03kN de diferença. Esta diferença está correlacionada com a fusão disformes das camadas do aderente. Das juntas com aderentes de ABS, a condição que apresentou maior resistência foi a geometria *scarf* com $L_0 = 20\text{mm}$ com adesivo 2015. Para o aderente de PETG, a junta com maior $P_{m\acute{a}x}$ ocorreu na condição de geometria *scarf* com $L_0 = 5\text{mm}$ e adesivo 2015. Com L_0 superiores seria de esperar valores mais elevados para comprimentos de sobreposição superiores, mas como a diferença é bastante pequena, é possível de se justificar com melhor adesão das camadas durante o processo de fabrico. Visto que as roturas ocorreram sempre no aderente com o adesivo 2015, a diferença entre os $P_{m\acute{a}x}$ é muito subtil. Comparando as juntas em que cada material aderente apresentou $P_{m\acute{a}x}$ mais elevado, pode-se comparar percentualmente a diferença entre as juntas. A junta PLA que apresentou maior $P_{m\acute{a}x}$ é 62,6% superior à junta ABS e 84,1% superior à junta PETG. Entre as juntas ABS e PETG, a junta de ABS é 13,3% superior à junta de PETG.

De forma geral, quer para diferentes adesivos e aderentes, os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$ surgem na geometria de junta *scarf*. A razão pela qual as maiores resistências surgirem nesta geometria deve-se ao facto de que o adesivo não está orientado numa só direção. Com $L_0 = 5\text{mm}$, a face adesiva está posicionada perpendicularmente face ao carregamento, o que coloca a junta unicamente sujeita ao esforço de arrancamento. Com o aumento de L_0 nas juntas *scarf*, a inclinação da face adesiva aumenta fazendo com que o esforço, que inicialmente era apenas de arrancamento, se divida entre esforço de arrancamento e de corte. Com o continuo aumento de L_0 , o esforço de corte sobressai sobre o esforço de arrancamento. A repartição do esforço em duas direções permite as juntas adesiva suportarem mais esforço e também anular possíveis desvios na posição da junta nas amarras.

3.1.4.3. Rigidez máxima das juntas

A rigidez, matematicamente, é o cálculo do declive das curvas $P-\delta$ no regime elástico expresso pela seguinte equação:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} = \frac{F_2 - F_1}{\delta_2 - \delta_1} \quad (5)$$

Em que ΔF é um intervalo de forças no regime elástico e $\Delta \delta$ o intervalo de deformações para as forças aplicadas. Para a obtenção da rigidez máxima, o cálculo de k pode ser feito nos primeiros valores obtidos experimentalmente, em que a diferença entre as forças é elevada para as deformações são mais pequenas.

Pela observação da Figura 78 e Tabela 31, verifica-se que com o aumento de L_0 há um aumento da rigidez nas SLJ. Este fato deve-se que a área de sobreposição aumenta, permitindo que o adesivo resista aos carregamentos enquanto os aderentes permanecem intactos antes de se deformarem plasticamente. As juntas mais rígidas são com os aderentes em PLA, seguidas de ABS e PETG. Verifica-se que a rigidez das juntas com adesivo 2015 é ligeiramente superior às com adesivo 7752, exceto o caso de ABS para $L_0 = 5\text{mm}$, porque, observando a Figura 67 a) e b) as juntas para um intervalo de forças semelhante apresentam mais deslocamento, um declive inferior na zona elástica.

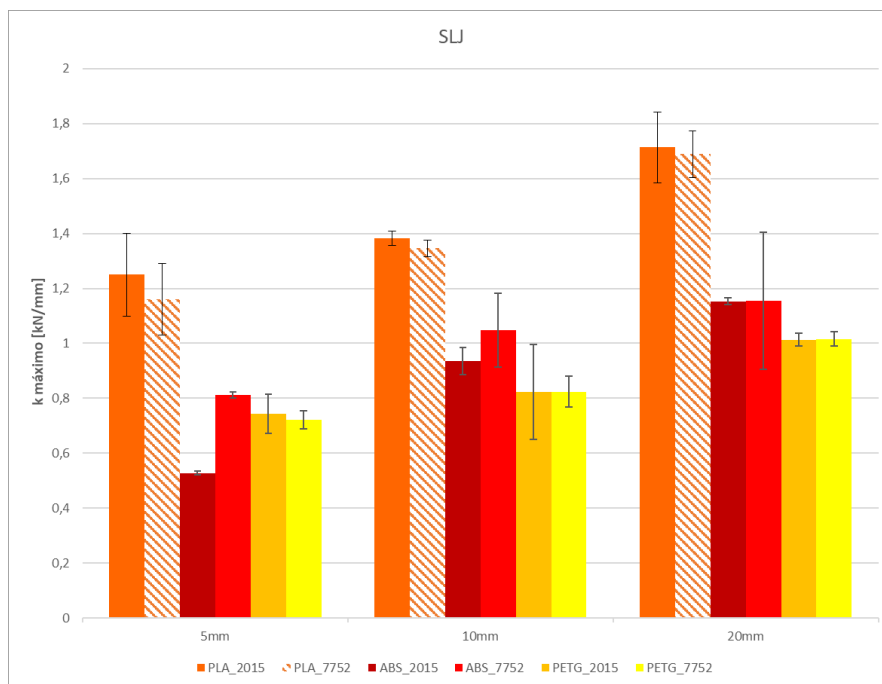


Figura 78 - Valores médios de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria SLJ; cor sólida = rotura no aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo

Com a Tabela 31 é possível fazer uma análise mais detalhada das rigidezes obtidas.

- As SLJ com aderentes de PLA aumentam a sua rigidez com o aumento de L_0 . Com o adesivo 2015 verifica-se que a rigidez aumenta 10,65% entre $L_0=5-10$ mm e 23,9% entre $L_0=10-20$ mm. Com o adesivo 7752 o aumento percentual verificado é de 16,1% e 25,4% entre os intervalos de $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm, respetivamente. Em relação à rigidez da junta entre adesivos, o adesivo 2015 apresenta uma rigidez 7,8, 2,7 e 1,5% superior às juntas com adesivo 7752, para $L_0=5$, 10 e 20 mm, respetivamente;
- Nas juntas com ABS verifica-se um aumento acentuado da rigidez das juntas com o adesivo entre $L_0=5-10$ mm. O aumento percentual é de 77,3% para esse intervalo e para L_0 entre 10 e 20 mm regista-se um aumento de 23,2%. A razão pela qual se verifica um grande aumento no primeiro intervalo de L_0 é a elevada deformação registada no início do carregamento. Com o adesivo 7752, as juntas de aderentes ABS registaram aumentos de rigidez de 29% e 10,3% entre os intervalos de $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm, respetivamente. Entre adesivos, nas juntas com aderentes de ABS, as juntas com adesivo 7752 apresentam uma maior rigidez do que as juntas com adesivo 2015. Em termos de percentagem, as juntas com o adesivo 7752 foi 53,9% superior do que a junta com adesivo 2015 para $L_0=5$ mm, e para $L_0=10$ e 20 mm a rigidez com 7752 foi 11,9 e 0,2% superior que com 2015;
- Nas juntas com PETG verifica-se que a rigidez aumenta 10,8% e 23,1%, com o adesivo 2015, entre os intervalos de $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm, respetivamente. Em relação ao adesivo 7752, para os mesmos intervalos, verificam-se aumentos de 14,0% e 23,3%. Entre adesivos, o adesivo 2015 apresenta mais rigidez do que o adesivo 7752. A rigidez obtida com o adesivo 2015 e 7752 foram bastante próximas, com ligeira superioridade das juntas com adesivo 7752 para L_0 .

Tabela 31 - Valores médios de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 para as geometrias SLJ

Adesivo	Aderente	L_0 [mm]	PLA			ABS			PETG		
			5	10	20	5	10	20	5	10	20
2015	Média		1,250	1,383	1,713	0,528	0,936	1,153	0,743	0,823	1,014
	Desvio Padrão		0,151	0,026	0,128	0,007	0,049	0,013	0,071	0,172	0,022
	CoV [%]		12,07	1,88	7,49	1,38	5,21	1,10	9,54	20,92	2,18
7752	Média		1,160	1,347	1,689	0,812	1,047	1,155	0,723	0,824	1,016
	Desvio Padrão		0,129	0,030	0,086	0,012	0,135	0,250	0,033	0,057	0,026
	CoV [%]		11,15	2,24	5,07	1,47	12,85	21,65	4,56	6,91	2,55

A Figura 79 e Tabela 32 apresenta os valores de rigidez para as geometrias *step*. Verifica-se uma estagnação dos valores máximos de rigidez para as juntas com os diversos aderentes e adesivos. Este facto está correlacionado com o facto de na geometria *step* existirem as faces verticais de adesivo. Esta face, sujeita unicamente ao esforço de arrancamento, são as responsáveis pelo declive inicial das curvas $P-\delta$ pois são estas faces que se deformam inicialmente. Só após a rotura destas faces é que a camada de adesivo central assume a resistência e rigidez da junta. Com a visualização da Figura 79 é possível verificar que as juntas com PLA foram as que registaram maior rigidez, devido ao declive da sua zona elástica também mais elevado (Figura 50). Seguido às juntas com PLA, surgem as juntas com ABS e PETG.

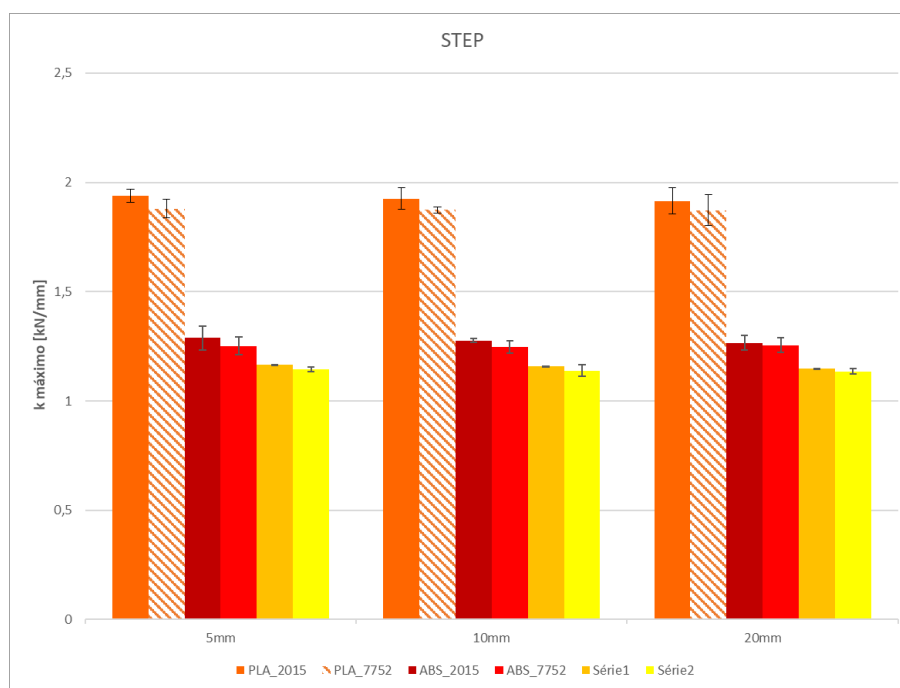


Figura 79 - Valores médios de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria *step*; cor sólida = rotura no aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo

Com a Tabela 32 é possível fazer uma comparação mais detalhada da evolução da rigidez com L_0 e os diferentes aderentes e adesivos. Verifica-se que em todas as juntas, $k_{m\acute{a}x}$ é obtido para $L_0=5$ mm. A rigidez apresenta o seu valor máximo com $L_0=5$ mm devido à proximidade das faces verticais de adesivo, a junta resiste mais facilmente ao carregamento, isto é, as deformações iniciais são

menores para o mesmo intervalo de forças com L_0 superiores. As diferenças de rigidez entre L_0 para os diferentes aderentes não varia de forma significativa. A maior diferença verificada foi 0,8% entre L_0 consecuentes. Relativamente à rigidez entre adesivos, verificou-se que a $k_{máx}$ surge nas juntas com o adesivo 2015.

- Nas juntas com aderentes de PLA, as juntas com o adesivo 2015 são 3,21% superiores às juntas com o adesivo 7752 para $L_0=5$ mm. Com o aumento de L_0 , a percentagem diminui para 2,7 e 2,2% para $L_0=10$ e 20 mm, respetivamente;
- Nas juntas com aderentes de ABS, a superioridade de rigidez das juntas com adesivo 2015 sobre juntas com 7752 é de 2,8, 2,3 e 0,8%, para $L_0=5$, 10 e 20mm, respetivamente;
- Nas juntas com aderentes de PETG, para $L_0=5$, 10 e 20mm registou-se a superioridade das juntas com adesivo 2015 em 1,9, 1,6 e 1,1%, respetivamente.

Tabela 32 - Valores médios de $k_{máx}$ [kN/mm] em função de L_0 para as geometrias *step*

Aderente		PLA			ABS			PETG		
Adesivo	L_0 [mm]	5	10	20	5	10	20	5	10	20
2015	Média	1,940	1,925	1,915	1,288	1,276	1,266	1,166	1,158	1,148
	Desvio Padrão	0,030	0,049	0,059	0,055	0,009	0,034	0,034	0,050	0,029
	CoV [%]	1,57	2,54	3,09	4,27	0,73	2,72	2,98	4,31	2,48
7752	Média	1,880	1,874	1,873	1,252	1,247	1,250	1,144	1,139	1,135
	Desvio Padrão	0,043	0,015	0,070	0,039	0,028	0,033	0,011	0,027	0,012
	CoV [%]	2,30	0,78	3,75	3,15	2,25	2,64	0,97	2,40	1,06

Relativamente à rigidez das juntas *scarf*, a Figura 80 e Tabela 33 mostram a forma como evolui a rigidez para as diferentes condições destas juntas. À primeira vista, verifica-se que o aumento de L_0 não provoca aumento significativos da rigidez. A uniformidade da rigidez resulta do facto de para os diferentes L_0 existir sempre o esforço de arrancamento, esforço predominante no início do carregamento. Como $k_{máx}$ se obtém com os valores iniciais de força e deslocamentos, a componente do esforço de arrancamento será semelhante em todos os L_0 . Ao contrário das juntas *step*, em que o esforço de carregamento está sempre presente devido às faces verticais de adesivo e com tal o $k_{máx}$ mais elevado regista-se com $L_0=5$ mm, nas juntas *scarf*, $k_{máx}$ regista-se com $L_0=20$ mm. Com o aumento de L_0 o esforço de arrancamento reduz e o esforço de corte aumenta. O aumento do esforço do corte, provoca o aumento da rigidez, tal como se sucede nas SLJ, em que a presença unicamente deste esforço permite o aumento da rigidez com o aumento de L_0 . As juntas com PLA foram as que apresentaram maior rigidez e as de PETG as que apresentaram menor $k_{máx}$, com os diferentes adesivos.

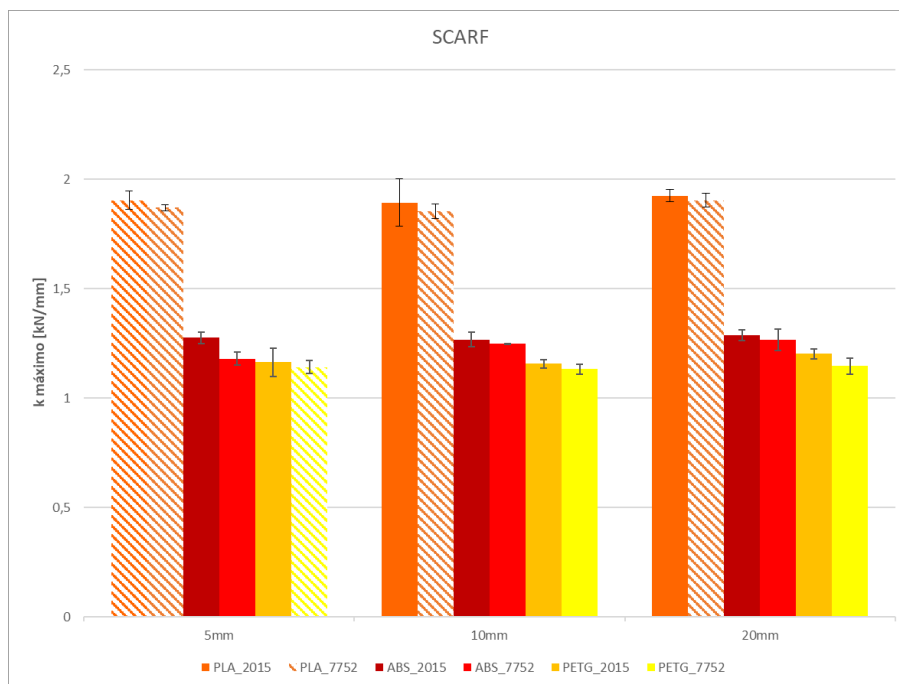


Figura 80 - Valores médios de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria *scarf*; cor sólida = rotura no aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo

Através de uma análise da Tabela 33 é possível verificar com mais detalhe a forma como varia a rigidez nas juntas *scarf*. Como mencionado anterior, $k_{m\acute{a}x}$ obteve-se sempre para $L_0=20$ mm.

- Nas juntas com PLA e adesivo 2015, verifica-se que $k_{m\acute{a}x}$ é superior com $L_0=5$ mm do que com $L_0=10$ mm, 0,5% superior. Entre $L_0=10-20$ mm a rigidez aumenta 1,6%. Com o adesivo 7752, $k_{m\acute{a}x}$ foi superior em $L_0=5$ mm do que em $L_0=10$ mm, possivelmente a melhores fusões das camadas, permitindo resistir a mais carregamento sem se deformar. A diferença entre $L_0=5-10$ mm foi de 0,9%. Entre $L_0=10-20$ mm, registou-se um aumento de rigidez em 2,8%. Nas juntas com PLA, registou $k_{m\acute{a}x}$ superior com adesivo 2015 face ao 7752 em 1,8, 2,2 e 1,1% para $L_0=5$, 10 e 20 mm, respetivamente;
- Nas juntas com aderentes de ABS e adesivo 2015, registou-se uma rigidez superior com $L_0=5$ mm do que com $L_0=10$ mm, 0,6%. Entre $L_0=10-20$ mm foi registado um aumento de 1,7%. Com o adesivo 7752, o aumento de $k_{m\acute{a}x}$ foi gradual, 5,8% entre $L_0=5-10$ mm e 1,4% entre $L_0=10-20$ mm. Com ABS, a rigidez das juntas de adesivo 2015 foram superiores em 8,0, 1,5 e 1,8% superiores face à rigidez das juntas com 7752, para $L_0=5$, 10 e 20 mm, respetivamente;
- As juntas com aderentes de PETG, registaram para ambos os adesivos uma rigidez superior com $L_0=5$ mm do que com $L_0=10$ mm. Com o adesivo 2015, a diferença foi de 0,7% e com o adesivo 7752 foi de 0,8%. Entre $L_0=10-20$ mm registou-se um aumento de rigidez, 3,9% com o adesivo 2015 e 1,3% com o adesivo 7752. Com PETG, as diferenças percentuais foram de 2,0, 2,2 e 4,9% superiores no adesivo 2015 do que com 7752 para os $L_0=5$, 10 e 20mm.

Tabela 33 - Valores médios de $k_{máx}$ [kN/mm] em função de L_o para as geometrias *scarf*

Adesivo	Aderente	L_o [mm]	PLA			ABS			PETG		
			5	10	20	5	10	20	5	10	20
2015	Média		1,903	1,894	1,924	1,275	1,267	1,288	1,164	1,156	1,202
	Desvio Padrão		0,042	0,110	0,027	0,026	0,034	0,025	0,065	0,019	0,023
	CoV [%]		2,25	5,81	1,42	2,02	2,70	1,91	5,54	1,65	1,91
7752	Média		1,869	1,853	1,904	1,180	1,248	1,266	1,141	1,132	1,146
	Desvio Padrão		0,013	0,032	0,030	0,029	0,001	0,048	0,029	0,024	0,036
	CoV [%]		0,71	1,75	1,58	2,45	0,09	3,83	2,53	2,09	3,18

Das diferentes juntas testadas, a $k_{máx}$ máxima surge na junta *step* com PLA e adesivo 2015 para $L_o=5$ mm, enquanto a $k_{máx}$ mínima foi obtida na SLJ com os aderentes ABS e adesivo 2015 para $L_o=5$ mm. De forma geral as juntas que apresentaram mais $k_{máx}$ foram as juntas *step* devido à constante presente de um esforço de arrancamento. Como mencionado anteriormente, a presença do esforço de arrancamento é o responsável pela rigidez nas juntas *step* e o aumento de L_o provoca uma diminuição da rigidez. Porém, quando se analisa as SLJ verifica-se que a rigidez aumenta com o aumento de L_o . As juntas *scarf* permitem analisar o real efeito destes esforços pois com $L_o=5$ mm, inicialmente, apenas existe o esforço de arrancamento. Com o aumento de L_o , o esforço de arrancamento diminui e o esforço de corte aumenta. Nas juntas *scarf*, na maioria das condições, verificou-se que a transição de $L_o=5$ mm para $L_o=10$ mm provoca uma redução da rigidez, mas entre $L_o=10-20$ mm, a rigidez voltou a aumentar. Na primeira transição de L_o , o esforço de corte não é suficientemente forte para compensar a redução do esforço de arrancamento, mas na segunda transição de L_o , o esforço de corte é o predominante, o que faz com que a rigidez volte a aumentar. Isto significa que com o aumento de L_o , o esforço de corte, por si só, provoca aumento da rigidez e, unicamente esforço de arrancamento diminui a rigidez.

3.1.4.4. Energias de rotura

Os valores de energia de rotura ($E_{máx}$) das juntas adesivas podem ser calculadas a partir das áreas das curvas $P-\delta$ até à rotura. Como mostra a Figura 81, o cálculo da área do triângulo azul pode ser aproximado pela soma das áreas de pequenos retângulos, a verde. A Tabela 34, Tabela 35 e Tabela 36 mostra os valores obtidos para as $E_{máx}$ das diferentes juntas testadas.

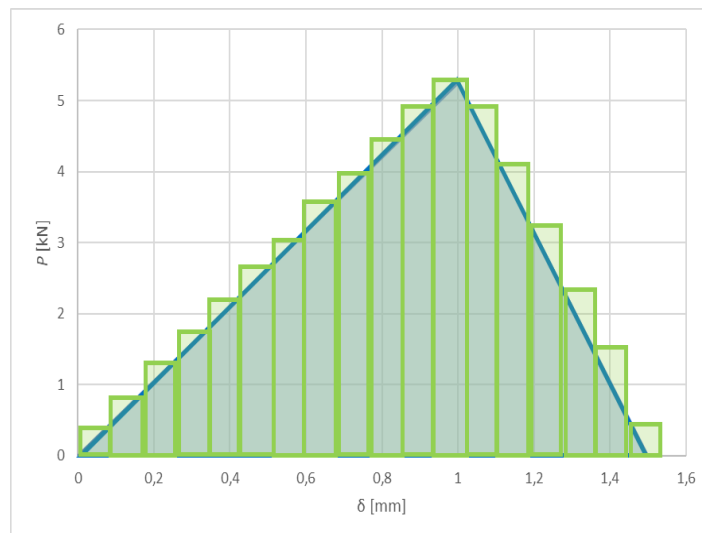


Figura 81 - Área da curva $P-\delta$ correspondente ao cálculo de $E_{máx}$

A Figura 82 mostra a evolução das energias de rotura para a SLJ. As juntas com PLA mostram um aumento de $E_{máx}$ com o aumento de L_0 para ambos os adesivos, sendo que no caso de $L_0=20$ mm as juntas com 7752 absorveram mais energia do que as juntas com 2015. As juntas com ABS também apresentam uma evolução e a superioridade do adesivo 7752 ocorre com $L_0=10$ e 20mm. Por fim, as juntas com PETG com 7752 não apresentam valores superiores do que 2015, mas $E_{máx}$ evolui com o aumento de L_0 .

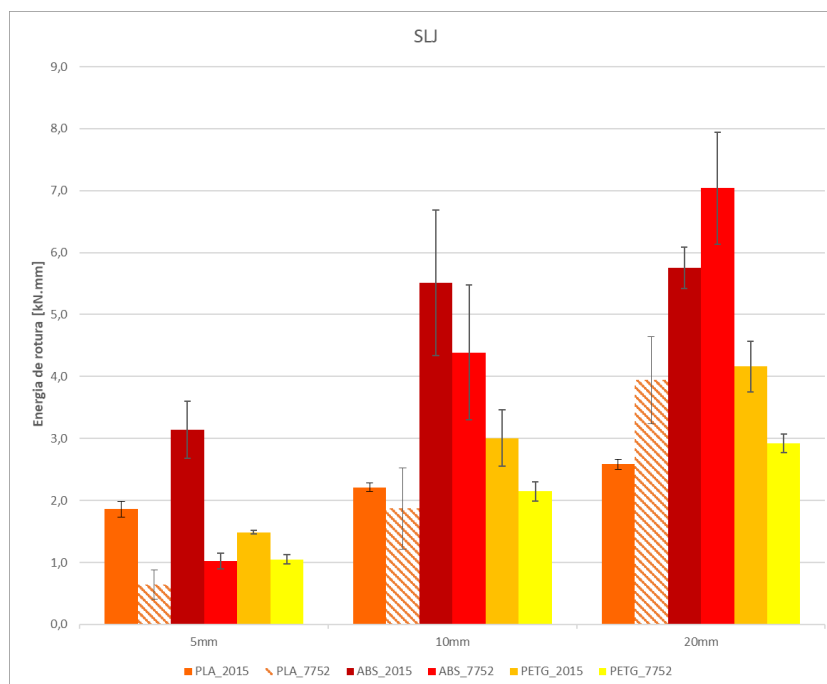


Figura 82 - Valores médios de $E_{máx}$ [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria SLJ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no coesiva no adesivo

Com a análise da Tabela 34 é possível realizar comparações entre as diferentes condições de junta.

- No que respeita às juntas com PLA, a $E_{máx}$ aumenta com o aumento de L_0 . Nas juntas com adesivo 2015, o aumento relativo entre $L_0=5-10$ mm foi de 19,0% e entre $L_0=10-20$ mm foi de 16,6%. As juntas com o adesivo 7752 revelaram aumentos de $E_{máx}$ bastante elevados.

Entre $L_0=5-10$ mm registou-se um aumento de 190,5% e entre $L_0=10-20$ mm, um aumento de 110,9%. Estes elevados aumentos entre os diferentes L_0 devem-se aos modos de rotura coesivos. A rotura coesiva provoca aumento de $P_{m\acute{a}x}$ e dos deslocamentos na rotura. As roturas no aderente tamb\em podem provocar aumentos de $E_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 . Comparando os diferentes adesivos, nestas juntas para os $L_0= 5$ e 10 mm, as juntas com adesivo 2015 apresentam 188,9 e 18,4% mais $E_{m\acute{a}x}$ que o adesivo 7752, mas para $L_0= 20$ mm, o adesivo 7752 apresenta mais 52,6% de energia absorvida. Esta altera\c{a}o deve-se ao elevado $P_{m\acute{a}x}$ registado com o adesivo 7752 ser mais elevado;

- Nas juntas com ABS e adesivo 2015, os aumentos de $E_{m\acute{a}x}$ foram de 75,6 e 4,4%, entre os intervalos de $L_0=5-10$ mm e de $L_0=10-20$ mm. Com o adesivo 7752, registam-se aumentos de 329,6% entre $L_0=5-10$ mm e 60,4% entre $L_0=10-20$ mm. Nas juntas com 7752 as roturas ocorreram pelo aderente, mas registou-se plastifica\c{e}es do aderente muito elevadas. Entre $L_0=5-10$ mm, o aumento foi de 329,6% porque com $L_0=5$ mm, a junta teve um comportamento praticamente el\astico at\e $P_{m\acute{a}x}$ e quando atingida essa for\c{a} o aderente rompeu de forma brusca. Com $L_0=10$ mm, apesar do comportamento predominantemente el\astico at\e $P_{m\acute{a}x}$, ap\os esta for\c{a}, o aderente come\c{a} a plastificar-se provocando assim o elevado aumento de $E_{m\acute{a}x}$. Entre adesivos, o adesivo 2015 apresenta 207,4 e 25,6% mais de energia absorvida do que o adesivo 7752, para $L_0=5$ e 10 mm, respetivamente. Com $L_0=20$ mm, o adesivo 7752 absorveu mais 22,3%, porque os $P_{m\acute{a}x}$ obtidos s\ao pr\oximos, mas o deslocamento obtido com 7752 foi superior.
- As juntas com aderentes de PETG apresentam aumentos de $E_{m\acute{a}x}$ de 102,4 e 38,4% com o adesivo 2015 entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm, respetivamente. Com o adesivo 7752, os aumentos de $E_{m\acute{a}x}$ registados foram de 104,7% entre $L_0=5-10$ mm e 35,9% entre $L_0=10-20$ mm. As juntas com aderentes de PETG, apresentaram sempre superioridade do adesivo 2015, cerca de 40% mais de energia do que o adesivo 7752 para os diferentes L_0 .

Entre os diferentes materiais aderentes verificou-se que o ABS foi o que permitiu obter mais energia absorvida, seguido do PETG e PLA.

Tabela 34 - Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kJ.mm] em fun\c{a}o de L_0 para as geometrias SLJ

Aderente		PLA			ABS			PETG		
Adesivo	L_0 [mm]	5	10	20	5	10	20	5	10	20
2015	M\edia	1,86	2,21	2,58	3,14	5,51	5,76	1,49	3,01	4,16
	Desvio Padr\ao	0,12	0,07	0,08	0,46	1,18	0,34	0,03	0,46	0,41
	CoV [%]	6,67	3,06	2,95	14,69	21,33	5,83	2,05	15,22	9,89
7752	M\edia	0,64	1,87	3,94	1,02	4,39	7,04	1,05	2,15	2,92
	Desvio Padr\ao	0,24	0,66	0,70	0,13	1,09	0,90	0,08	0,16	0,15
	CoV [%]	36,85	35,06	17,82	12,27	24,81	12,79	7,36	7,22	5,18

Relativamente \c{a}s juntas *step*, pela observa\c{a}o da Figura 83 verifica-se que as juntas com PLA e adesivo 2015 apresentam um ligeiro aumento de $E_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 , tal como as juntas PLA com 7752. De real\c{a}r que, no caso de $L_0=20$ mm, as juntas de PLA com 7752 apresentam valores superiores \c{a}s juntas com adesivo 2015. As juntas com ABS mostram uma discrep\ancia entre juntas

com adesivo 2015 e 7752. Não existe aumento de $E_{máx}$ com o aumento de L_0 para a condição com adesivo 2015, mas nos casos com 7752 existe ligeiro aumento com o aumento de L_0 . No caso de PETG as juntas apresentam uma evolução com $L_0=5$ mm para $L_0=10$ e 20mm no caso do adesivo 2015. Com o adesivo 7752, a evolução é contínua com o aumento de L_0 .

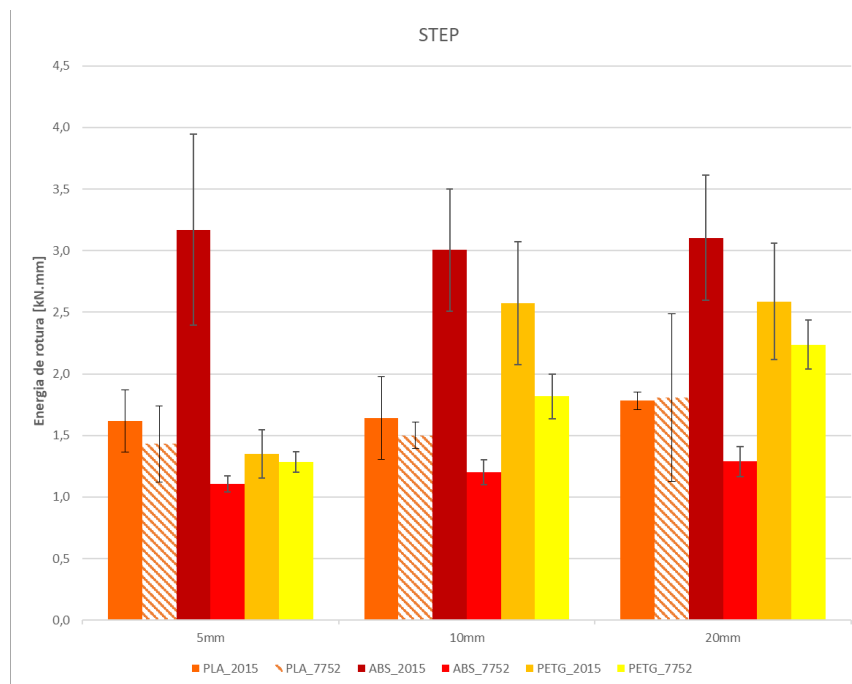


Figura 83 - Valores médios de $E_{máx}$ [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria *step*; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo

Com a Tabela 35 é possível realizar uma análise mais em detalhe da evolução de $E_{máx}$ nas juntas *step*.

- Nas juntas com aderentes de PLA e o adesivo 2015 verifica-se que há um aumento de $E_{máx}$ com o aumento de L_0 . Em termos percentuais, as juntas com o adesivo 2015 apresentam $E_{máx}$ superior ao 7752 em 1,5 e 8,5% entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm, respetivamente. Com o adesivo 7752, também se verifica aumento de $E_{máx}$ com o aumento de L_0 , sendo as diferenças percentuais de 4,9 e 20,6% entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm. Os aumentos de $E_{máx}$ são superiores com o adesivo 7752 devido às roturas coesivas que provocam aumentos de $P_{máx}$ e dos respetivos deslocamentos, ao contrário do adesivo 2015, em que as roturas ocorreram nos aderentes e com tal os deslocamentos e $P_{máx}$ são bastante próximos, para os diferentes L_0 ;
- As juntas com aderentes de ABS e adesivo 2015 resultam num aumento de $E_{máx}$ entre $L_0=5-10$ mm e diminuição entre $L_0=10-20$ mm, respetivamente. O sucedido deve-se ao $P_{máx}$ com $L_0=5$ mm ser superior ao obtido com $L_0=10$ mm, visto que os deslocamentos não variam de forma significativa para os diferentes L_0 devido às roturas nos aderentes. As juntas com aderentes de ABS e adesivo 7752 apresentam um ligeiro aumento de $E_{máx}$ de 8,6 e 7,0% entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm;
- As juntas com aderentes de PETG e adesivo 2015 apresentam um aumento de $E_{máx}$ entre $L_0=5-10$ mm de 91% e entre $L_0=10-20$ mm, não houve aumento significativo. O aumento entre os primeiros L_0 , deve-se à ligeira subida de $P_{máx}$ e dos deslocamentos na rotura. Com

o adesivo 7752, os aumentos registados foram de 42 e 23% entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm;

Entre adesivos, o 2015 absorveu mais energia do que o 7752 na maioria das situações, visto que as roturas ocorreram maioritariamente pelos aderentes. A única situação em que o adesivo 7752 absorveu mais energia que o 2015 foi na junta com aderente de PLA com $L_0=20$ mm devido aos deslocamentos elevados verificados na curva $P-\delta$ de PLA com 7752, Figura 70 b). Entre os diferentes materiais aderentes verificou-se que o ABS foi o que permitiu obter mais energia absorvida, seguido do PETG e PLA com a aplicação do adesivo 2015. Contudo, com o adesivo 7752, o aderente PETG apresentou maior $E_{m\acute{a}x}$ seguido do PLA e ABS.

Tabela 35 - Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] em função de L_0 para as geometrias *step*

Aderente		PLA			ABS			PETG		
Adesivo	L_0 [mm]	5	10	20	5	10	20	5	10	20
2015	Média	1,62	1,64	1,78	3,17	3,01	3,10	1,35	2,57	2,59
	Desvio Padrão	0,25	0,34	0,07	0,77	0,49	0,51	0,20	0,50	0,47
	CoV [%]	15,51	20,51	3,97	24,41	16,46	16,37	14,64	19,34	18,24
7752	Média	1,43	1,50	1,81	1,11	1,20	1,29	1,28	1,82	2,24
	Desvio Padrão	0,31	0,11	0,68	0,07	0,10	0,12	0,08	0,18	0,20
	CoV [%]	21,61	7,04	37,55	5,91	8,35	9,48	6,43	10,07	8,85

A Figura 84 mostra $E_{m\acute{a}x}$ para as geometrias *scarf*. Verifica-se que, para as juntas com aderentes de PLA, o aumento de L_0 promove o aumento de $E_{m\acute{a}x}$ independentemente do adesivo utilizado, sendo o valor de $E_{m\acute{a}x}$ para o adesivo 2015 superior para todos os L_0 . As juntas com aderentes ABS também demonstram aumento de $E_{m\acute{a}x}$ com o aumento L_0 sendo que para $L_0=20$ mm o adesivo 7752 apresenta valores superiores ao de 2015. O caso das juntas com aderentes de PETG comporta-se de forma igual às juntas PLA.

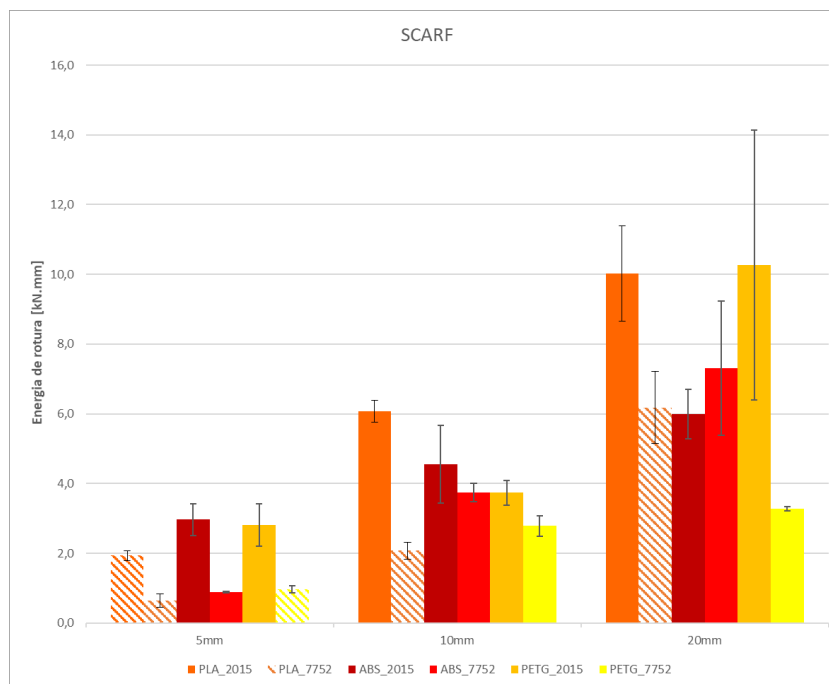


Figura 84 - Valores médios de $E_{máx}$ [kJ.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria *scarf*; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no adesivo

A Tabela 36 apresenta os valores de $E_{máx}$ obtidos durante os ensaios de tração das juntas *scarf*.

- Nas juntas com PLA e adesivo 2015, verifica-se um aumento de $E_{máx}$ de 214,8% entre $L_0=5-10$ mm e 64,9% entre $L_0=10-20$ mm. A diferença entre os aumentos reduz porque com $L_0=5$ mm a rotura surgiu no adesivo com um $P_{máx}$ relativamente inferior ao obtido com $L_0=10$ mm em que a rotura acontece no aderente. Entre $L_0=10-20$ mm, o aumento reduz significativamente porque as roturas ocorrem no aderente, obtendo um $P_{máx}$ semelhante. Contudo, com $L_0=20$ mm ocorre uma ligeira plastificação do aderente antes da rotura, o que faz com que os deslocamentos na rotura sejam superiores com $L_0=20$ mm e assim obter um $E_{máx}$ também superior. Com o adesivo 7752, as roturas ocorrem sempre no adesivo o que faz com que não se verifica tanta diferença no aumento de $E_{máx}$ entre os diferentes L_0 . Entre $L_0=5-10$ mm, $E_{máx}$ aumentou 220,0% e entre $L_0=10-20$ mm aumentou 197,4%. Com o aderente PLA o adesivo 2015, apresenta $E_{máx}$ superior ao adesivo 7752 em 197,3, 192,4 e 62,1%, para $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente. Estas diferenças devem-se às roturas no adesivo com 7752, que resultaram em $P_{máx}$ relativamente inferiores às obtidas com o adesivo 2015.
- Nas juntas com ABS, o aumento de $E_{máx}$ verificado com a utilização do adesivo 2015 foi de 53,5 e 31,8% entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm. Com o adesivo 7752, verificaram-se aumentos de $E_{máx}$ de 322,3 e 95,1% para os intervalos de $L_0= 5$ a 10 mm e $L_0= 10$ a 20 mm. O aumento elevado de $E_{máx}$ entre $L_0=5-10$ mm, deve-se ao $P_{máx}$ e deslocamentos registados com $L_0=10$ mm serem bastante superiores aos registados com $L_0=5$ mm. Com o ABS, o adesivo foi superior ao 7752 com $L_0=5$ e 10 mm, com superioridade em 234,2 e 21,5%. A diferença de 234,2% deve-se ao $P_{máx}$ obtido com o adesivo 7752 ser relativamente inferior devido à rotura praticamente no adesivo
- Nas juntas com aderentes PETG com o adesivo 2015, o aumento de $E_{máx}$ foi de 32,9 e 175,0% entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm, respetivamente. O aumento de 175,0% deve-se

à plastificação observada nos aderentes que provocaram um aumento elevado do deslocamento na rotura (Figura 76). Com o adesivo 7752 o aumento de $E_{máx}$ verificado foi de 186,4 e 17,9% entre $L_0=5-10$ mm e $L_0=10-20$ mm. O aumento de 186,4% deve-se aos diferentes modos de rotura, rotura coesiva no adesivo com $L_0=5$ mm e rotura no aderente com $L_0=10$ mm, que provocam aumentos substanciais de $P_{máx}$ e dos deslocamentos na rotura aderente. As juntas com PETG, mostram uma superioridade de $E_{máx}$ com o adesivo 2015 sobre o 7752 de 189,3, 34,2 e 213,0% para os $L_0= 5, 10$ e 20 mm, respetivamente. Entre os diferentes materiais aderente, nas aplicações do adesivo 2015, o PLA apresentou mais energia absorvida, seguido do PETG e ABS. Com o adesivo 7752, a ordem de superioridade foi do ABS, seguido de PLA e PETG.

Comparando os adesivos, as juntas com o adesivo 2015 apresentam mais energia do que 7752 na maioria dos casos. Entre aderentes o PLA foi o material que permitiu às juntas absorver mais energia.

Tabela 36 - Valores de $E_{máx}$ [kN.mm] em função de L_0 para as geometrias *scarf*

Adesivo	Aderente	PLA			ABS			PETG		
		L_0 [mm]	5	10	20	5	10	20	5	10
2015	Média	1,93	6,08	10,02	2,96	4,55	6,00	2,81	3,74	10,27
	Desvio Padrão	0,15	0,31	1,37	0,46	1,11	0,71	0,61	0,36	3,87
	CoV [%]	7,53	5,16	13,65	15,49	24,34	11,87	21,58	9,52	37,66
7752	Média	0,65	2,08	6,18	0,89	3,75	7,31	0,97	2,78	3,28
	Desvio Padrão	0,20	0,24	1,04	0,01	0,26	1,92	0,10	0,29	0,06
	CoV [%]	30,06	11,64	16,80	1,58	7,02	26,31	10,28	10,34	1,89

Nas SLJ e *step*, as juntas com ABS apresentam os valores máximos de absorção de energia, seguidos de PETG e PLA. Seria espectável este acontecimento, visto que os aderentes ABS e PETG apresentam um comportamento mais dúctil do que o PLA (Figura 50), o que permite absorver mais energia. Nas juntas *scarf*, as juntas com PETG apresentam mais energia absorvida, seguido de PLA e ABS. Verificou-se que, em algumas condições, as juntas com o adesivo 7752 absorviam mais energia do que as juntas com o adesivo 2015. Ora, isto deve-se aos comportamentos dos adesivos com o aumento de L_0 : o adesivo 2015 é um adesivo de natureza rígida e o adesivo 7752 é um adesivo mais dúctil e flexível o que lhe permite a absorção de mais esforços.

3.2. Trabalho numérico

Na componente numérica do presente trabalho pretende-se reproduzir os ensaios experimentais e validar a utilização dos MDC para previsão de resistência de juntas adesivas com aderentes impressos em 3D. As análises numéricas foram efetuadas através do *software* ABAQUS®, versão 2021. Este *software*, com interface simples e fácil de utilizar, baseia-se no MEF e permite a utilização de um módulo integrado de MDC triangular. De seguida, são apresentadas as condições da análise numérica e o respetivo MDC triangular utilizado. Depois, serão expostos os modos de rotura das juntas, estudo de resistência, rigidez e energia absorvida.

3.2.1. Preparação dos modelos numéricos

Previamente ao lançamento dos modelos numéricos, é necessário aplicar as condições em estudo: geometrias, propriedades dos materiais, malhas e cargas. A descrição seguinte refere passo a passo e de forma sequencial as operações a realizar para construir as juntas adesivas no ABAQUS®.

1º Passo: *Part*

Inicia-se o processo por definir o tipo de peça desejada, o tipo de comportamento e o tipo de elemento. A Figura 85 mostra as escolhas realizadas: peça 2D do tipo deformável com elemento *shell*.

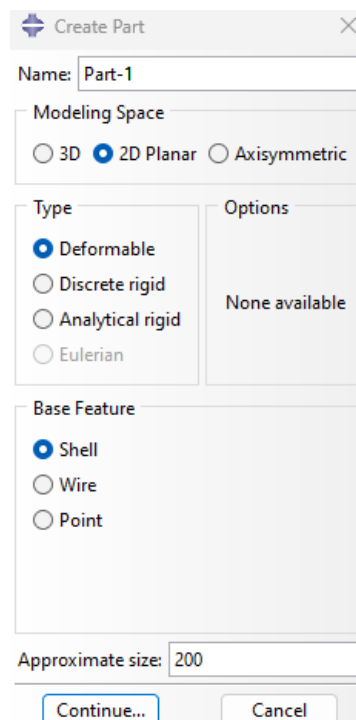


Figura 85 - Escolha do tipo de elemento em ABAQUS®

Assim que se selecionam as opções, surge o menu com diversas opções para que seja desenhada a geometria da junta pretendida. Os aderentes e adesivo foram desenhados num só corpo, como mostra a Figura 86, ao invés de serem modelados separadamente, permitindo assim reduzir a complexidade do sistema, sem influenciar os resultados. A geometria *scarf* foi a que apresentou mais dificuldades de modelação, pois foi necessário desenhar todas as partições individualmente na zona junto do adesivo de forma a refinar mais facilmente a malha, tal como mostra a Figura 87.

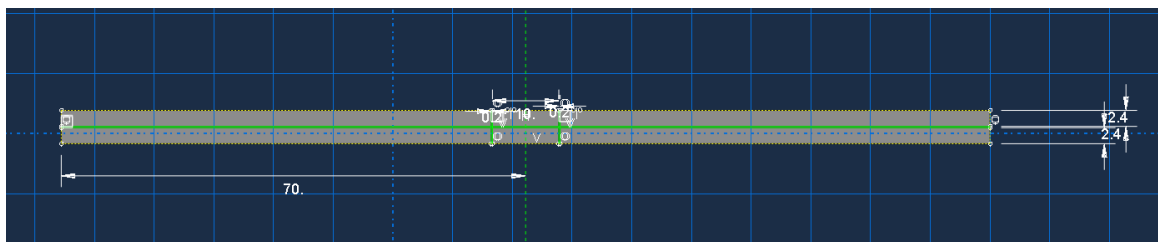


Figura 86 - Desenho 2D do provete com a geometria *step* com 10 mm de sobreposição no ABAQUS®

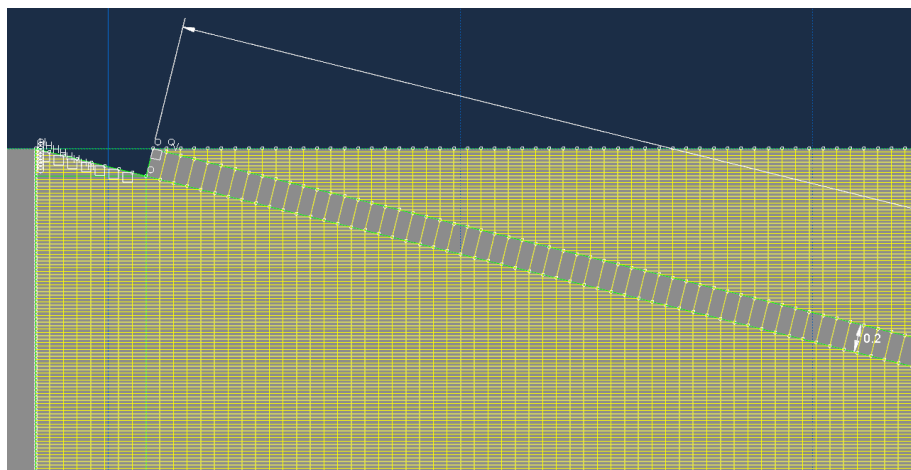


Figura 87 - Desenho 2D das partições na geometria *scarf* no ABAQUS®

As geometrias desenhadas apresentam as mesmas dimensões apresentadas e estudadas na componente experimental, apresentadas na Tabela 20. Desta forma permite-se que os resultados numéricos sejam o mais próximo possível dos resultados experimentais. Depois de desenhadas as geometrias, procede-se à divisão em partições para que no passo seguinte se possa atribuir as propriedades e tipo de comportamento a cada secção, diferenciando entre a zona aderente e adesivo. A Figura 88 ilustra diferentes geometrias após a partição.

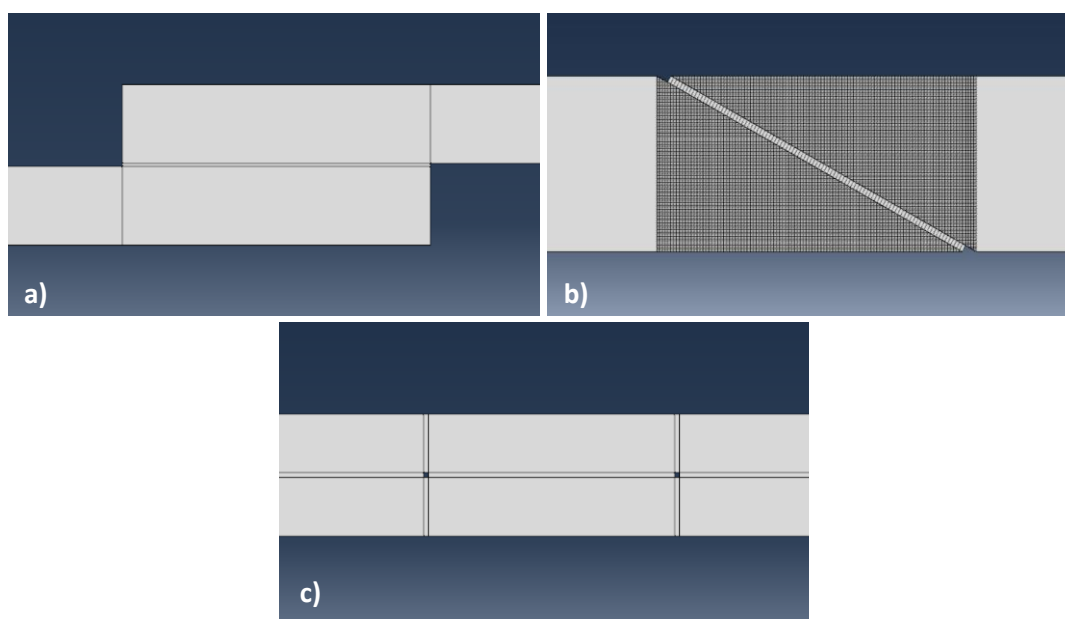


Figura 88 - Diferentes geometrias após partições no ABAQUS®: a) SLJ com 20 mm sobreposição; b) *step* com 10 mm sobreposição; c) *scarf* com 20 mm sobreposição

2º Passo: *Property*

Neste passo atribuem-se as propriedades mecânicas a cada partição criada anteriormente. O adesivo é modelado com elementos coesivos triangulares, cuja formulação é descrita no capítulo seguinte. As propriedades elásticas são do tipo tração e deve ser inserido o módulo de Young, E [MPa] e o módulo de corte, G [MPa]. O critério de iniciação de dano em modo misto aplicado aos adesivos é o “*Quads Damage*”, e são inseridas as tensões limite à tração, σ_r [MPa] e ao corte τ_n [MPa]. A rotura em modo misto é definida por um critério linear energético pelo que no *software* são inseridas as tenacidades da fratura à tração, G_{Ic} [N/mm] e ao corte G_{IIc} [N/mm]. A Figura 89 ilustra a introdução das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo 2015.

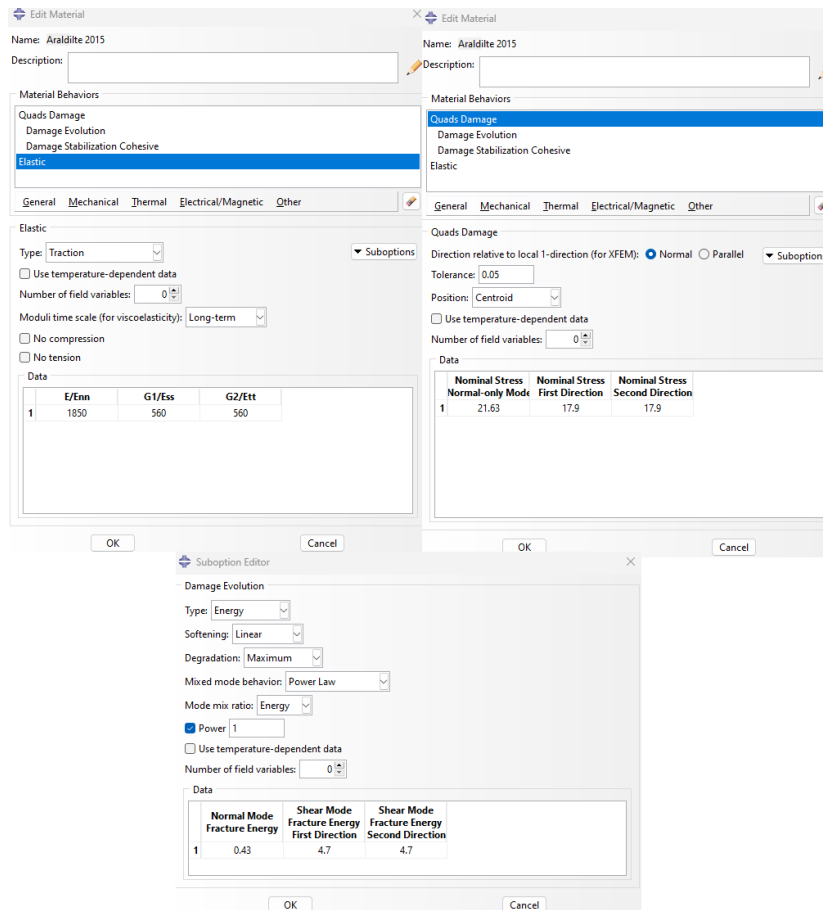


Figura 89 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 em ABAQUS®

Relativamente às propriedades dos aderentes, estas são divididas em propriedades elásticas e plásticas. Nas propriedades elásticas, com a consideração do aderente como um elemento isotrópico, insere-se o módulo de Young, E [MPa] e o coeficiente de Poisson, ν . Nas propriedades plásticas deve ser fornecida a relação entre a tensão e a deformação plástica correspondente. Neste trabalho, foi considerado comportamento perfeitamente plástico após a tensão de cedência, de forma a simplificar as simulações numéricas, pelo que na Figura 90 é considerado apenas um ponto da curva σ - ϵ . A aplicação de dois pontos foi testada, mas não surtiu resultados diferentes da aplicação com apenas um ponto. Após a tensão de cedência o elemento comporta-se de modo perfeitamente plástico. As propriedades mecânicas dos aderentes podem ser consultadas na Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19. Para resultados numéricos mais próximos da realidade deve-se aplicar outras propriedades mecânicas e modelos numéricos mais complexos. Contudo, as

propriedades apresentadas permitem aproximação com elevada precisão devido à lei coesiva de elementos triangulares utilizada como base do estudo numérico, explicada no capítulo seguinte.

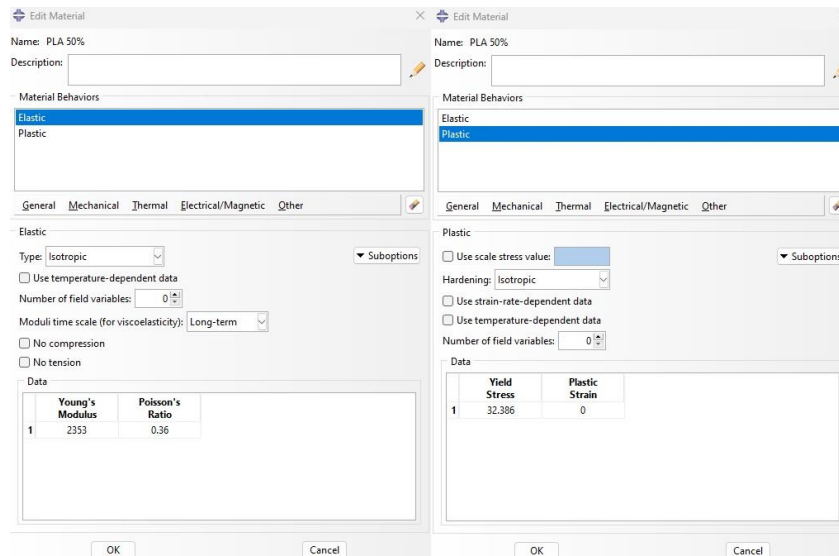


Figura 90 - Propriedades mecânicas do aderente PLA no ABAQUS®

Assim que se encontram criadas as propriedades, são criadas as secções, para o adesivo e aderente, que devem ter associadas as respetivas propriedades. A Figura 91 mostra que, o adesivo é considerado do tipo coesivo e o aderente como sólido homogéneo. Durante a atribuição das propriedades é também indicado a largura de cada partição, que neste caso é de 25,4 mm.

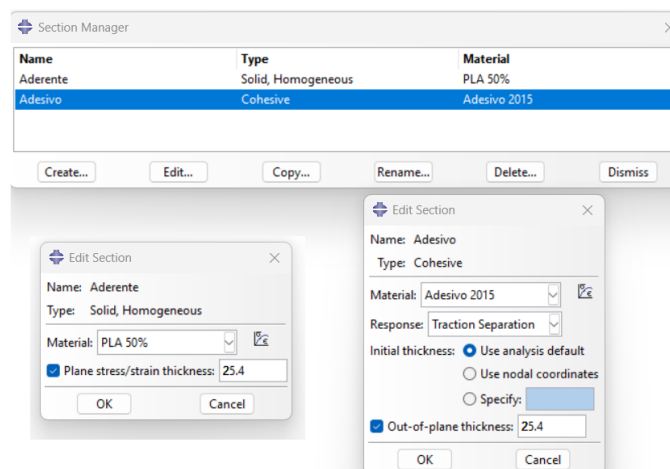


Figura 91 – Secções com propriedades atribuídas no ABAQUS®

Correlaciona-se as secções com as partições de forma que cada partição detenha as propriedades necessárias. Na Figura 92, a partição vermelha detém as propriedades da secção “Adesivo”.

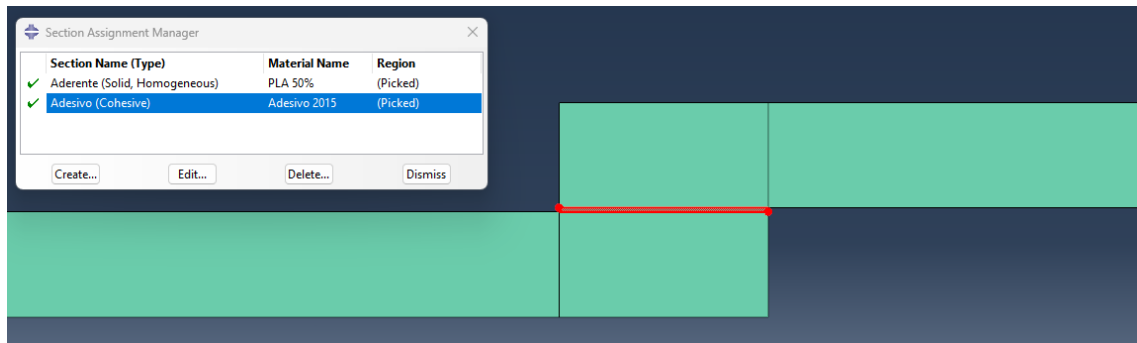


Figura 92 - Partição vermelha com a secção adesivo atribuída

3º Passo: Assembly

Como o modelo é criado como um só elemento, não há necessidade de trabalhar este passo, sendo apenas criada a instância da parte.

4º Passo: STEP

Neste passo introduzem-se os parâmetros de computação da simulação. A análise é do tipo estática pelo que o STEP é do tipo “*Static, General*”. Os incrementos e o seu tamanho são descritos na Figura 93. Aplicou-se o valor de 10000 como máximo de incrementos para evitar a paragem da simulação por excesso de número permitido de incrementos.

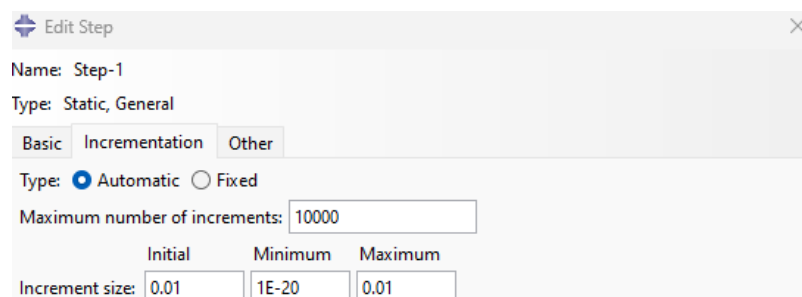


Figura 93 - Definição dos incrementos em ABAQUS®

Ainda neste passo, são adicionados os “*sets*” de deslocamentos e reações para que no final das simulações seja possível retirar as curvas $P-\delta$ e os “*outputs*”, SDEG e STATUS, para que após simulação seja possível analisar com mais detalhe os deslocamentos e as forças

5º Passo: Interaction

Não se aplica neste caso porque a junta é tratada como uma peça única, pelo que não é necessário estabelecer contactos entre componentes.

6º Passo: Load

A simulação de carregamento de tração necessita que as condições fronteiras sejam aplicadas no modelo para que se reproduza de forma numérica, os ensaios realizados de forma experimental. A Figura 94 permite visualizar as condições aplicadas: encastramento na extremidade esquerda e um deslocamento horizontal de 5 mm na extremidade direita, restringindo o deslocamento vertical. Em alguns casos, o deslocamento horizontal foi alterado para 10mm para garantir rotura total da junta. Com estas condições de fronteira, considera-se uma simulação de tração em condições ideais, muito difíceis de atingir de forma experimental. Estas condições passam pela restrição de movimento na direção perpendicular ao carregamento. Numericamente, esta condição é aplicada

com a restrição vertical na extremidade direita da Figura 94, e experimentalmente, esta restrição é realizada com o alinhamento entre as amarras. Outra condição ideal, não possível de reproduzir numericamente, é o escorregamento das juntas durante o ensaio de tração, provenientes de um possível mau aperto nas amarras da máquina ou do ajuste da máquina no início de cada ensaio.

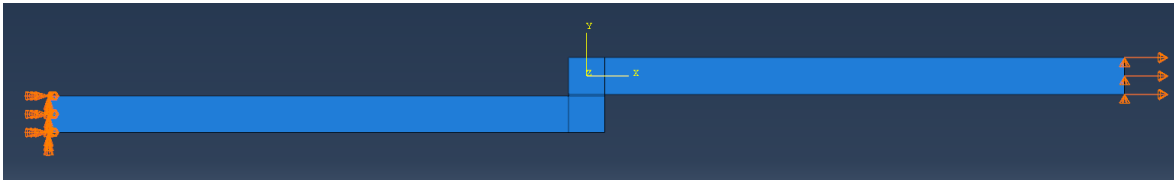


Figura 94 - Condições fronteira aplicadas no ABAQUS®

7º Passo: *Mesh*

Neste passo são trabalhados os parâmetros de malha que se pretende aplicar a cada partição anteriormente criada. A malha foi construída com elementos quadriláteros, alinhados vertical e horizontalmente, do tipo “structured” para as partições de aderente e do tipo “sweep” para as partições de adesivo. A Figura 95 mostra que as zonas sujeitas a maiores tensões, junto das extremidades da ligação adesiva, estão mais refinadas do que no centro da junta. De notar que a zona representativa do adesivo apresenta apenas um elemento de malha ao longo da espessura. Por exemplo, na SLJ, a junta apenas detém um elemento na vertical, com tamanho máximo de 0,2mm (espessura do adesivo); a junta *step* apresenta um elemento vertical no comprimento disposto na horizontal e um elemento na horizontal nos comprimentos verticais; a junta *scarf* devido à sua complexidade, com as várias partições, apresenta apenas um elemento na direção do adesivo. Consoante se aumenta o comprimento de sobreposição, L_o , também se aumentou o número de elementos na junta para manter a uniformidade nas zonas críticas. Por exemplo, na SLJ com $L_o=5$ mm, existem 15 elementos na zona adesivo, no caso de $L_o=10$ mm existem 31 elementos e para $L_o=20$ mm, 61 elementos.

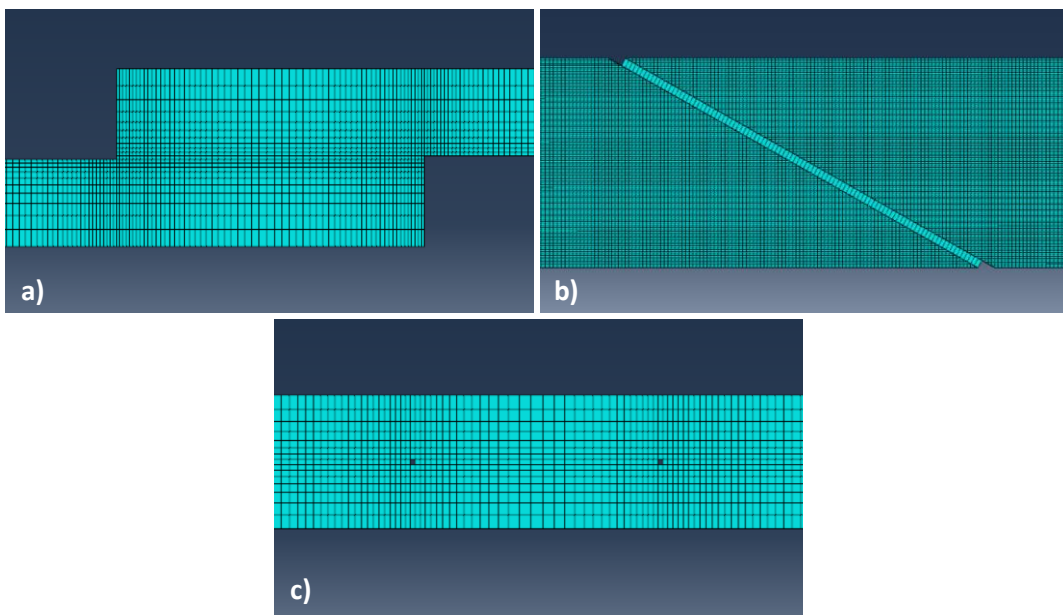


Figura 95 - Malhas aplicadas a cada geometria no ABAQUS®: a) SLJ com 20mm sobreposição; b) *step* com 10mm sobreposição; c) *scarf* com 20mm sobreposição

8º Passo: *Job*

Neste passo é dada a instrução para realização da simulação. É possível selecionar a capacidade do computador que se pretende dedicar à simulação.

9º Passo: *Results*

Quando terminado o *job*, é necessário proceder ao tratamento dos dados para reproduzir as curvas $P-\delta$. No “set” de valores é somado todas as reações do encastramento e retirado os valores do deslocamento. Com a combinação deste “set” é possível gerar as curvas $P-\delta$ e extrair um Excel® com a mesma informação para analisar mais detalhadamente os dados. Nesta altura é possível visualizar pelo critério de Von Mises as zonas de concentração de tensões e o dano nas camadas adesivas com o parâmetro SDEG.

3.2.2. Modelo coesivo triangular

Como abordado, no subcapítulo 2.2.6.3, existem diversos MDC disponíveis para aplicação em diversas situações, consoante o comportamento do material em questão, como por exemplo o modelo linear parabólico [103], triangular [104], exponencial [105], polinomial [106] e trapezoidal [107]. Com base no comportamento do material em simulação, podem ser assumidos diferentes tipos de leis de forma a obter resultados mais precisos. Das leis enumeradas, a lei triangular, devido à sua simplicidade, é o tipo de lei mais utilizada [108]. A sua simplicidade resulta do número reduzido de parâmetros a determinar e ainda pelos resultados precisos na maioria das condições reais. Este tipo de modelo pode ser do tipo bidimensional (2D) ou 3D, sendo que no modo 2D, representado na Figura 96, são estabelecidas duas versões distintas: modo puro e modo misto.

O modo puro, correspondente à lei de maiores dimensões, é caracterizado pela propagação do dano ocorrer num conjunto de nós homólogos quando os valores de tensão no respetivo modo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto, correspondente à lei de menores dimensões, é caracterizado pela utilização de critérios energéticos e de tensão para combinar os modos puros de tração e corte [109].

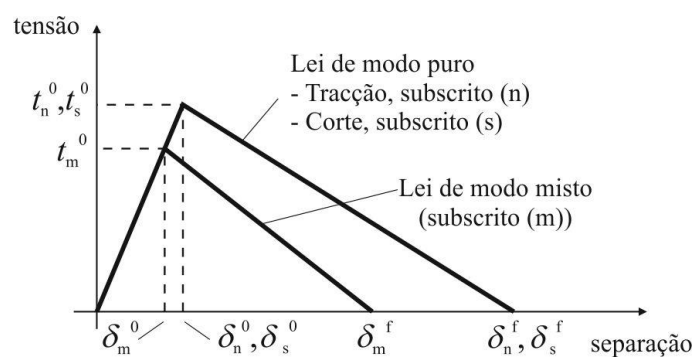


Figura 96 - Modelo coesivo triangular [109]

Os elementos coesivos são sujeitos a uma componente de tração e outra de corte, determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas de adesivo, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana podem ser desprezadas. A relação entre as tensões e deformações é definida pela matriz constitutiva K_{COH} , antes da ocorrência do dano. A matriz, definida pela equação seguinte, relaciona as tensões (\mathbf{t}) e deformações ($\boldsymbol{\varepsilon}$) em tração e corte nos elementos coesivos.

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} * \boldsymbol{\varepsilon} \quad (6)$$

Os parâmetros coesivos t_n e t_s representam as tensões coesivas à tração e ao corte, respetivamente, e ε_n e ε_s representam as deformações de tração e ao corte, respetivamente. A matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada.

Para uma formulação local, utilizada na simulação de fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz \mathbf{K}_{COH} possuem valores extremamente elevados, com o propósito de não existirem deformações artificiais criadas pelos elementos coesivos [110]. Para formulações contínuas de camadas finas, em especificamente as ligações adesivas, é possível uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$k_{nn} = E, \quad (7)$$

$$k_{ss} = G, \quad (8)$$

$$k_{ns} = 0, \quad (9)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Assumindo estes parâmetros, o modelo reproduz fielmente a deformação da camada adesiva [111]. No modo misto, a iniciação de dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, definido pela equação:

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1, \quad (10)$$

onde $\langle \rangle$ são os parênteses de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. Quando se atinge a resistência coesiva em modo misto, t_m^0 , pela igualdade da equação anterior, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos é prevista por um critério linear energético, em função dos valores G_I e G_{II} através da equação:

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (11)$$

3.2.3. Determinação dos parâmetros coesivos

Os parâmetros coesivos devem ser calibrados experimentalmente, de forma a simular com maior precisão a rotura de uma ligação e de seguida validados. Estes parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC}) têm sido alvo de inúmeros estudos. Porém, de acordo com Lee, et al. [112], a obtenção de alguns parâmetros como t_n^0 , t_s^0 , não se encontra devidamente padronizado. Assim, surgem diferentes técnicas de análise de dados, como o método de definição individual de parâmetros direto, o método direto e o método inverso, cada um com diferente grau de complexidade e precisão. Vários trabalhos foram realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo de ensaios *double cantilever beam* (DCB), *end-notched flexure* (ENF) e JSS [107, 113]. O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. Este método é considerado crítico, visto que surgem desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva, derivados do modo

misto de propagação de fendas em ligações adesivas, por sua vez decorrente do efeito das restrições às deformações de uma camada fina de adesivo entre dois aderentes [114]. O método direto calcula a forma exata das leis coesivas, na medida que estima a forma dos MDC da ligação a partir da informação fornecida pelos ensaios à fratura [114], pela diferenciação das curvas $G_{I-\delta_n}$ ou $G_{II-\delta_s}$, sendo δ_n o deslocamento à tração e δ_s o deslocamento ao corte. G_{IC} e G_{IIC} são os parâmetros principais a determinar, no que respeita aos MDC, devido ao papel predominante nos resultados globais. De forma a avaliar estes dois parâmetros, os métodos com base na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, mas apenas podem ser aplicados em adesivos de ductilidade pouco acentuada. O método indireto consiste num procedimento iterativo de ajuste entre previsões numéricas e dados experimentais, o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas quando se executa o ajuste de parâmetros [115].

Independentemente do método utilizado para a avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios geralmente usados para a determinação dos parâmetros G_{IC} e G_{IIC} são os ensaios DCB e ENF, respetivamente. O ensaio DCB aparenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. O ensaio DCB segue a norma ASTM D3433-99 [116] e é constituído por dois aderentes unidos por uma camada fina de adesivo, como mostra a Figura 97. Durante o fabrico do provete é provocada uma fenda inicial numa das extremidades. No decorrer do ensaio é necessária a constante medição de a . Na determinação do parâmetro G_{IC} podem surgir algumas dificuldades, pois em alguns casos a propagação da fenda pode ser instável, o que torna difícil a medição do comprimento de fenda durante o ensaio [117]. Existem vários métodos na obtenção deste parâmetro, como métodos baseados na teoria de vigas, métodos baseados no comprimento equivalente ou integral-J [118]. Estudos conduzidos por Rice [119] permitiram-lhe obter uma expressão para o valor de G_{IC} em provetes DCB através da formação do integral-J, que também permitiu obter a relação entre tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda [120]. O ensaio ENF é descrito como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda (a_0). No centro do provete é aplicada uma carga P , como mostra a Figura 98. A carga aplicada origina a propagação da fenda sem haver separação dos aderentes. De forma a assegurar a estabilidade da junta, a_0 deve ser pelo menos igual a 70% do comprimento de L [121]. Tal como no ensaio DCB, no ensaio ENF a determinação do parâmetro G_{IIC} requer a constante medição de a , que apresenta dificuldades acrescidas pelo facto de a crescer sem abertura entre as faces da fenda pelo que podem surgir dificuldades na estimativa do parâmetro.

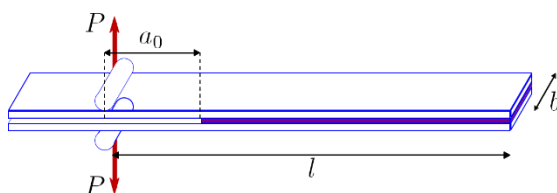


Figura 97 – Geometria do provete DCB [122]

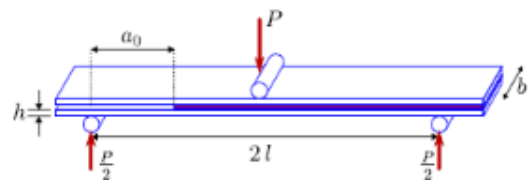


Figura 98 – Geometria do provete ENF [122]

3.2.4. Araldite® 2015

A caracterização deste adesivo recorreu aos ensaios DCB e ENF para determinar G_{IC} e G_{IIC} usando métodos ou teorias apropriadas. Estes valores foram então utilizados para a criação de uma lei coesiva no modo puro adequado ao material a simular. Inicialmente, os valores de t_n^0 e t_s^0 foram

tidos como aproximações baseadas nas propriedades do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração e ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a simular. O valor de t_n^0 e t_s^0 foi obtido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do respetivo teste de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita obter fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com provetes maciços de adesivo [123] e *Thick-Adherend Shear Test* (TAST) [124], respetivamente. A Tabela 37 recapitula os parâmetros coesivos utilizados para simular a camada de adesivo Araldite®2015.

3.2.5. Sikaforce® 7752

Os parâmetros coesivos do adesivo Sikaforce®7752 foram estimados de forma semelhante ao adesivo Araldite®2015. Para a determinação da lei coesiva ao corte, seguiu-se um método inverso idêntico. Na determinação do valor de G_{IC} recorreu-se a ensaios de fratura ENF, e conseqüente de ajuste manual iterativo para estimar o valor de t_s^0 . Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios obtidos no estudo realizado por Azevedo [125]. Estes valores apresentam desvios padrão reduzidos entre os provetes testados, o que mostra uma repetibilidade dos ensaios realizados. Devido à inexistência, até à data, de processos inversos para obtenção da lei coesiva em tração foi utilizado um processo diferente. O valor G_{IC} foi obtido através da média de valores obtido numa série de ensaios de fratura DCB. O valor t_n^0 foi aproximado ao valor médio da resistência à tração de provetes maciços de adesivo. Como observado em trabalhos prévios, no caso particular da solitação à tração, o valor t_n^0 não tem influência significativa para variações até 25% do valor obtido pelo método inverso, pelo que se considerou não necessária a aplicação de um método inverso [102]. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com provetes maciços de adesivo e TAST. A Tabela 37 recapitula os parâmetros coesivos utilizados para simular a camada de adesivo Sikaforce®7752.

Tabela 37 - Parâmetros coesivos em tração e corte para a simulação de camada adesiva

Propriedades	Sikaforce® 7752 [102]	Araldite® 2015 [126]
Módulo de Young à tração, E [MPa]	493,81	1850
Módulo ao Corte, G [MPa]	187,75	560
Tensão coesiva à tração, t_n^0 [MPa]	11,49	21,63
Tensão coesiva ao corte, t_s^0 [MPa]	10,17	17,90
Tenacidade fratura à tração, G_{IC} [N/mm]	2,36	0,43
Tenacidade fratura ao corte, G_{IC} [N/mm]	5,41	4,7

3.3. Resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas por MEF, desde os modos de rotura, curvas $P-\delta$ e resistência, rigidez e energia absorvida na rotura

3.3.1. Modos de propagação de dano e rotura

Uma vantagem das análises numéricas por EF com o *software* ABAQUS® é a possibilidade de visualizar a evolução da degradação do adesivo e aderente desde o início do carregamento até à sua rotura com a utilização da variável SDEG. No presente subcapítulo é feita a análise aos modos de propagação do dano até à rotura e às roturas obtidas por geometria de junta. Em todas as condições de geometria foram verificadas roturas por dois modos diferentes: coesiva no adesivo e pelo aderente.

- Geometria SLJ

A Figura 99 mostra a forma como evolui a zona de concentração de tensões nas SLJ. A ordem alfabética das diferentes imagens segue a ordem dos incrementos durante a simulação numérica. Na Figura 99 a), inicia-se o carregamento e verifica-se de imediato que nas extremidades da camada adesiva surge uma concentração de tensões. Com o contínuo aumento das forças verifica-se o aumento da zona de concentração de tensões (Figura 99 b)). Neste momento, dependendo do material mais resistente a concentração de tensões pode levar à rotura do aderente, com ou sem plastificação, ou ao início da deformação do adesivo, mostrado na Figura 100. No caso em análise, a rotura surge no adesivo, pelo que a zona de concentração de tensões dissolve-se e acompanha o percurso feito pelo dano do adesivo, como mostra a Figura 99 c). Em caso de rotura no aderente iria-se verificar uma plastificação dos aderentes junto à extremidade da camada adesiva, como é indicado na Tabela 38.

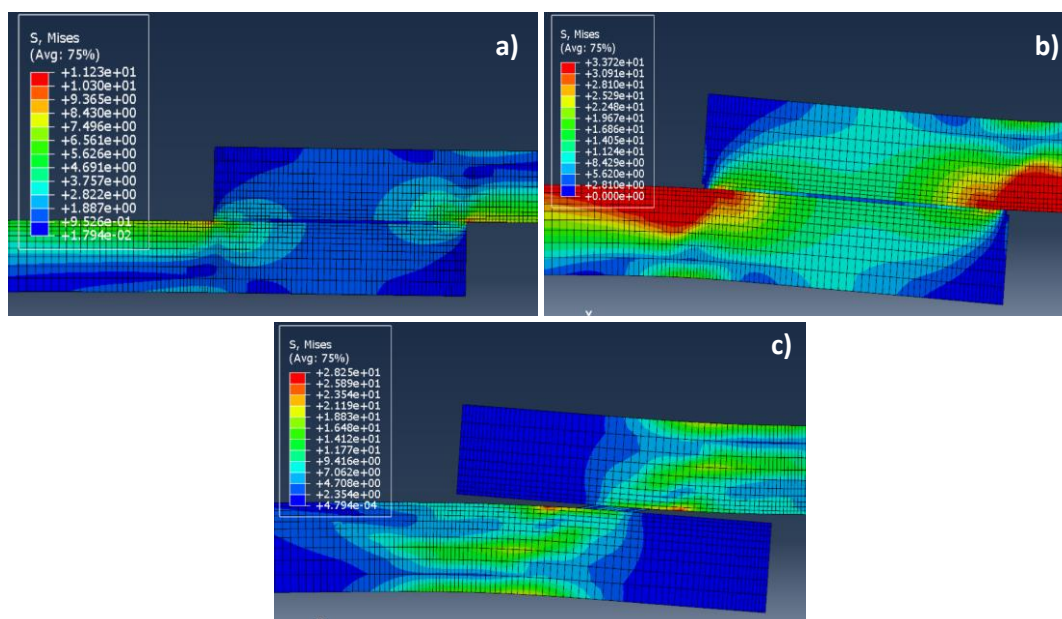


Figura 99- Modo de propagação de dano SLJ: zona críticas de tensões

A Figura 100 mostra como ocorre a rotura do adesivo. Verifica-se que no início do carregamento não existem forças aplicadas ao adesivo, Figura 100 a). Com a aplicação de força verifica-se que se inicia o dano no adesivo a partir das extremidades da camada adesiva (Figura 100 b)). Como o caso analisado, o aderente é mais resistente do que o adesivo, verifica-se que entre os aderentes a deformação da camada adesiva se propaga para o centro da junta adesiva até à rotura (Figura 100 c)).

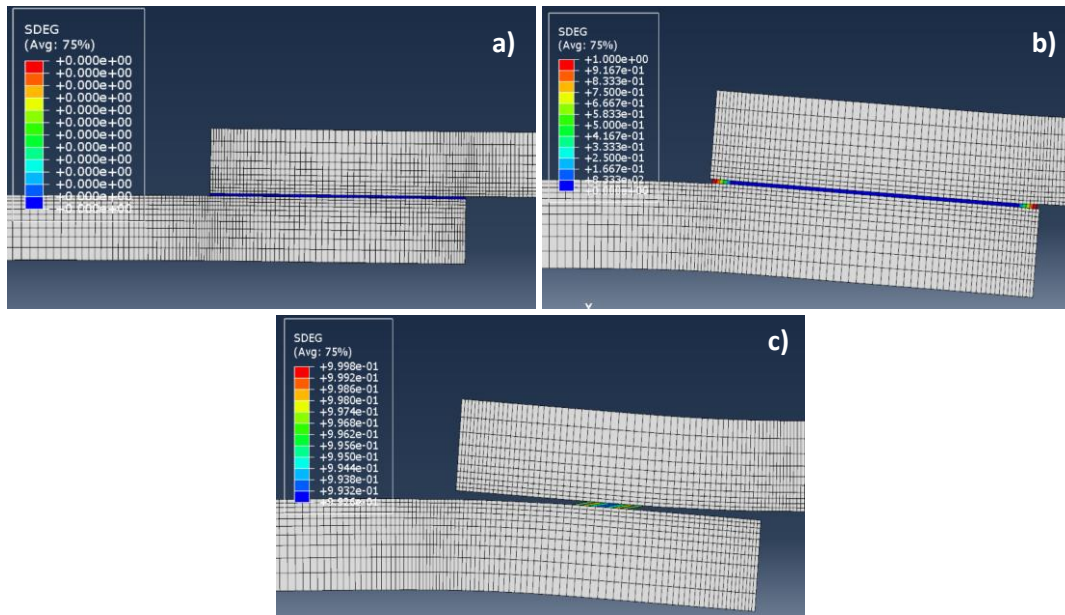


Figura 100 - Modo de propagação de dano SLJ: deformação do adesivo

A Tabela 38 apresenta os diferentes modos de rotura verificados nas SLJ. As roturas coesivas no adesivo ocorreram nas extremidades camada adesiva. Nas roturas pelo aderente verificou-se plastificação do aderente sobre a zona de adesão ou junto das extremidades da ligação. Nas juntas de PLA, independentemente do adesivo e do L_0 verificou-se sempre roturas coesivo do adesivo no centro ou nas extremidades da camada de adesivo. Nas juntas de ABS, com 2015, as roturas ocorreram pelo aderente. Com $L_0=5$ mm, o aderente plastificou sobre a camada de adesivo, enquanto para $L_0=10$ e 20 mm o aderente deformou plasticamente na zona junto às extremidades do adesivo. Com 7752, para os $L_0=5$ mm verificou-se roturas coesivas no adesivo e com $L_0=10$ e 20 mm rotura do aderente nas extremidades da união. Nas juntas de PETG, com o adesivo 2015 as roturas ocorreram pelo aderente e com o adesivo 7752 ocorreu rotura pelo adesivo para $L_0=5$ mm, enquanto para $L_0=10$ e 20 mm ocorreu rotura pelo aderente.

Tabela 38 - Modos de rotura verificados no ABAQUS® para a geometria SLJ

Modo de rotura	Exemplo	Descrição
Coesiva no adesivo		Rotura coesiva do adesivo nas extremidades da junta
Aderente		Rotura no aderente na zona de adesão
		Rotura no aderente nas extremidades da ligação

A Tabela 39 apresenta as roturas verificadas nas SLJ, numérica e experimentalmente obtidas, para os diferentes aderentes, adesivos e L_0 . Com o aderente de PLA verifica-se que as roturas, obtidas numericamente, ocorrem sempre pelo adesivo, enquanto de forma experimental as roturas surgiram no aderente com o adesivo 2015 e roturas coesivas no adesivo com a aplicação de 7752. A diferença dos modos de rotura com o adesivo 2015 podem estar relacionados com camadas adesivas superiores às pretendidas e fusões disformes nos aderentes. Com o aderente de ABS, as roturas ocorrem de forma semelhante com o adesivo 2015 e 7752, com a exceção de com adesivo 7752 e $L_0=5$ mm, numericamente a rotura ser coesiva no adesivo e experimentalmente no aderente. Esta rotura no aderente, como referido no capítulo 3.1.4 seria de esperar que ocorresse também de forma coesiva no adesivo. Tal não ocorreu devido ao romper de camadas internas devido à falta de fusão durante o processo de fabrico dos aderentes ABS. Com o aderente de PETG, a única diferença entre os modos de rotura surge com o adesivo 7752 e $L_0=5$ mm, que numericamente ocorre a rotura coesiva no adesivo e experimentalmente ocorre no aderente. Estes modos de rotura diferentes podem ter resultado de defeitos de fabrico das juntas, em que durante a aplicação do adesivo é possível que a camada adesiva apresentasse mais de 0,2 mm de espessura, promovendo assim uma rotura no aderente como surge com $L_0=10$ mm.

Tabela 39 - Modos de rotura SLJ: experimental vs. numérico

Adesivo	L_0 [mm]	PLA		ABS		PETG	
		EXP	NUM	EXP	NUM	EXP	NUM
Araldite® 2015	5	Ad	Co	Ad	Ad	Ad	Ad
	10	Ad	Co	Ad	Ad	Ad	Ad
	20	Ad	Co	Ad	Ad	Ad	Ad
Sikaforce® 7752	5	Co	Co	Ad	Co	Ad	Co
	10	Co	Co	Ad	Ad	Ad	Ad
	20	Co	Co	Ad	Ad	Ad	Ad
Componente de Estudo		EXP	NUM	EXP	NUM	EXP	NUM

Legenda: Ad = rotura no aderente; Co = rotura coesiva no adesivo; EXP = Experimental; NUM = Numérico

- Geometria *step*

A Figura 101 mostra a forma como evolui a zona de concentração de tensões nas juntas *step*. A ordem alfabética das diferentes imagens segue a ordem dos incrementos durante a simulação numérica. Na Figura 101 a), inicia-se o carregamento e verifica-se de imediato que nas extremidades da camada adesiva surge uma concentração de tensões. Com o contínuo aumento das forças verifica-se o aumento da zona de concentração de tensões (Figura 101 b)). Nesta altura já se verifica a rotura das faces adesivas verticais e junto à camada de adesivo central não se verificam grandes tensões. Quando a rotura das faces adesiva ocorrer de forma total, dependendo do material mais resistente a concentração de tensões pode levar à rotura do aderente, com ou sem plastificação, ou ao início da deformação do adesivo, mostrado na Figura 101 c). No caso em análise, a rotura surge de forma coesiva no adesivo, pelo que a zona de concentração de tensões dissolve-se e acompanha o percurso feito pelo dano do adesivo na camada central, como mostra a Figura 101 c). Em caso de rotura no aderente iria-se verificar uma plastificação dos aderentes junto à zona de transição entre os degraus como é indicado na Tabela 40. Na Figura 101 d) verifica-se que já se deu a rotura coesiva do adesivo, terminando assim a simulação.

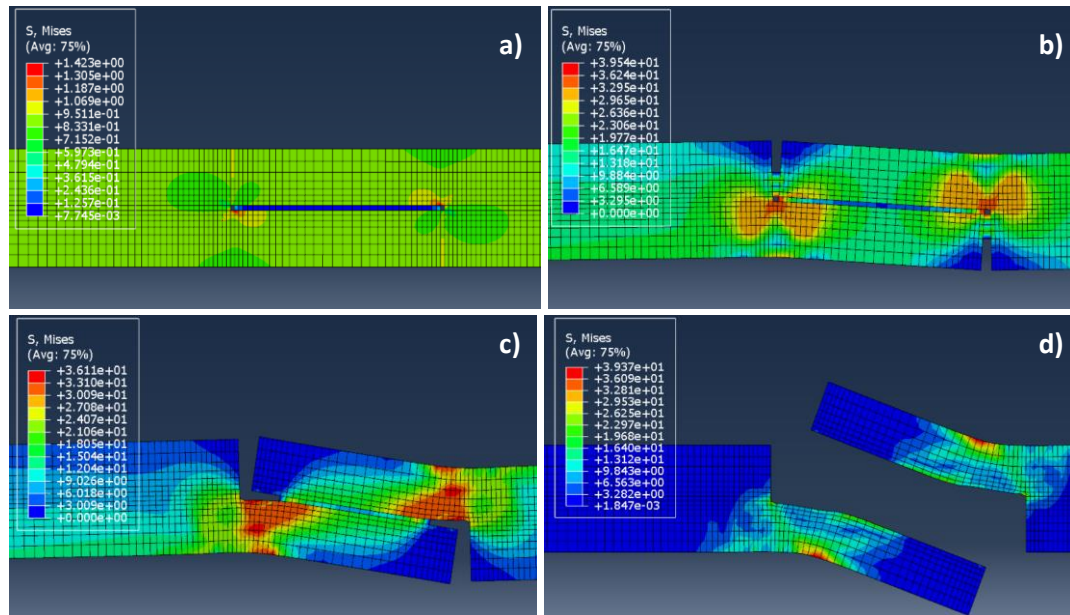


Figura 101 - Modo de propagação de dano juntas *step*: zona críticas de tensões

Na Figura 102 mostra como ocorre a rotura do adesivo. Verifica-se assim que se inicia o carregamento, as extremidades das faces de adesivo verticais apresentam deformação (Figura 102 a)). Com a continua aplicação das forças, verifica-se a deformação da face adesiva vertical (Figura 102 b)). Nesta altura, o elemento mais resistente irá iniciar a sua deformação. Neste caso é feita a análise de uma rotura coesiva, pelo que após a rotura total das faces verticais, a deformação segue para a camada de adesivo central, como mostra a Figura 102 c). Nesta altura, a deformação do adesivo ocorre da mesma forma que nas SLJ (Figura 100), em direção ao centro da junta até à rotura total (Figura 102 d)).

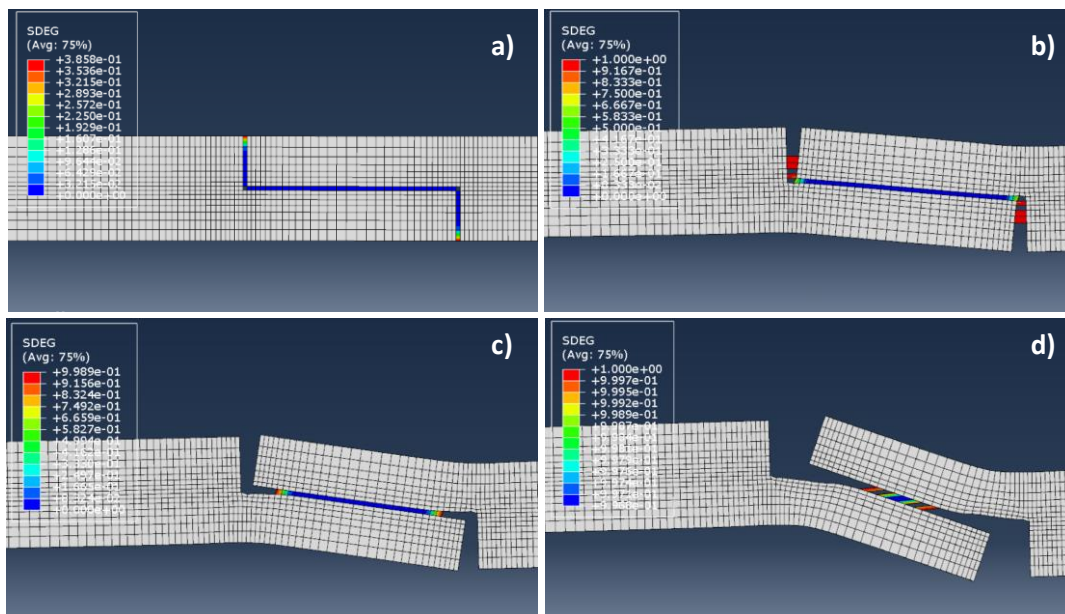
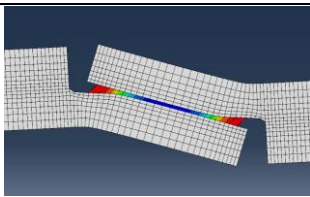
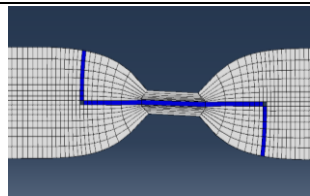
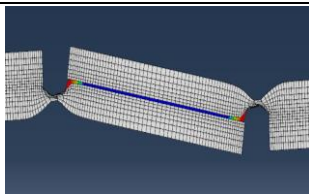


Figura 102 - Modo de propagação de dano juntas *step*: deformação do adesivo

A Tabela 40 ilustra os diferentes modos de rotura que ocorreram na geometria *step*. Comum a todas as condições de juntas *step*, com exceção a PTEG com 2015, verificou-se sempre a rotura coesiva do adesivo nas faces verticais de adesivo. A rotura da junta adesiva ocorre após a rotura das

camadas verticais. Devido a esta rotura prematura das faces verticais de adesivo, a camada adesiva central é a principal responsável pela resistência do carregamento e do devido modo de rotura. As roturas coesivas do adesivo ocorreram no centro ou nas extremidades da camada adesiva central. As roturas pelo aderente ocorreram por plastificação junto das extremidades da ligação. As juntas de PLA com 2015 romperam pelo aderente para os diferentes L_0 . Com 7752, para $L_0=5$ e 10 mm a rotura ocorreu no adesivo nas extremidades da camada central, enquanto para $L_0=20$ mm a rotura ocorreu pelo aderente. As roturas nas juntas ABS ocorreram de forma semelhante em ambos os adesivos. Para $L_0=5$ mm a rotura ocorreu de forma coesiva no adesivo e para $L_0=10$ e 20 mm a rotura surgiu nos aderentes. Nas juntas PETG com 7752 a rotura foi coesiva no adesivo com $L_0=5$ mm e no aderente com $L_0=10$ e 20 mm. As roturas das juntas com 2015 ocorreram nos aderentes para os diferentes L_0 . Contudo, as roturas com 2015 foram inconclusivas porque esperava-se a rotura adesiva das faces verticais o que não aconteceu.

Tabela 40 - Modos de rotura verificados no ABAQUS® para a geometria *step*

Modo de rotura	Exemplo	Descrição
Coesiva no adesivo		Rotura adesiva nas extremidades da ligação
Aderente		Rotura no aderente na zona de adesão, apenas verificada com PETG com 2015
		Rotura no aderente nas extremidades da ligação

Com a Tabela 41 é possível comparar os modos de rotura obtidos entre o estudo numérico experimental para as juntas *step*. As juntas com o aderente de PLA e o adesivo 2015 sofreram rotura, em ambas as componentes de estudo, rotura no aderente. Com o adesivo 7752 obteve-se os mesmos modos de rotura com exceção de $L_0=20$ mm, que de forma experimental a rotura ocorreu de forma coesiva no adesivo e numericamente ocorreu no aderente. Esta diferença poderá estar correlacionada com defeitos de fabrico da junta durante a aplicação do adesivo, ou fusões disformes nos aderentes de PLA. Com os aderentes de ABS e PETG verifica-se que quer com o adesivo 2015 e o 7752, para os diferentes L_0 , as roturas ocorrem sempre nos aderentes.

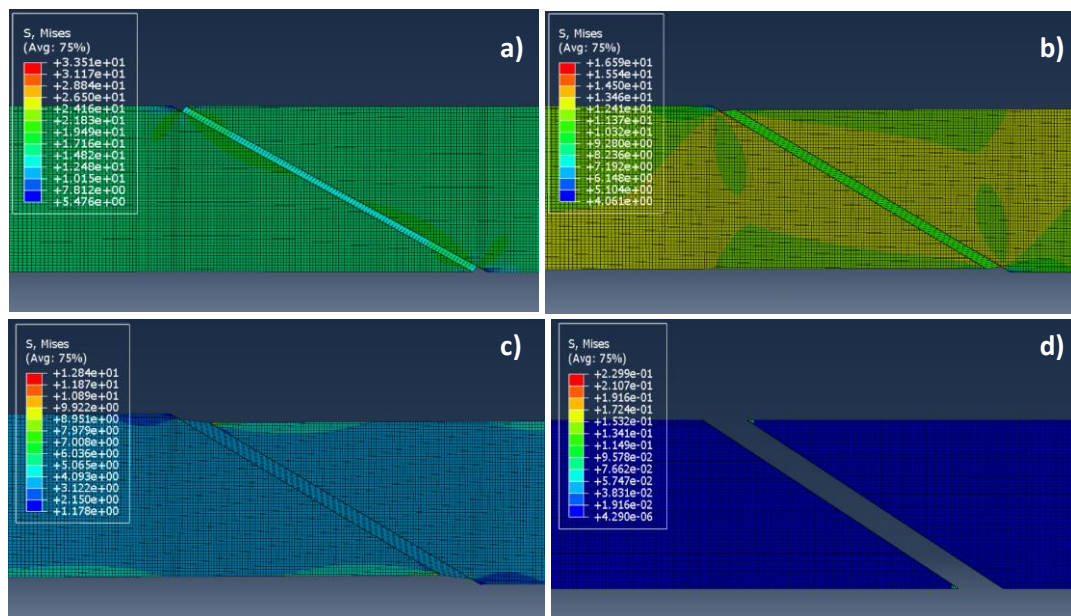
Tabela 41- Modos de rotura das juntas *step*: experimental vs. numérico

Adesivo	Lo [mm]	PLA		ABS		PETG	
Araldite® 2015	5	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad
	10	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad
	20	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad
Sikaforce® 7752	5	Co	Co	Ad	Ad	Ad	Ad
	10	Co	Co	Ad	Ad	Ad	Ad
	20	Co	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad
Componente de Estudo		EXP	NUM	EXP	NUM	EXP	NUM

Legenda: Ad = rotura no aderente; Co = rotura coesiva no adesivo; EXP = Experimental; NUM = Numérico

- Geometria *scarf*

A Figura 103 mostra a forma como evolui a zona de concentração de tensões nas juntas *scarf*. A ordem alfabética das diferentes imagens segue a ordem dos incrementos durante a simulação numérica. Na Figura 103 a), inicia-se o carregamento e verifica-se de imediato que nas extremidades da camada adesiva surge uma pequena concentração de tensões. Com a contínua aplicação de forças verifica-se o aumento da zona de concentração de tensões (Figura 104 b)). Nesta altura já se verifica a uma ligeira deformação da camada adesiva, com o seu alongamento. Como o caso em análise resultará uma rotura coesiva, na Figura 104 c) verifica-se um novo aumento do alongamento da camada adesiva e o aumento das zonas de concentração de tensões. Na Figura 104 d) verifica-se a rotura total do adesivo.

Figura 103 - Modo de propagação de dano juntas *scarf*: zona críticas de tensões

A Figura 104 apresenta a evolução de dano no adesivo nas juntas *scarf*. No início do carregamento (Figura 105 a)), verifica-se a presença de algum dano nas extremidades da camada adesiva. Com a contínua aplicação de forças, o dano vai se propagar para o centro da camada adesiva, como mostra a Figura 104 b). Nesta altura, dependendo do elemento mais resistente iria-se verificar a

plastificação do aderente, como é mostrado na Tabela 42, ou então a continua propagação da deformação do adesivo como mostra a Figura 104 c), acabando por resultar na rotura coesiva.

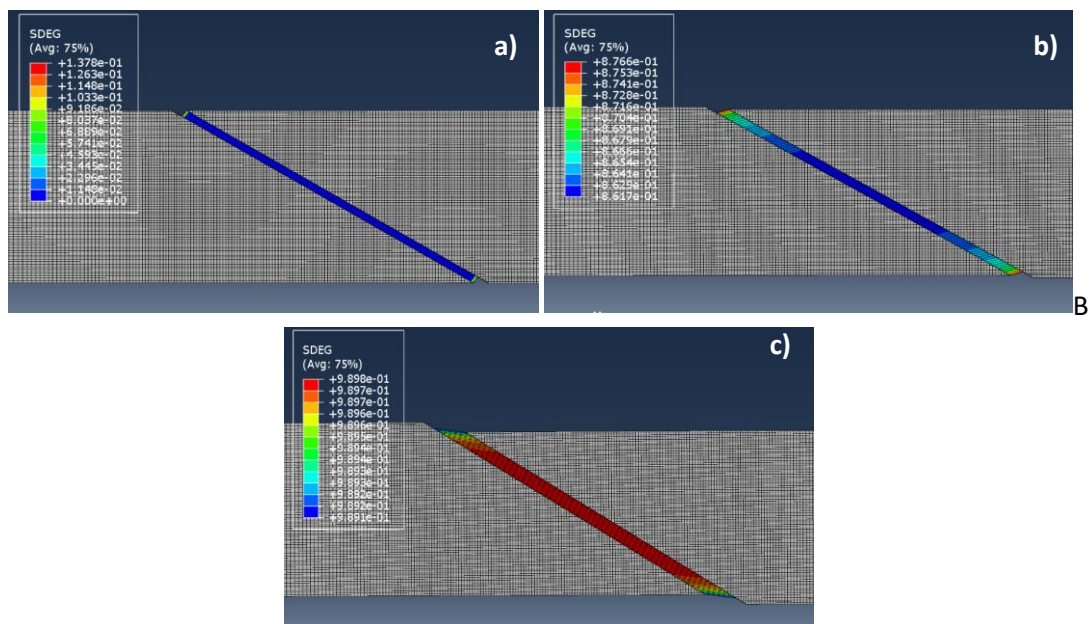
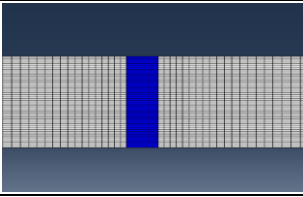
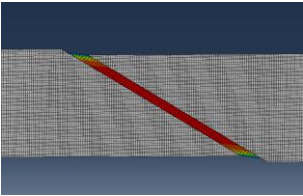
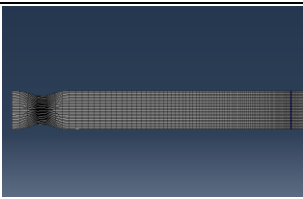
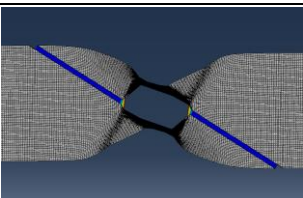


Figura 104 - Modo de propagação de dano juntas *scarf*: deformação do adesivo

A Tabela 42 mostra os diferentes modos de rotura verificados para as geometrias *scarf*. As roturas coesivas do adesivo na geometria *scarf* ocorreram essencialmente com $L_0=5$ mm, pois é nesta condição que há a menor área de adesivo exposta ao carregamento. As juntas de PLA com 2015 resultaram na rotura coesiva do adesivo com $L_0=5$ mm e roturas de aderente para os restantes L_0 . Com o 7752, as juntas PLA sofreram rotura coesiva do adesivo com $L_0=5$ e 10 mm e rotura no aderente para $L_0= 20$ mm. As juntas de ABS sofreram rotura coesiva no adesivo com 7752 para $L_0= 5$ mm, e roturas pelo aderente nos restantes L_0 para os dois adesivos. Relativamente ao PETG com o 2015 e $L_0= 5$ mm verificou-se uma rotura pelo aderente. Esta rotura surgiu de forma diferente quando comparada com as restantes roturas pelo aderente. Nesta condição, a rotura pelo aderente ocorre num local afastado da zona de ligação dos aderentes. Para $L_0= 10$ e 20 mm a rotura ocorre no aderente junto da zona adesiva. Para o 7752 com $L_0= 5$ mm a rotura deu-se de forma coesiva no adesivo e nos restantes L_0 ocorre no aderente.

Tabela 42 - Modos de rotura verificados no ABAQUS® para a geometria *scarf*

Modo de rotura	Exemplo	Descrição
Coesiva no adesivo		Rotura coesiva do adesivo
		Rotura coesiva do adesivo no centro da ligação
Aderente		Rotura do aderente na zona de adesão, apenas verificada para PETG com 2015 e $L_0 = 5$ mm
		Rotura do aderente no centro da junta

A Tabela 43 apresenta os modos de rotura obtidos de forma numérica e experimental para as juntas *scarf*. Com as juntas com aderentes de PLA apresentam modos de rotura semelhantes, com exceção da junta com o adesivo 7752 e $L_0 = 20$ mm, que experimentalmente resultou numa rotura coesiva adesiva e numericamente ocorre no aderente. A diferença de modos de rotura pode estar correlacionada com ligeiros defeitos no fabrico das juntas adesivas ou durante o ensaio de tração, a ocorrência de escorregamentos nas amarras. Com a visualização desta condição, na Tabela 27, verifica-se que das 4 juntas testadas, obteve-se uma rotura no aderente. Com o aderente de ABS, verifica-se que com $L_0 = 5$ mm com ambos adesivos, as roturas ocorrem de forma diferentes nas componentes em estudo. De forma numérica obteve-se rotura coesiva adesiva e de forma experimental a rotura surge no aderente. Contudo, nas roturas dos aderentes observou-se que esta surge na iminência da rotura coesiva. Devido às fusões não uniformes das camadas internas e externas de ABS, a rotura aderente ocorre entre estes dois tipos de camadas. Com o aderente de PETG, as roturas obtidas são semelhantes para as duas componentes de estudo.

Tabela 43 - Modos de rotura das juntas *scarf*: experimental vs. numérico

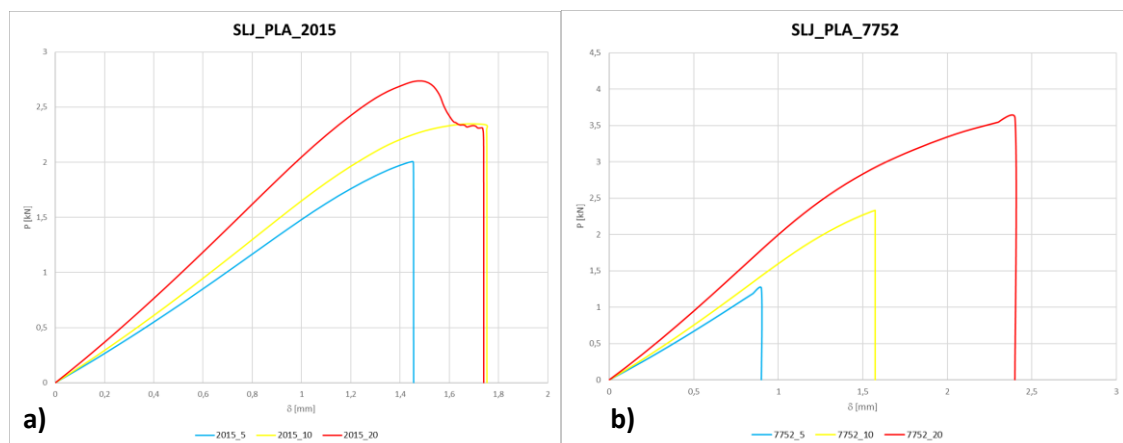
Adesivo	L_0 [mm]	PLA		ABS		PETG	
Araldite® 2015	5	Co	Co	Ad*	Co	Ad	Ad
	10	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad
	20	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad
Sikaforce® 7752	5	Co	Co	Ad*	Co	Co	Co
	10	Co	Co	Ad	Ad	Ad	Ad
	20	Co	Ad	Ad	Ad	Ad	Ad
Componente de Estudo		EXP	NUM	EXP	NUM	EXP	NUM

Legenda: Ad = rotura no aderente; Co = rotura coesiva no adesivo; EXP = Experimental; NUM = Numérico
 * Caso de ABS em que rotura foi iminente coesiva no adesivo, mas devido a infusões de camadas dos aderentes a rotura surge no aderente

3.4. Curvas $P-\delta$ e resistência das juntas

Seguidamente são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente através da previsão de resistência pelo MDC, para cada geometria, aderente e adesivo em função de L_0 . A evolução dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 também é analisado.

Em relação às SLJ, a Figura 105 a) e b) mostra as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para o aderente PLA e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, em função de L_0 . Verifica-se que as juntas apresentam um comportamento essencialmente elástico e que existe um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 . Para as SLJ com o adesivo 2015, registou-se um aumento percentual de 17,9% na resistência entre os $L_0=5$ e 10 mm, e um aumento de 16,52 % na capacidade de carga entre as juntas de $L_0=10$ e 20mm. Relativamente ao adesivo 7752, os aumentos percentuais nos mesmos intervalos de L_0 foram de 85,3 e 54,2 %. Com esta análise é perceptível uma diminuição percentual no aumento de capacidade de resistência das juntas com o aumento de L_0 . Este facto pode ser explicado pela distribuição de tensões ao longo da camada adesiva [46]. Entre os dois adesivos, perante os mesmos L_0 , verifica-se que o aumento de resistência do adesivo 2015 é inferior ao observado para o 7752, com o aumento de L_0 . Para $L_0=5$ mm, o adesivo 2015 tem uma resistência 59,2% superior ao 7752. Contudo para $L_0= 10$ mm a diferença cai para os 0,5%, e com $L_0=20$ mm há uma superioridade do adesivo 7752 em 31,6% superior ao adesivo 2015. Pode-se visualizar ainda na Figura 105 a) para os $L_0= 10$ e 20 mm uma ligeira plastificação no aderente.

Figura 105 - Curvas $P-\delta$ numéricas para as SLJ com aderente de PLA: a) 2015; b) 7752

A Figura 106 a) e b) apresenta as curvas P - δ obtidas numericamente para as SLJ com aderentes de ABS e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Verifica-se que com o aumento de L_0 provoca o aumento de $P_{m\acute{a}x}$. Tamb\em se verifica que o aumento de L_0 provoca um aumento de rigidez na zona el\asticas, para ambos adesivos. Previamente \a rotura, \e poss\ivel analisar grandes deslocamentos resultantes das plastifica\c\es dos aderentes ABS. Estas plastifica\c\es devem-se ao comportamento d\ucil do aderente ABS o que faz com que se deforme durante mais tempo antes de ocorrer a rotura. Com o aumento de L_0 este efeito diminui devido \a concentra\c\o de tens\es nas extremidades da liga\c\o aumentar e com tal resultar uma rotura com menor deslocamento. A plastifica\c\o que se observa na condi\c\o de $L_0=5$ mm com o adesivo 2015, n\ao ocorre com o 7752. Com $L_0=5$ mm, com adesivo 2015 a rotura surgiu no aderente e com o 7752 ocorre coesivamente no adesivo. Com $L_0=10$ e 20 mm, como o modo de rotura surge em ambos adesivos no aderente, verifica-se o mesmo tipo de comportamento: maiores deslocamentos com $L_0=10$ mm e maior $P_{m\acute{a}x}$ com $L_0=20$ mm. Com o adesivo 2015 e $L_0=20$ mm verifica-se uma ligeira plastifica\c\o do aderente, antes da sua rotura. Para o adesivo 2015, em termos percentuais, a resist\encia da junta aumenta 27,1% entre $L_0=5$ -10 mm e 22,1% entre $L_0=10$ - 20mm. Para o adesivo 7752, o aumento percentual da resist\encia em percentagem \e de 71,2 e 19,5% entre $L_0=5$ -10 mm e 10-20 mm, respetivamente. Tal como verificado nas SLJ com PLA, a superioridade de $P_{m\acute{a}x}$ do adesivo 2015 diminui com o aumento de L_0 . Em termos percentuais, h\aa uma superioridade do adesivo 2015 sobre o 7752 de 31,5% para $L_0= 5$ mm, enquanto para $L_0= 20$ mm o adesivo 7752 apresenta uma resist\encia superior de 0,2%.

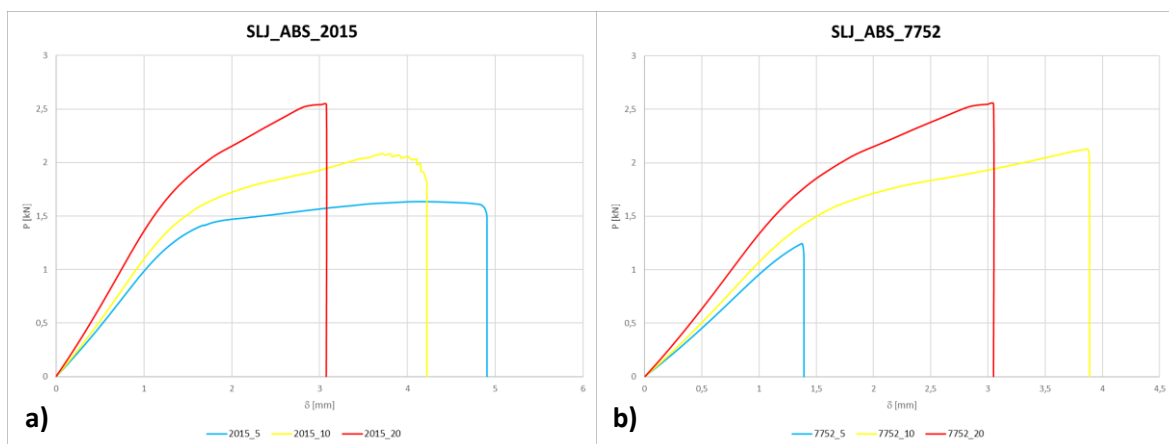


Figura 106 - Curvas P - δ num\ericas para as SLJ com ABS: a) 2015; b) 7752

A Figura 107 a) e b) apresenta as curvas P - δ obtidas numericamente para as SLJ com aderentes de PETG e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Tal como nos dois casos anteriormente apresentados, as SLJ com PETG tamb\em apresentam uma evolu\c\o de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 . Em algumas condi\c\es, graficamente, \e poss\ivel visualizar uma diminui\c\o da rigidez da zona el\asticas do carregamento antes de se obter $P_{m\acute{a}x}$ e plastifica\c\es dos aderentes. A justifica\c\o para este acontecimento \e semelhante \a anteriormente explicada com aderentes de ABS. A ductilidade do aderente PETG promove as largas plastifica\c\es antes da rotura no aderente e com o aumento de L_0 , as concentra\c\es de tens\es v\ao provocar roturas mais r\apidas, com menores deslocamentos. Para o adesivo 2015, o aumento percentual da resist\encia foi de 33,2 e 15,9% entre $L_0=5$ -10 mm e 10-20 mm, respetivamente. Para o 7752, os aumentos percentuais de resist\encia foram de 52,9 e 15,82% para os mesmos intervalos. De igual forma aos casos anteriormente apresentados, a SLJ com aderentes de PETG e o adesivo 2015 apresenta resist\encia

superior a 7752 em 14,6 % para $L_0=5$ mm, embora para os restantes L_0 a resistência seja superior no 7752, em 0,2 % para $L_0=10$ e 20 mm.

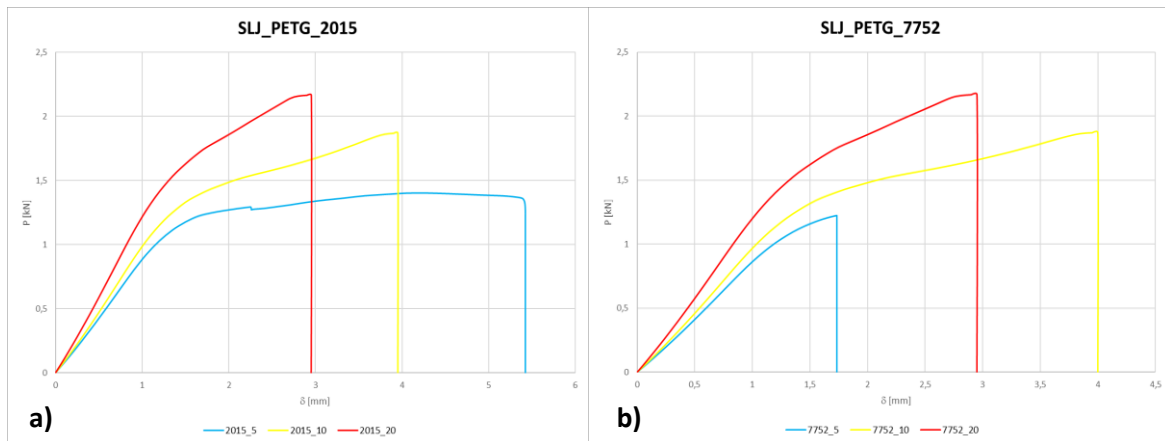


Figura 107 - Curvas $P-\delta$ numéricas para as SLJ com aderentes de PETG: a) 2015; b) 7752

A Figura 108 a) e b) apresenta as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas *step* com aderentes de PLA e o adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Com o adesivo 2015, verifica-se que a junta se comportou de modo perfeitamente elástico, sendo a diferença da força máxima muito reduzida para os diferentes L_0 . Este acontecimento deve-se ao facto de as roturas ocorrerem sempre pelo aderente. Com adesivo 7752, verifica-se que, para $L_0=10$ e 20 mm surge uma quebra na força durante o regime elástico, resultado da rotura prematura das faces verticais de adesivo. Devido à rotura ser coesiva no adesivo, observa-se uma evolução de $P_{máx.}$, com o aumento de L_0 . O aumento percentual verificado no adesivo 2015 foi de 0,41 e de 0,6% entre os $L_0=5-10$ mm e 10-20 mm, respetivamente. Para o adesivo 7752, entre os mesmos intervalos, o aumento percentual foi de 6,7 e 17,7%. Entre o adesivo 2015 e 7752, o 2015 apresentou uma resistência superior ao carregamento para todos os L_0 , que, porém, diminui com o aumento de L_0 . A superioridade de resistência do 2015 em relação ao 7752 inicia-se em 49,4% para $L_0=5$ mm, para $L_0=10$ mm desce para os 40,5% e 20,1% para $L_0=20$ mm.

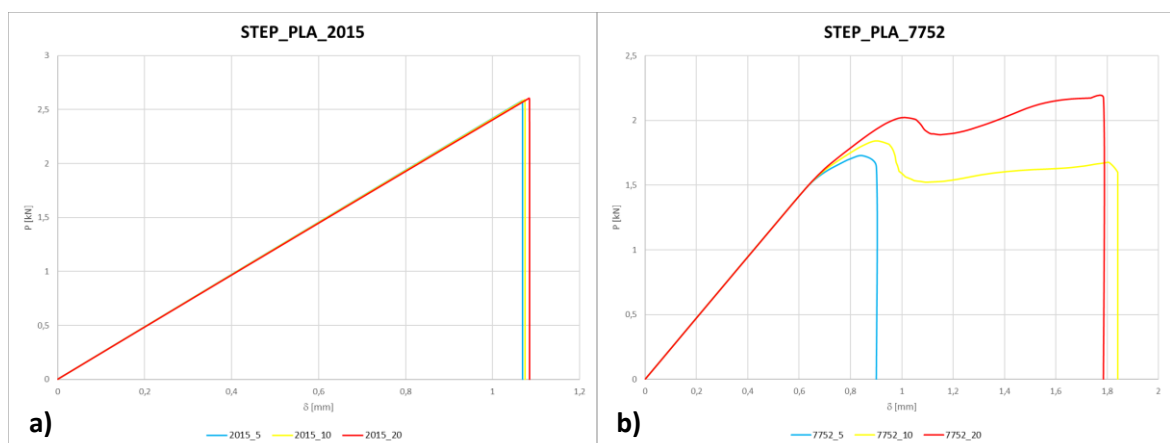


Figura 108 - Curvas $P-\delta$ numéricas para as juntas *step* com aderentes de PLA: a) 2015; b) 7752

A Figura 109 a) e b) apresenta as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas *step* com os aderentes de ABS e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Como mencionado anteriormente, as roturas das juntas *step* com ABS ocorrem pelo aderente. As simulações numéricas com ABS e o adesivo 2015 resultaram em curvas perfeitamente elásticas até à rotura,

tal como com o adesivo 7752, com a ligeira diferença de que no 7752 a evolução de $P_{máx.}$ é mais notória. A evolução de $P_{máx.}$ com o adesivo 2015 resultou numa diferença percentual de 0,44 e 0,45% entre os intervalos de $L_0 = 5-10$ mm e 10-20 mm, respetivamente. No caso de 7752, a diferença percentual foi ligeiramente superior, obtendo-se diferenças de 3,2 e 5,1% para os intervalos de $L_0 = 5-10$ mm e 10-20 mm, respetivamente. Entre os adesivos, para o mesmo L_0 verifica-se uma superioridade do adesivo 2015 na resistência ao carregamento sobre o adesivo 7752. Em termos percentuais, as diferenças resultam em 70,7, 66,2 e 58,9% para $L_0 = 5, 10$ e 20 mm, respetivamente. De notar que a diferença de superioridade do adesivo diminuí com o aumento de L_0 .

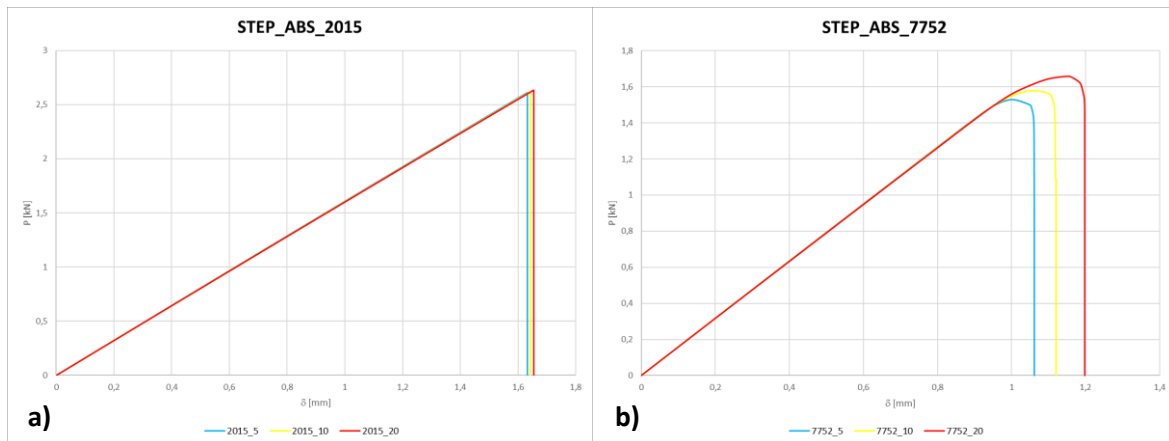


Figura 109 - Curvas P - δ numéricas para as juntas *step* com aderentes de ABS: a) 2015; b) 7752

A Figura 110 a) e b) apresenta as curvas P - δ obtidas numericamente para as juntas *step* com os aderentes de PETG e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, em função de L_0 . Tal como para as juntas *step* com ABS, as juntas com PETG resultaram em roturas pelo aderente. Com ambos os adesivos, verifica-se um comportamento elástico com uma evolução de $P_{máx.}$, visível apenas para as juntas com o adesivo 7752, devido a deformações nos aderentes. Estas deformações, que provocam o aumento do deslocamento, resultam na rotura dos aderentes. As diferenças percentuais foram de 2,93 e 3,11 % para os intervalos de $L_0 = 5-10$ mm e 10-20 mm, respetivamente. Apesar de o adesivo 2015 não apresentar aumento da capacidade de resistência, este adesivo manteve uma resistência superior ao adesivo 7752, embora diminuindo com o aumento de L_0 . A superioridade do adesivo 2015, em termos percentuais, foi de 60,9% com $L_0 = 5$ mm, para 56,3% com $L_0 = 10$ mm e 51,7% para $L_0 = 20$ mm.

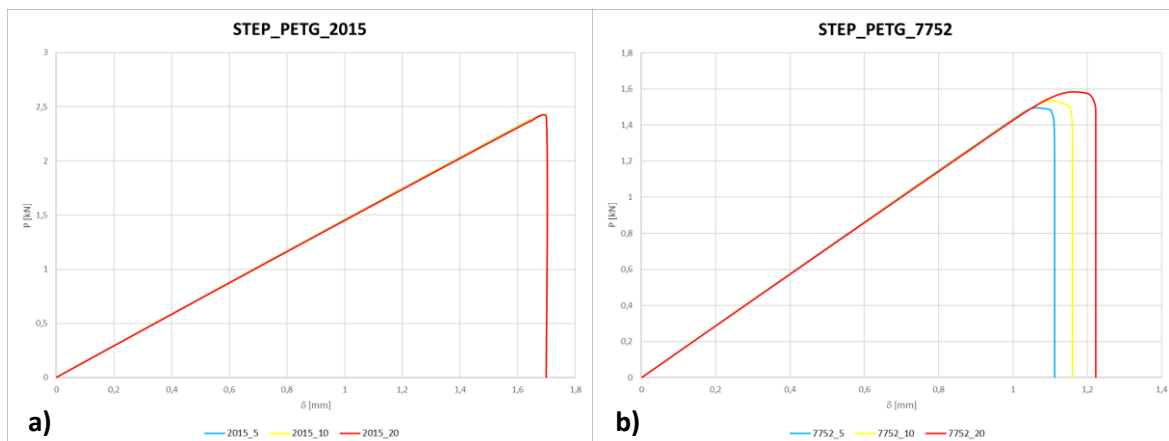


Figura 110 - Curvas P - δ numéricas para as juntas *step* com aderentes de PETG: a) 2015; b) 7752

A Figura 110 a) e b) apresenta as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para estas as juntas *scarf* com aderente de PLA e os adesivos 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Em ambos adesivos se verifica uma evolução de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 e um comportamento predominantemente elástico até à rotura. Com o adesivo 2015 e $L_0=20$ mm, antes da rotura, existe uma redução de rigidez. Esta redução deve-se à plastificação dos aderentes, que mais tarde provocam a sua própria rotura. Em termos percentuais, a evolução de $P_{m\acute{a}x}$ entre os $L_0=5-10$ mm e $10-20$ mm foi de 62,6 e 0,3%, respetivamente. A queda brusca de evolução destes valores, deve-se aos modos de rotura verificados. Entre $L_0=5$ e 10 mm, verificaram-se diferentes modos de rotura, designadamente rotura coesiva no adesivo para $L_0=5$ mm e rotura no aderente com $L_0=10$ mm. Da mesma forma se justifica a pequena diferença percentual entre $L_0=10$ e 20 mm, consequência do mesmo modo de rotura. Para as juntas *scarf* com o 7752, as diferenças percentuais foram 81,1 e 69,9% entre $L_0=5-10$ mm e $10-20$ mm, respetivamente. Neste caso, existe uma maior diferença percentual porque nos $L_0=5$ e 10 mm verifica-se rotura coesiva no adesivo e no maior L_0 rotura pelo aderente. Entre os dois adesivos, o 2015 apresenta superioridade de resistência de junta face ao 7752, embora esta diminua com o aumento de L_0 . Em termos percentuais, o adesivo 2015 é superior ao 7752 em 88,6% para $L_0=5$ mm, 69,4% para $L_0=10$ mm e 0,2% para $L_0=20$ mm.

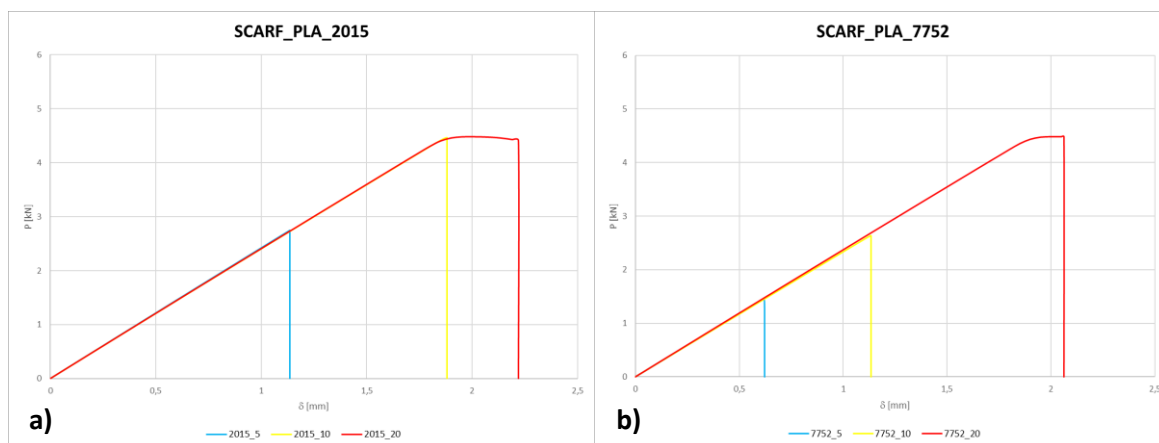


Figura 111 - Curvas $P-\delta$ numéricas para as juntas *scarf* com aderentes de PLA: a) 2015; b) 7752

A Figura 112 a) e b) apresenta as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas *scarf* com aderentes de ABS e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . Para os diferentes adesivos se verifica um comportamento elástico até à rotura com exceção dos casos de $L_0=20$ mm. Verifica-se um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 . Com o adesivo 2015, $P_{m\acute{a}x}$ não varia de forma notória como no caso do 7752, devido aos diferentes modos de rotura verificados para os diferentes L_0 . Percentualmente, as juntas com adesivo 2015 apresenta um aumento de resistência de 1,4 e 1,0% entre $L_0=5-10$ mm e $10-20$ mm, respetivamente, enquanto as juntas com o 7752 demonstram um aumento de resistência de 80,5 e 6,8% para os mesmos intervalos de L_0 . O adesivo 2015 apresenta uma resistência 88,3, 5,7% superior ao adesivo 7752, para $L_0=5$ e 10 mm. Para $L_0=20$ mm, os dois adesivos apresentaram o mesmo $P_{m\acute{a}x}$ devido ao mesmo modo de rotura.

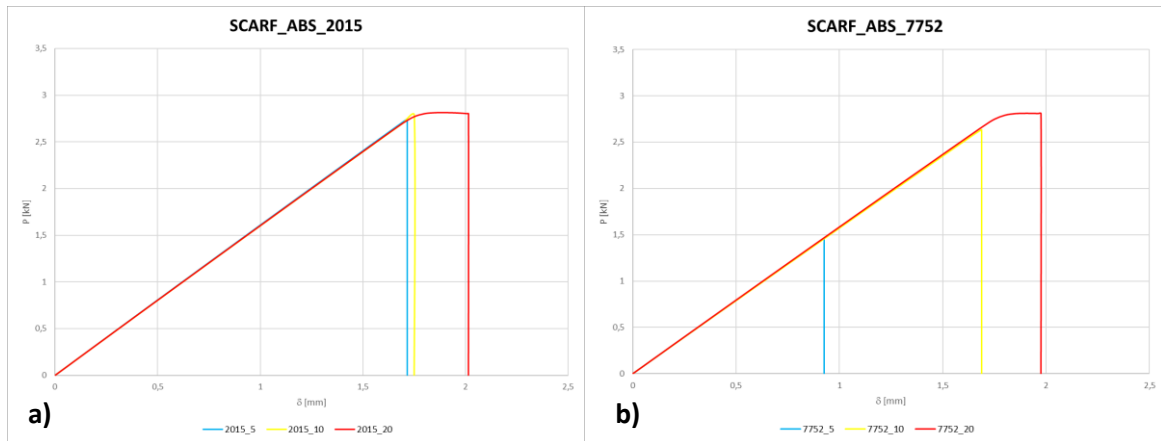


Figura 112 - Curvas P - δ numéricas para as juntas *scarf* com aderentes de ABS: a) 2015; b) 7752

A Figura 113 a) e b) apresenta as curvas P - δ obtidas numericamente para as juntas *scarf* com aderente PETG e adesivo 2015 e 7752, respetivamente, para os diferentes L_0 . As juntas com o adesivo 2015 não mostram variação de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 , facto associado às roturas verificadas nos aderentes. Contudo, as juntas com 7752 mostram um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 entre $L_0 = 5$ -10 mm. Para $L_0=10$ e 20 mm o aumento não se verificou. Estas diferenças podem estar associadas às roturas verificadas: rotura coesiva no adesivo para $L_0=5$ mm e rotura nos aderentes com $L_0=10$ e 20 mm. Em termos percentuais, as juntas com o 2015, demonstram resultados anormais em comparação com o 7752 e as restantes juntas verificadas numericamente. Esta condição foi a única em que as simulações numéricas forneceram $P_{m\acute{a}x}$ superiores para $L_0=5$ mm do que 10 e 20 mm, tal como $L_0= 10$ mm superior a 20mm. Este acontecimento pode estar correlacionado com a alteração de esforço que se verifica com o aumento da inclinação, α , e as propriedades do aderente PETG. Com o aumento de α , o esforço de arrancamento a que a junta está sujeita é transformado, de forma parcial, em esforço de corte. Este acontecimento pode indicar que o PETG é mais resistente ao esforço de arrancamento do que ao esforço de corte. Relativamente às juntas com 7752, verifica-se um aumento percentual de resistência de 65,3 e 0,4% entre $L_0=5$ -10 mm e 10-20 mm, respetivamente. Entre os dois adesivos, o 2015 apresenta melhor resistência do que o 7752 em 70,9% para $L_0 = 5$ mm, a resistência é semelhante entre os dois adesivos para os restantes L_0 .

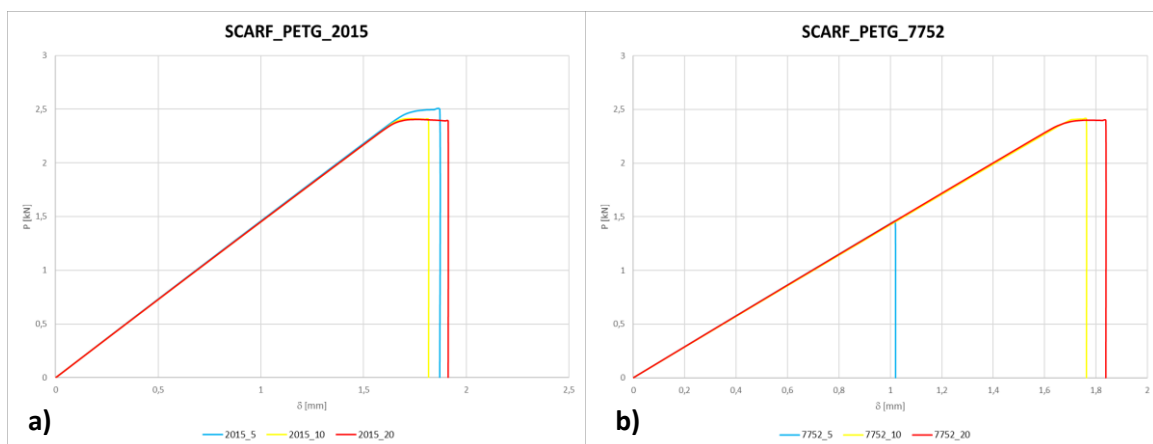


Figura 113 - Curvas P - δ numéricas para as juntas *scarf* com aderentes de PETG: a) 2015; b) 7752

Através da análise das curvas P - δ anteriormente apresentadas, verifica-se que as juntas que atingiram valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores são as juntas *scarf*. Destas juntas, a condição com o aderente

de PLA e o adesivo 2015 foi a que apresentou maior resistência de junta. De forma oposta, a junta *step* com o aderente de PETG e o adesivo 7752, foi a junta que apresentou menor resistência. Globalmente, entre as diferentes geometrias em estudo, a geometria *scarf* apresentou as maiores resistências de junta. Seguidamente surgem as juntas *step*, porém não se verificou grande evolução da resistência. Por fim, as SLJ apresentam as resistências inferiores, mas ao contrário das juntas *step*, as SLJ apresentam aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento da camada adesiva.

Com as SLJ verificou-se que de forma geral, o aumento de L_0 provoca um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ independentemente do adesivo utilizado. Com o aderente de PLA, devido às roturas, obtidas numericamente, ocorrerem sempre no adesivo verifica-se que o aumento de L_0 , além de provocar o aumento de $P_{m\acute{a}x}$, também provoca um aumento do deslocamento da rotura. Este acontecimento não se verifica quando as roturas são predominantemente nos aderentes, como ocorreu com os aderentes de ABS e PETG. Com estes dois materiais, devido às roturas no aderente, com o aumento de L_0 , o deslocamento de rotura diminui, como é visível na Figura 106 e Figura 107. Esta diminuição dos deslocamentos está correlacionada com o esforço de corte a qual as juntas estão sujeitas. O esforço de corte aumenta com o L_0 , o que faz aumentar a zona de concentração de tensões nas extremidades da ligação adesiva, provocando roturas do aderente mais cedo. Entre os adesivos 2015 e 7752, verifica-se que para L_0 inferiores, as juntas com adesivo 2015 apresentam maior resistência. O aumento de L_0 faz com que a resistência do adesivo 7752 aumente de forma mais intensiva do que o adesivo 2015, promovendo a superioridade de resistência de juntas com 7752 e L_0 superiores. Entre os materiais de aderente, verifica-se em todas as condições que as juntas com aderentes de PLA apresentam maior resistência, seguido do aderente ABS e PETG.

Com as juntas *step* verifica-se que, quando o modo de rotura ocorre no aderente, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ são bastante próximos para os diferentes L_0 . Esta proximidade deve-se à rotura dos aderentes na zona de transição de degraus de 2,4 mm e 5 mm. Esta zona é onde ocorre a concentração de tensões durante o carregamento. As faces de adesivo perpendiculares ao carregamento sujeitas unicamente ao esforço de arrancamento, provocam o aumento de tensões nesta zona. Quando surge a rotura coesiva adesiva de forma total nestas faces, de imediato surge a rotura do aderente devido a esta zona ultrapassar a resistência do aderente. Com o adesivo 2015, para os diferentes aderentes, não se verifica diferenças de $P_{m\acute{a}x}$ devido às roturas nos aderentes na zona de transição. Com o adesivo 7752 e aderente de PLA, como as roturas surgem no adesivo para $L_0=5$ e 10 mm e no aderente com $L_0=20$ mm verifica-se um aumento de $P_{m\acute{a}x}$. Para os aderentes de ABS e PETG, como o adesivo é menos rígido do que o adesivo 2015, é possível verificar aumentos de $P_{m\acute{a}x}$ apesar das roturas surgirem no aderente. Entre os dois adesivos, as juntas com 2015 apresentaram maior resistência.

Com as juntas *scarf* verifica-se um fenómeno semelhante ao observado nas juntas *step*. Quando as roturas surgem nos aderentes, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ são bastante próximos e quando no adesivo, o aumento de L_0 provoca o aumento de $P_{m\acute{a}x}$. Com o adesivo 2015, verifica-se que as juntas com o aderente PLA apresentam maior resistência que os outros aderentes para os diferentes L_0 . Da mesma forma se sucede com o adesivo 7752. Com o adesivo 7752, entre $L_0=5-10$ mm verifica-se um grande aumento de $P_{m\acute{a}x}$. Este aumento resulta da alteração do esforço predominante no carregamento. Com o aumento de L_0 , o esforço de arrancamento transforma-se parcialmente em esforço de corte, permitindo à junta adesiva aumentar a sua resistência, como ocorre nas SLJ. Entre os adesivos em estudo, o adesivo 2015 apresenta maior resistência para L_0 inferiores e com o

aumento da camada adesiva, as resistências das juntas são bastante próximas, devido às roturas no aderente.

3.5. Rigidez máximas das juntas

De seguida é apresentada a rigidez máxima obtida numericamente, calculada pela equação (5). A rigidez máxima corresponde ao início do carregamento. Nesta fase, para um determinado intervalo de valores, a variação de forças é mais elevada para os respetivos deslocamentos inferiores. A Figura 114 mostra como varia a rigidez para as SLJ, com os aderentes de PLA, ABS e PETG. Verifica-se que, para os diferentes aderentes e adesivos, há um aumento de rigidez com o aumento de L_0 .

- Nas juntas com aderente de PLA com o adesivo 2015 a rigidez da junta aumentou 11,9% entre $L_0=5-10$ mm e 23,1% entre $L_0=10-20$ mm. Com o adesivo 7752, os aumentos percentuais foram bastante semelhantes em comparação com o adesivo 2015, 15,5% entre $L_0=5-10$ mm e 24,1% entre $L_0=10-20$ mm. Entre os dois adesivos, as juntas com adesivo 2015 apresentaram sempre maior rigidez. Para $L_0=5$ mm, o adesivo 2015 foi 6,7% superior ao 7752, mas com o aumento de L_0 a diferença percentual diminui para 3,3% com $L_0=10$ mm e 2,5% com $L_0=20$ mm;
- As juntas com os aderentes de ABS e o adesivo 2015 apresentaram maior rigidez do que com adesivo 7752 para os diferentes L_0 . Com o adesivo 2015, o aumento de L_0 permitiu aumentar a rigidez. Entre $L_0=5-10$ mm verificou-se um aumento de 12,2% e entre $L_0=10-20$ mm o aumento foi de 22,6%. Com o adesivo 7752, para os mesmos intervalos, os aumentos percentuais de rigidez foram de 12,9% e 23,7%, respetivamente. Entre os dois adesivos, o aumento de L_0 faz com que a rigidez das juntas com 7752 se aproximem à rigidez das juntas com 2015. Com $L_0=5$ mm, o adesivo 2015 é 2,9% mais rígido comparativamente ao 7752. Com $L_0=10$ mm a percentagem diminui para 2,2%, e para 1,4% com $L_0=20$ mm;
- Nas juntas com aderente de PETG, o aumento de L_0 também permite aumentar a rigidez. Com o adesivo 2015, a rigidez aumentou 12,7 e 21,6% entre $L_0=5-10$ mm e 10-20 mm, respetivamente. Com 7752, o aumento foi de 12,6% entre $L_0=5-10$ mm e 23,7% entre $L_0=10-20$ mm, também com este tipo de aderente se verificou que o aumento de L_0 faz com que a rigidez das juntas com o adesivo 7752 se aproxime da rigidez das juntas com 2015. Para $L_0=5$ mm, o adesivo 2015 apresentou 1,6% de rigidez superior ao 7752. Com $L_0=10$ mm, surge uma ligeira subida de 1,7%, e com $L_0=20$ mm, a rigidez é semelhante para os dois adesivos.

Para os diferentes aderentes verifica-se que o aumento de L_0 faz com que a rigidez das juntas com o 7752 se aproxime daquelas das juntas com o 2015. Este fenómeno deve-se à flexibilidade do adesivo 7752, que com o aumento de L_0 permite, num determinado intervalo de valores, obter intervalos de força superiores com o mesmo intervalo de deslocamentos. A rigidez máxima é obtida com a junta de PLA e adesivo 2015.



Figura 114 - Valores de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria SLJ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo

A Figura 115 mostra a evolução da rigidez das juntas *step* com o aumento de L_0 para os diferentes aderentes. Em termos percentuais, as variações de $k_{m\acute{a}x}$ não ultrapassam os 0,5% entre os $L_0=5-10$ mm e 10-20mm, para os diferentes aderentes e adesivos. Esta pequena variação deve-se ao facto de o início das curvas $P-\delta$ ser idêntico para os diferentes L_0 , como mostra Figura 108, Figura 109 e Figura 110. A semelhança do início das curvas $P-\delta$ ao esforço de arrancamento a qual as juntas estão sujeitas. Este esforço surge devido à presença das faces verticais de adesivo. Entre os adesivos 2015 e 7752, as diferenças de $E_{m\acute{a}x}$ também são muito pequenas.

- Com o PLA, o adesivo 2015 apresenta mais $k_{m\acute{a}x}$ que o 7752 em 2,5% para os diferentes L_0 .
- Com o ABS, a superioridade do adesivo 2015 é de 1,7% para os diferentes L_0 e com PETG a diferença diminui para os 1,6%.

Estas baixas variações de $k_{m\acute{a}x}$ devem-se à presença de faces de adesivo perpendiculares ao carregamento. Com o aumento de L_0 , estas faces não aumentam o seu comprimento, pelo que a sua influência é sempre a mesma apesar de haver uma camada adesiva central maior. O esforço a que a junta está sujeita até à rotura é sempre de corte, pois apenas após a rotura destas camadas verticais é que a camada central de adesivo atua sobre a junta adesiva.

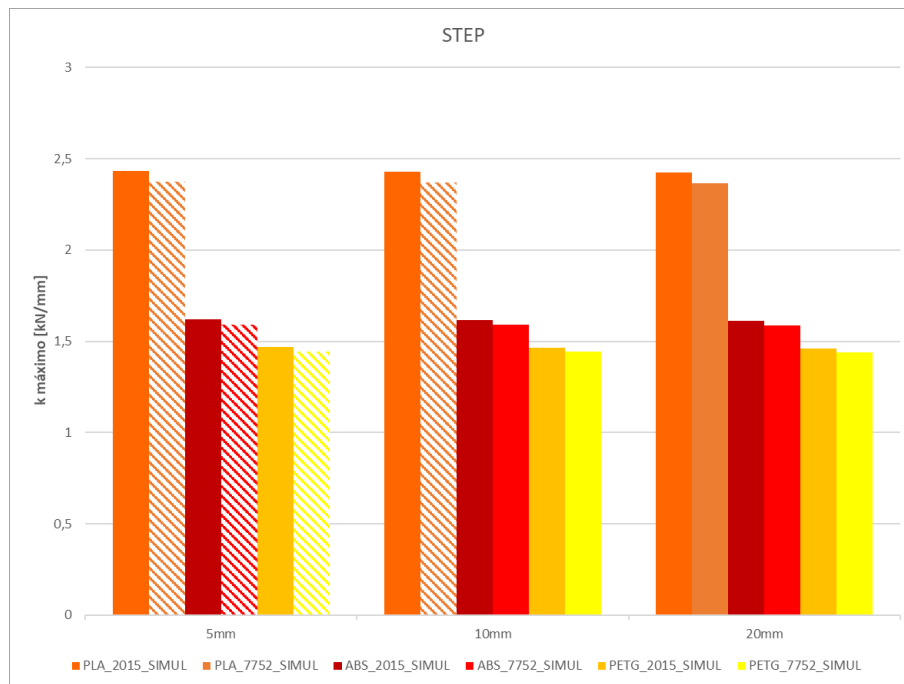


Figura 115 - Valores de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_o por adesivo e aderente para a geometria *step*; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no adesivo

Acerca da rigidez das juntas *scarf*, a Figura 116 representa a evolução da rigidez para os diferentes aderentes, nomeadamente PLA, ABS e PETG. Neste tipo de junta, verifica-se um fenómeno semelhante às juntas *step*: variações de rigidez muito baixas para os diferentes adesivos e aderentes. Contudo, ao invés de a rigidez diminuir continuamente, nas juntas *scarf* verificou-se que ocorre uma diminuição de rigidez entre $L_o=5-10$ mm, enquanto entre $L_o=10-20$ mm ocorre um ligeiro aumento da rigidez. Estas variações não ultrapassam os 0,5% entre os diferentes L_o , pelo que se poderão considerar insignificantes. Entre adesivos, verificou-se que as juntas com o adesivo 2015 apresentam mais rigidez do que com o adesivo 7752.

- Nas juntas de PLA, o 2015 apresentou rigidez superior em 2,9% ao 7752 para $L_o=5$ e 10 mm. Com $L_o=20$ mm, o adesivo 2015 foi superior em 2,0%;
- Nas juntas de ABS, o 2015 superou o 7752 em 1,9% para $L_o=5$ e 10 mm e em 1,5% com $L_o=20$ mm;
- Nas juntas com PETG, as diferenças entre os adesivos reduziram para 1,7% com $L_o=5$ e 10 mm, e 1,0% para $L_o=20$ mm.

A magnitude reduzida destas variações deve-se à presença continua de um esforço de arrancamento. Este esforço é o principal responsável pela rigidez no início das curvas $P-\delta$. Com $L_o=5$ mm, a junta está sujeita unicamente ao esforço de arrancamento, mas o aumento de L_o faz que este esforço se transforme parcialmente em esforço de corte. Tal como nas SLJ, com o aumento de L_o , aumenta o esforço de corte e a rigidez. Nas juntas *scarf*, o aumento de L_o também aumenta o esforço de corte, porém não de forma tão intensa devido à inclinação das faces de adesivo que vão sempre apresentar uma componente do esforço de arrancamento.

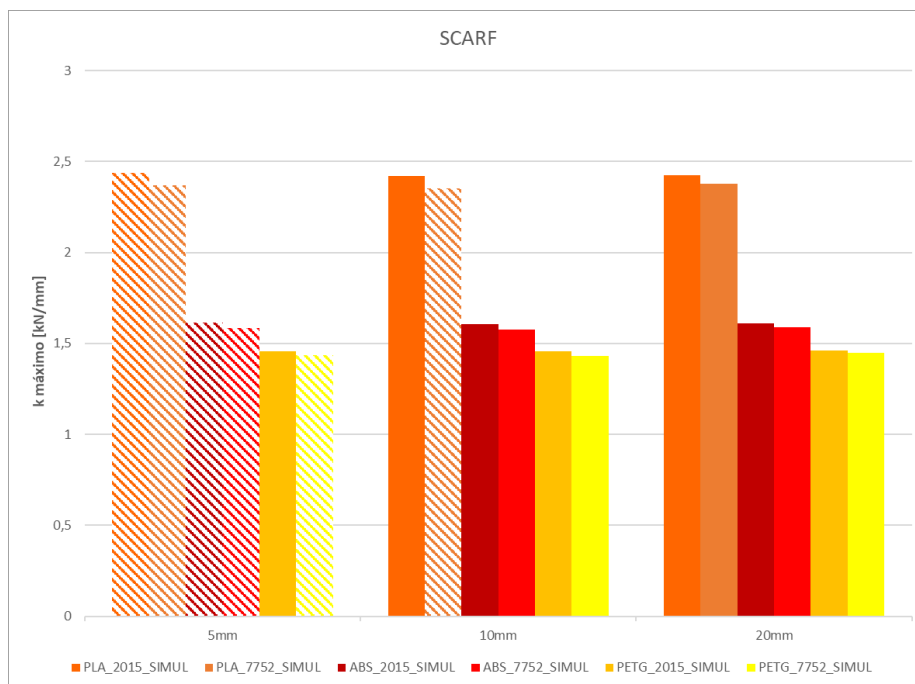


Figura 116 - Valores de $k_{m\acute{a}x}$ [kN/mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para a geometria scarf; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura coesiva no adesivo

3.6. Energia de rotura

De seguida são apresentadas $E_{m\acute{a}x}$ obtidas numericamente. $E_{m\acute{a}x}$ é obtida pelo cálculo da área das curvas $P-\delta$ obtidas numericamente. A Figura 117 mostra a evolução de $E_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 para as SLJ fabricadas com os aderentes, designadamente PLA, ABS e PETG:

- Nas juntas com PLA, verifica-se o aumento de $E_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 , para os diferentes adesivos. Com o adesivo 2015, verifica-se um aumento percentual de 57,9 e 18,0% entre os $L_0=5-10$ mm e $10-20$ mm, respetivamente. Com o adesivo 7752 os aumentos percentuais são bastante superiores de 260,6% entre $L_0=5-10$ mm e 165,3% entre $L_0=10-20$ mm. Estes aumentos elevados devem-se ao aumento contínuo de $P_{m\acute{a}x}$ e dos deslocamentos de rotura, com o aumento de L_0 . Entre adesivos, para $L_0=5$ mm o adesivo 2015 apresenta $E_{m\acute{a}x}$ superior ao 7752 em 185,1%. Esta percentagem diminui para 24,8% para $L_0=10$ mm, e para $L_0=20$ mm, a $E_{m\acute{a}x}$ com o 7752 supera o 2015 em 80,1%. Esta troca de superioridade de $E_{m\acute{a}x}$ deve-se à maior flexibilidade do adesivo 7752, que lhe permite obter $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamentos mais elevados do que o 2015.;
- Ao contrário das juntas com os aderentes de PLA, nas juntas com os aderentes de ABS e PETG o aumento de L_0 provoca uma diminuição de $E_{m\acute{a}x}$. Esta diminuição deve-se às roturas coesivas com $L_0=5$ mm e roturas no aderente com $L_0=10$ e 20 mm, e às curvas $P-\delta$ resultantes. Na Figura 106 e Figura 107 verifica-se que, para $L_0=5$ mm existe uma grande plastificação dos aderentes, que provoca um deslocamento de rotura muito elevado. Com $L_0=10$ mm verifica-se que o deslocamento de rotura diminui e a $P_{m\acute{a}x}$ aumenta. Contudo, estas variações não são capazes de ultrapassar $E_{m\acute{a}x}$ de $L_0=5$ mm. O mesmo se sucede entre $L_0=10-20$ mm.

- Nas juntas com aderente ABS verifica-se uma diminuição de $E_{m\acute{a}x}$ de 1,3% entre $L_0=5-10$ mm e 25,2% entre $L_0=10-20$ mm. Com o adesivo 7752, entre $L_0=5-10$ mm ocorre um aumento de $E_{m\acute{a}x}$ de 540% devido às diferentes roturas observadas com em função de L_0 . Entre $L_0=10-20$ mm, como a rotura ocorre de igual modo verifica-se uma diminuição de $E_{m\acute{a}x}$ de 13,6%. Comparando os dois adesivos, o adesivo 2015 apresenta mais $E_{m\acute{a}x}$ comparativamente ao 7752 para os diferentes L_0 : 628,8, 12,4 e 2,0% para $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente. A diferença abismal de 628,8% deve-se ao diferente modo de rotura, isto é, com $L_0=5$ mm, na junta com adesivo 2015 a rotura surge no aderente e com o 7752 a rotura é coesiva adesiva. A rotura no aderente permitiu obter $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamentos de rotura superiores devido à plastificação dos aderentes.
- Nas juntas PETG o comportamento de $E_{m\acute{a}x}$ é semelhante ao observado com ABS. Nas juntas com o 2015, entre $L_0=5-10$ mm registou-se uma diminuição de 22,4% e entre $L_0=10-20$ mm de 22,6%. Com o adesivo 7752, entre $L_0=5-10$ mm $E_{m\acute{a}x}$ aumenta 328,1%, enquanto entre $L_0=10-20$ mm diminui 24,8%. Entre adesivos para as juntas com PTEG, para $L_0=5$ mm, o adesivo 2015 apresenta $E_{m\acute{a}x}$ 417,2% superior ao 7752, enquanto para $L_0=10$ mm, a ordem inverte-se, o 7752 regista um valor 1,3% superior. Com $L_0=20$ mm, $E_{m\acute{a}x}$ obtido é semelhante, nomeadamente 0,5% de diferença com superioridade do 2015.

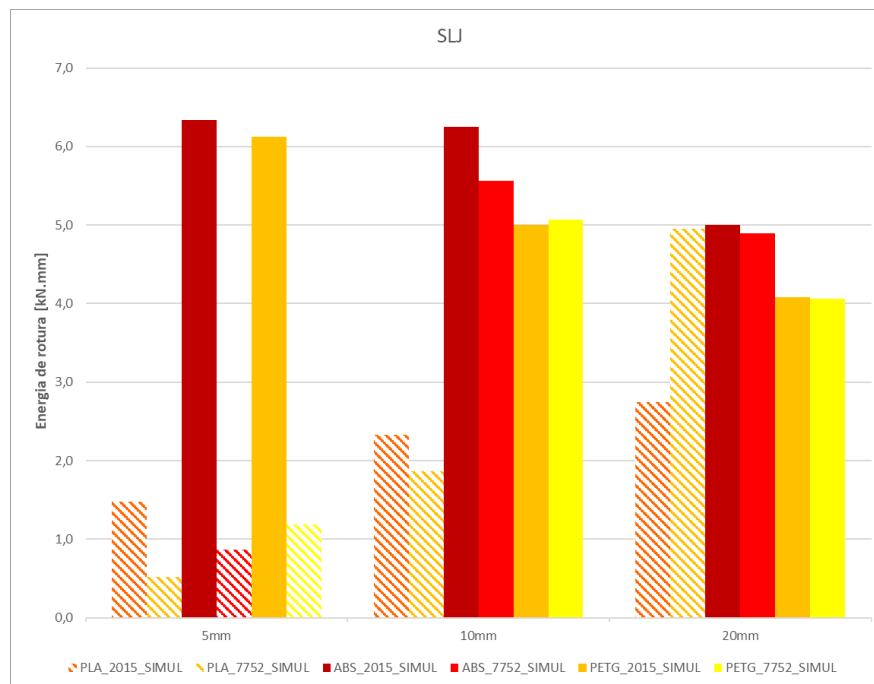


Figura 117 - Valores de $E_{m\acute{a}x}$ [kN.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para as SLJ; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no adesivo

A Figura 118 apresenta a evolução de $E_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 para as juntas *step* e para os aderentes de PLA, ABS e PETG. Para as juntas com o adesivo 2015 para e todos os aderentes, devido aos modos de rotura surgirem nos aderentes, as variações de $E_{m\acute{a}x}$ são muito pequenas. Pela visualização da Figura 108 a), Figura 109 a) e Figura 110 a) verifica-se que os $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamentos obtidos são semelhantes em cada material aderente, pelo que $E_{m\acute{a}x}$ não varia de forma significativa. A maior diferença percentual verificada foi de 1,6% com o PLA entre $L_0=10-20$ mm.

- Com o adesivo 7752 e aderente de PLA verifica-se que o aumento de L_0 provoca aumentos elevados de $E_{máx}$. Como nestas juntas as roturas ocorreram de forma coesiva no adesivo, quer $P_{máx}$ quer os deslocamentos aumentaram com o L_0 . As diferenças percentuais verificadas foram de 175,3 e 11,4% entre $L_0=5-10$ mm e 10-20mm, respetivamente. Entre os adesivos 2015 e 7752, com $L_0=5$ mm, o adesivo 2015 apresenta um $E_{máx}$ superior em 51,4% relativamente ao 7752. Contudo, para $L_0=10$ e 20 mm, o 7752 apresentou mais $E_{máx}$ em 79,9 e 97,4%, respetivamente.
- Com o adesivo 7752 e aderente de ABS, o aumento de $E_{máx}$ é de 10,9 e 14,0% entre $L_0=5-10$ mm e 10-20 mm, respetivamente. Entre os adesivos 2015 e 7752, o adesivo 2015 apresenta $E_{máx}$ superior em todos os L_0 . Contudo, com o aumento de L_0 , a superioridade do 2015 neste campo diminui. Com $L_0=5$ mm, o 2015 é superior em 145,6%; com $L_0=10$ mm a superioridade diminui para 123,8%, e com $L_0=20$ mm para os 98,9%.
- Com o adesivo 7752 e aderentes de PETG o aumento de $E_{máx}$ foi de 8,6 e 10,9% entre $L_0=5-10$ mm e 10-20 mm. Entre adesivos, o 2015 foi sempre superior ao 7752 em 140,9, 121,5 e 99,3% para $L_0=5$, 10 e 20 mm, respetivamente. Com o PETG também se verifica a aproximação de $E_{máx}$ do 7752 com o 2015 com o aumento de L_0 .

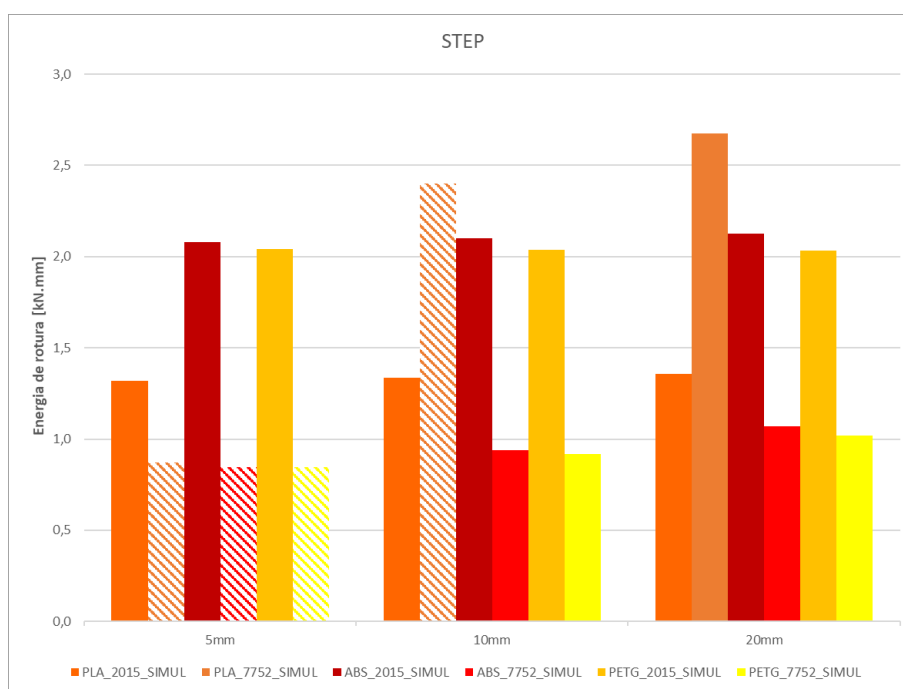


Figura 118 - Valores de $E_{máx}$ [kJ.mm] em função de L_0 por adesivo e aderente para as juntas *step*; cor sólida = rotura aderente; tracejado = rotura no adesivo

A Figura 119 mostra a evolução de $E_{máx}$ em função de L_0 nas juntas *scarf* para os aderentes de PLA, ABS e PETG. As juntas com PLA apresentam um aumento de $E_{máx}$ para os diferentes adesivos.

Nas juntas de PLA com adesivo 2015 verifica-se um aumento de $E_{máx}$ de 176,3% entre $L_0=5-10$ mm, devido à rotura coesiva adesiva com $L_0=5$ mm e rotura no aderente com $L_0=10$ mm. Com o adesivo 7752, verifica-se um aumento de $E_{máx}$ de 241,7% entre $L_0=5-10$ mm e 239,4% entre $L_0=10-20$ mm. Entre adesivos, o 2015 apresentou mais $E_{máx}$ do que o 7752: 256,1, 189,0 e 15,7% com $L_0=5$, 10 e 20 mm.

Nas juntas com ABS e adesivo 2015, o aumento de $E_{máx}$ entre $L_0=5-10$ mm foi de 3,6% e entre $L_0=10-20$ mm foi de 31,2%. Com o adesivo 7752, o aumento verificado foi de 237,5 e 27,3% para os intervalos de $L_0=5-10$ mm e 10-20 mm. Entre os adesivos, o 2015 conseguiu superar o 7752 em 257,2% para $L_0=5$ mm, 9,6% para $L_0=10$ mm e 4,7% para $L_0=20$ mm.

Nas juntas com o PETG e adesivo 2015, entre $L_0=5-10$ mm há uma diminuição 6,7% e entre $L_0=10-20$ mm $E_{máx}$ aumenta 9,8%. Com o adesivo 7752, entre $L_0=5-10$ mm $E_{máx}$ aumenta 201,3% e entre $L_0=10-20$ mm aumenta 8,9%. O aumento brusco entre os dois primeiros L_0 deve-se aos diferentes modos de rotura.

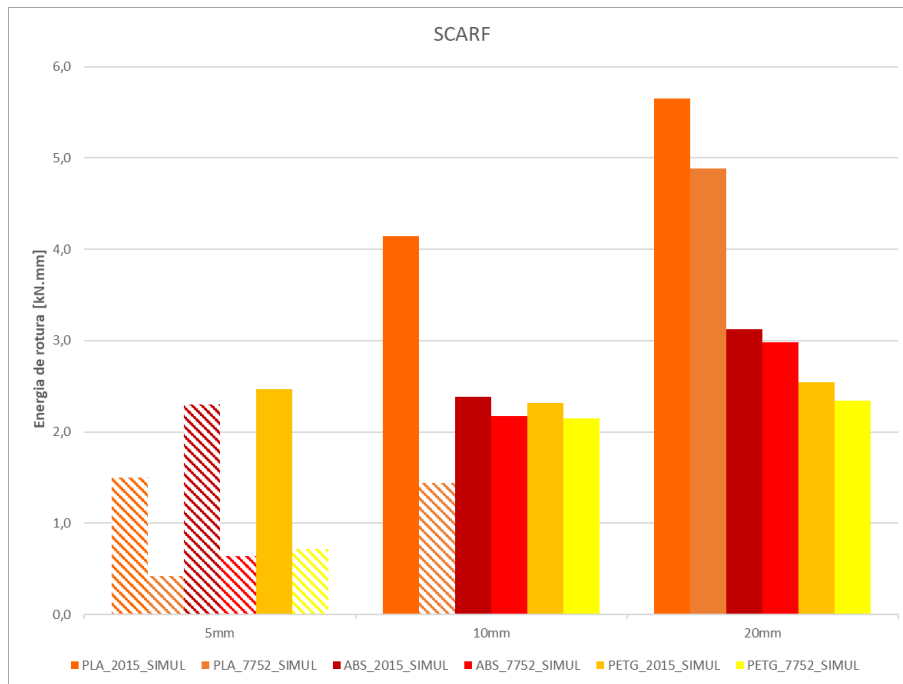


Figura 119 - Energias de rotura obtidas numericamente para as juntas scarf: a) PLA; b) ABS; c) PETG

3.7. Comparação de resultados experimentais e numéricos

No presente subcapítulo é realizada a comparação entre os dados obtidos numericamente e experimentalmente.

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

Pela análise da Figura 120, relativamente ao comportamento das SLJ, é possível verificar que a resistência obtida numericamente para os diferentes adesivos e materiais aderentes, apresenta o mesmo comportamento que os resultados obtidos experimentalmente, no que respeita a forma evolutiva de $P_{máx}$ com o aumento de L_0 . Em ambas as situações, o aumento de L_0 provoca um aumento de $P_{máx}$.

Para as juntas com aderentes de PLA, com a Tabela 39, verifica-se que com o adesivo 2015, os ensaios de tração resultaram roturas pelos aderentes, enquanto numericamente a rotura foi coesiva no adesivo. Com o adesivo 7752, para ambos os estudos realizados, verifica-se que as roturas ocorreram de forma coesiva no adesivo, com exceção da rotura no aderente obtida com $L_0=20$ mm na análise numérica. Porém, as curvas $P-\delta$ das SLJ com o aderente de PLA, quer

experimentalmente quer numericamente, indicam roturas frágeis e bruscas. As curvas experimentais com o adesivo 2015 (Figura 66 a)) não mostram qualquer tipo de plastificação de aderente ou adesivo, enquanto as curvas numéricas (Figura 105 a)) apresentam ligeiras plastificações do adesivo, promovendo a rotura no mesmo. A diferença entre $P_{máx}$ numérico e experimental com o adesivo 2015 e o aderente PLA varia entre 8 e 10%, com superioridade dos valores numéricos. Com o adesivo 7752, nenhuma das curvas $P-\delta$ (Figura 66 b) e Figura 105 b)) apresenta qualquer fenómeno de plastificação de aderentes ou de adesivo. Com este adesivo a diferença entre as análises varia entre 8 e 12%, com superioridade da análise numérica.

Com os aderentes de ABS, com a Tabela 39, verifica-se que as roturas surgiram sempre no aderente, com exceção do adesivo 7752 para $L_0=5$ mm que resultou numa rotura coesiva no adesivo. Com o adesivo 2015, nas curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 67 a) e Figura 106 a)) verificam-se plastificações acentuadas do aderente de ABS, que resultaram nas suas roturas. Na análise numérica, o aumento de L_0 promoveu o aumento de $P_{máx}$ mas as plastificações dos aderentes reduziram. Experimentalmente, observou-se o mesmo fenómeno, porém para $L_0=5$ mm não a rotura surgiu de forma brusca sem a ocorrência de plastificações. Os resultados numéricos apresentam um $P_{máx}$ superior em 9,5, 7,2 e 7,8 % relativamente aos valores experimentais para $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente. As juntas com o adesivo 7752 e o aderente ABS apresentaram curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 67 b) e Figura 106 b)) com fenómenos semelhantes aos observados com o adesivo 2015. Com este adesivo, a análise numérica foi superior à experimental entre 10 a 12%

Nas juntas com os aderentes de PETG, com a Tabela 39, observaram-se roturas maioritariamente no aderente nas duas análises, com a exceção da rotura numérica de forma coesiva com o adesivo 7752 e $L_0=5$ mm. As juntas com PTEG e o adesivo 2015, as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 68 a) e Figura 107 a)) diferem uma da outra. Nas curvas experimentais não se verificaram plastificações do aderente ou adesivo, tendo a rotura aderente surgido de forma brusca. Nas curvas numéricas verifica-se enormes plastificações dos aderentes. Nestas condições, as simulações numéricas apresentaram valores de $P_{máx}$ superiores aos experimentais entre 9,5 e 12%. Nas juntas de PETG com o adesivo 7752, as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 68 a) e Figura 107 a)) apresentam o mesmo fenómeno verificado nas juntas com o adesivo 2015, comportamento praticamente elástico até à rotura de forma experimental e enormes plastificações dos aderentes, com a exceção de $L_0=5$ mm, em que a junta sofreu uma rotura sem qualquer plastificação. Com estas condições, os valores de $P_{máx}$ numéricos foram superiores aos experimentais em cerca de 8 a 12%.

Entre adesivos, através da Figura 120, é possível verificar que para $L_0=5$ mm a resistência das juntas com o adesivo 7752 são inferiores às obtidas com o adesivo 2015. Contudo, com o aumento de L_0 verifica-se que as resistências dos dois adesivos se tornam semelhantes e no caso com o aderente de PLA, a resistência do 7752 ultrapassa a resistência do 2015. Este facto deve-se à capacidade do adesivo 7752 aumentar a sua resistência com o aumento de L_0 , por ser um adesivo mais flexível do que o 2015, que é um adesivo mais rígido. Entre aderentes, verifica-se que o PLA permitiu obter as juntas com maior resistência à tração, seguido do ABS e PETG.

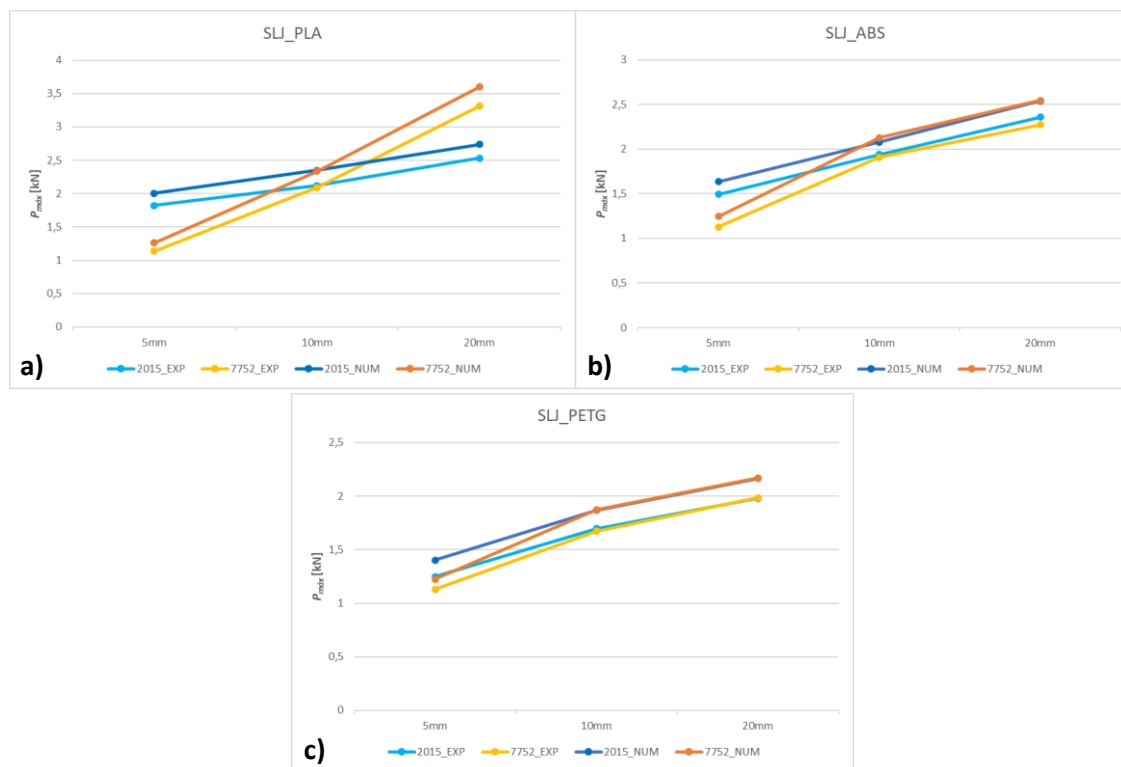


Figura 120 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as SLJ: a) PLA; b) ABS; c) PETG

A Figura 121 mostra a evolução de $P_{m\acute{a}x}$ das juntas *step* para os diferentes adesivos e aderentes em função de L_0 . É possível verificar que o aumento L_0 não influencia de forma significativa $P_{m\acute{a}x}$. Este fenômeno deve-se principalmente às roturas verificadas, maioritariamente pelo aderente e devido à própria geometria da junta. Como mostrado por Khosravani, et al. [91] e verificado na Figura 102, nas juntas de geometria *step*, a deformação inicia-se primeiramente nas camadas adesivas externas e só apenas quando estas rompem é que as camadas interiores sofrem a deformação. Na geometria *step* em estudo, as faces verticais são consideradas as camadas externas e a camada adesiva horizontal é considerada a interior. Com o início do carregamento, este é suportado pelas camadas verticais. Nestas faces apenas existe esforço de arrancamento. Até à rotura destas faces, é formada uma zona de concentração de tensões na zona de transição entre os degraus de 2,4 mm e 5 mm. Quando ocorre a rotura das camadas de adesivo vertical, devido à acumulação de tensões na zona de transição os aderentes acabam também por romper. Pela visualização da Tabela 26, verifica-se que as roturas experimentais pelo aderente surgiram sempre na zona entre os diferentes degraus. Nas simulações numéricas, as roturas no aderente também surgiram nesta zona, como mostra a Tabela 40. Este fenómeno faz com que $P_{m\acute{a}x}$ obtido, quando as roturas surgem nos aderentes, sejam semelhantes. Do lado oposto, quando a rotura das faces de adesivo verticais não provoca a rotura da junta, a ligação passa a estar presente ao esforço de corte. Com este esforço é possível verificar o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 .

Nas juntas com aderentes de PLA verifica-se as roturas numéricas e experimentais ocorrem sempre de igual modo para os diferentes adesivos e L_0 (Tabela 41). Com o adesivo 2015, as roturas ocorreram sempre pelo aderente e desta forma, na Figura 121 a) não se verifica variação significativa de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 . As curvas P - δ experimentais e numéricas (Figura 70 a) e Figura 108 a)) apresentam comportamentos praticamente elástico até à rotura no aderente. Nestas

condições, a análise numérica apresentou valores de $P_{máx}$ superiores em cerca de 9,5%. Nas juntas com o adesivo 7752, as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 70 b) e Figura 108 b)) apresentam comportamentos semelhantes até à rotura, verificando em ambas a presença da queda de forças proveniente da rotura das faces adesivas verticais. Nas duas análises verificou-se que o aumento de L_0 aumenta $P_{máx}$. Nestas condições, as análises numéricas apresentam valores de $P_{máx}$ cerca de 8,5 a 11,0% superiores relativamente ao experimental.

Nas juntas com aderentes ABS e adesivo 2015, as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 71 a) e Figura 109 a)) apresentam o mesmo comportamento praticamente elástico até à rotura. Como as roturas surgiram sempre pelos aderentes, em ambas as análises (Tabela 41), não se verifica evolução de $P_{máx}$ com o aumento de L_0 . Nestas condições, numericamente obteve-se $P_{máx}$ superior relativamente ao experimental em cerca de 9 a 12%. Nas curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas com o aderente ABS e adesivo 7752 (Figura 71 b) e Figura 109 b)) verifica-se comportamento perto de elástico até à rotura nos aderentes nas duas análises (Tabela 41). Devido a este comportamento, $P_{máx}$ não aumentou em função de L_0 . Com o adesivo 7752, $P_{máx}$ obtido numericamente foi superior ao experimental em cerca de 7,0 a 9,5%.

As juntas com aderentes de PETG e adesivo 2015, têm um comportamento praticamente elástico até à rotura, como mostra a curva $P-\delta$ experimental (Figura 72 a)) e a numérica (Figura 110 a)). Como as roturas ocorreram sempre no aderente para ambas as análises (Tabela 41), não se verifica evolução de $P_{máx}$ com o aumento de L_0 . Com o adesivo 2015, obteve-se numericamente $P_{máx}$ superior ao experimental em cerca de 8,0%. O comportamento das juntas PETG com adesivo 2015, foi semelhante com o adesivo 7752. Com o adesivo 7752, as roturas também ocorreram sempre no aderente para as duas análises (Tabela 41) e as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 72 b) e Figura 110 b)) também demonstram um comportamento perto de elástico até à rotura. Nestas condições de junta, numericamente obteve-se $P_{máx}$ superior ao experimental em cerca de 7 a 11%.

Entre adesivos, com a visualização da Figura 121, verifica-se que quando as roturas surgem nos aderentes, o adesivo 2015 permite obter valores de $P_{máx}$ superiores ao adesivo 7752 para os diversos L_0 . Contudo, quando a rotura se verifica coesiva no adesivo, como ocorreu nas juntas com adesivo 7752 e aderentes de PLA, o aumento de L_0 provoca o aumento da resistência da junta. Entre os diferentes aderentes, verifica-se que na geometria *step*, as juntas com os aderentes de PLA e ABS apresentam resistência de juntas muito semelhantes e o aderente PETG apresenta resistência ligeiramente inferiores, quando a utilização do adesivo 2015. Com o adesivo 7752, o aderente PLA destaca-se face ao aderente de ABS e PETG.

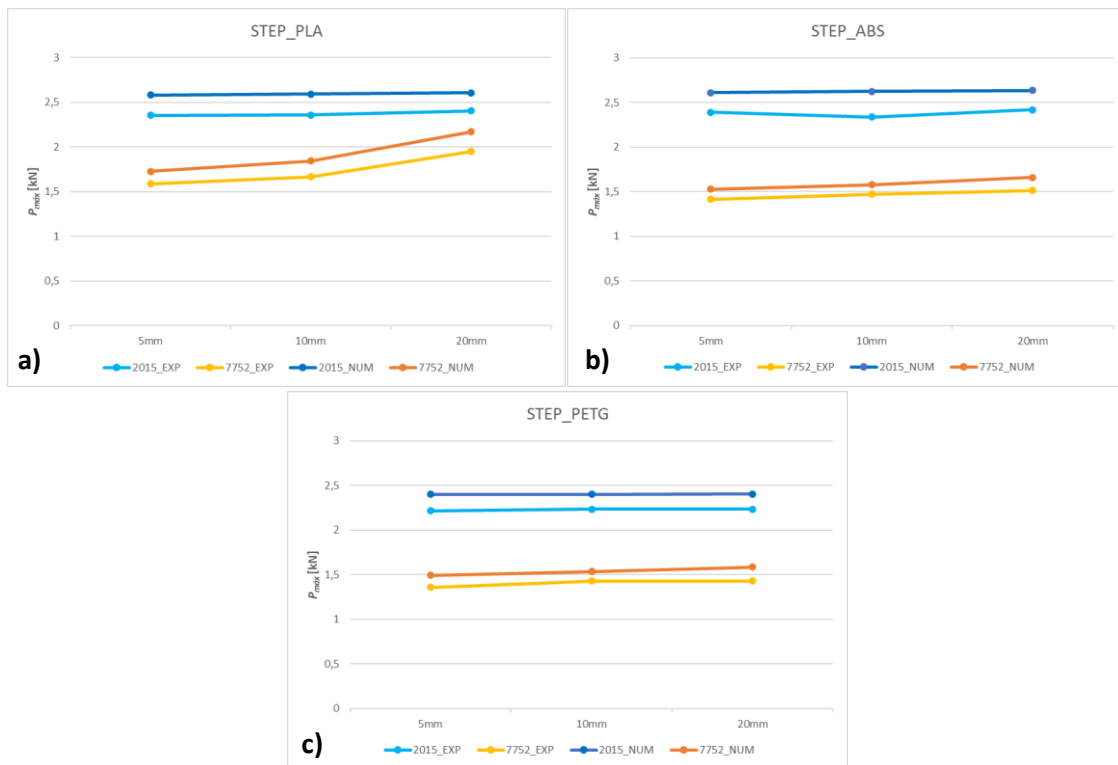


Figura 121 – Comparação de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas *step*: a) PLA; b) ABS; c) PETG

A Figura 122 representa a variação de $P_{máx}$ das juntas *scarf* para os diferentes adesivos e aderentes em função de L_o . Verifica-se que, em algumas condições de juntas, o aumento de L_o permite o aumento $P_{máx}$. O aumento de L_o provoca o aumento de $P_{máx}$ quando as roturas ocorrem de forma coesiva no adesivo, porque quando as roturas ocorrem no aderente $P_{máx}$ não varia de forma significativa. Este fenómeno, deve-se à inclinação da face adesiva e aos esforços que lhe são aplicados. Com $L_o=5$ mm, a face adesiva está perpendicular ao carregamento. Nesta situação apenas é exercido esforço de arrancamento, esforço não desejado nas juntas adesivas [45]. Com o aumento de L_o , a face adesiva inclina e ocorre transformação parcial do esforço de arrancamento em esforço de corte. Como visto nas SLJ, o esforço de corte permite o aumento da resistência. O contínuo aumento de L_o fará com que numa determinada inclinação, a componente do esforço de corte supere o esforço de arrancamento, permitindo assim o aumento da resistência da junta.

Nas juntas com o aderente de PLA verifica-se as roturas numéricas e experimentais ocorrem sempre de igual modo para os diferentes adesivos e L_o (Tabela 43), com a exceção das juntas com o adesivo 7752 para $L_o=20$ mm, em que experimentalmente a rotura ocorre de forma coesiva no adesivo e numericamente ocorre no aderente. Nas juntas com o adesivo 2015, com a visualização das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 74 a) e Figura 111 a)) verificam-se comportamentos praticamente elásticos até à rotura. Devido à transformação do esforço de arrancamento em esforço de corte entre $L_o=5-10$ mm verifica-se um aumento de $P_{máx}$ e modos de rotura diferentes, rotura coesiva no adesivo para $L_o=5$ mm e rotura aderente com $L_o=10$ mm, em ambas as análises. Entre $L_o=10-20$ mm, não se verificou aumento de resistência porque com $L_o=20$ mm os aderentes começaram a plastificar-se e por consequência a sua rotura. Com o adesivo 2015, os valores numéricos foram superiores aos experimentais em cerca de 7 a 10%. Nas juntas com o adesivo 7752, verifica-se um aumento de $P_{máx}$ com o aumento de L_o de forma constante. Através da

visualização das P - δ experimentais e numéricas (Figura 74 b) e Figura 111 b)) verificam-se comportamentos praticamente elásticos até à rotura, com a ligeira plastificação dos aderentes com $L_0=20$ mm na simulação numérica que levou à sua rotura. Experimentalmente, com $L_0=20$ mm não se verificou qualquer plastificação e a rotura surgiu de forma coesiva no adesivo. Nestas condições a análise numérica apresentou valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores aos experimentais em cerca de 9 a 10%.

Nas juntas com aderentes ABS verificaram-se roturas semelhantes com os diferentes adesivos e L_0 , como mostra a Tabela 43. Com o adesivo 2015, com a visualização das curvas P - δ experimentais e numéricas (Figura 75 a) e Figura 112 a)) verifica-se comportamento praticamente elásticos até à rotura, com exceção de $L_0=20$ mm em que se verificam ligeiras plastificações dos aderentes. Ao contrário do sucedido com o adesivo 2015, com o 7752 verificou-se um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5$ -10 mm, devido a diferentes modos de rotura, coesiva no adesivo com $L_0=5$ mm e rotura aderente com $L_0=10$ mm. Nestas condições de juntas, as simulações numéricas superaram os resultados experimentais em cerca de 9,5 a 11%. Nas juntas com o adesivo 7752, as curvas P - δ experimentais e numéricas (Figura 75 b) e Figura 112 b)) também apresentaram comportamentos maioritariamente elásticos até à rotura. Com $L_0=20$ mm, verificaram-se ligeiras plastificações dos aderentes antes da rotura. Numericamente obteve-se mais 11% de $P_{m\acute{a}x}$ do que experimentalmente.

Com o aderente de PETG e adesivo 2015, as curvas P - δ experimentais e numéricas (Figura 76 a) e Figura 113 a)) mostraram comportamentos praticamente elásticos até à rotura e o comportamento plástico nos ensaios experimentais com $L_0=20$ mm. Relativamente aos modos de rotura observados, com adesivo 2015 observou-se sempre o mesmo modo de rotura no aderente em ambas as análises (Tabela 43). Nesta condição, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos foram superiores aos experimentais em cerca de 9 a 10%. Com o adesivo 7752, verificou-se o mesmo modo de rotura para cada condição nas diferentes análises (Tabela 43). Com $L_0=5$ mm verificaram-se roturas coesivas no adesivo e com $L_0=10$ e 20 mm roturas no aderente. Entre $L_0=5$ -10 mm verifica-se um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ e entre $L_0=10$ -20 mm não se verificou variação da resistência. Nestas condições com o adesivo 7752, obteve-se $P_{m\acute{a}x}$ numérico superior ao experimental em cerca de 10%.

Entre adesivos, verifica-se que as juntas com o adesivo 2015 apresenta sempre maior resistência do que com 7752, contudo o aumento de L_0 , nas situações em que a rotura surge no adesivo e posteriormente com um L_0 superior ocorre rotura aderente, a resistência do adesivo 7752 aproxima-se do 2015. Como mostra a Figura 122, com os L_0 mais elevados, a resistência das juntas é semelhante com os dois adesivos. Entre aderentes, as juntas com o PLA apresentaram maior resistência e uma evolução de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 e são seguidos pelo ABS e PETG.

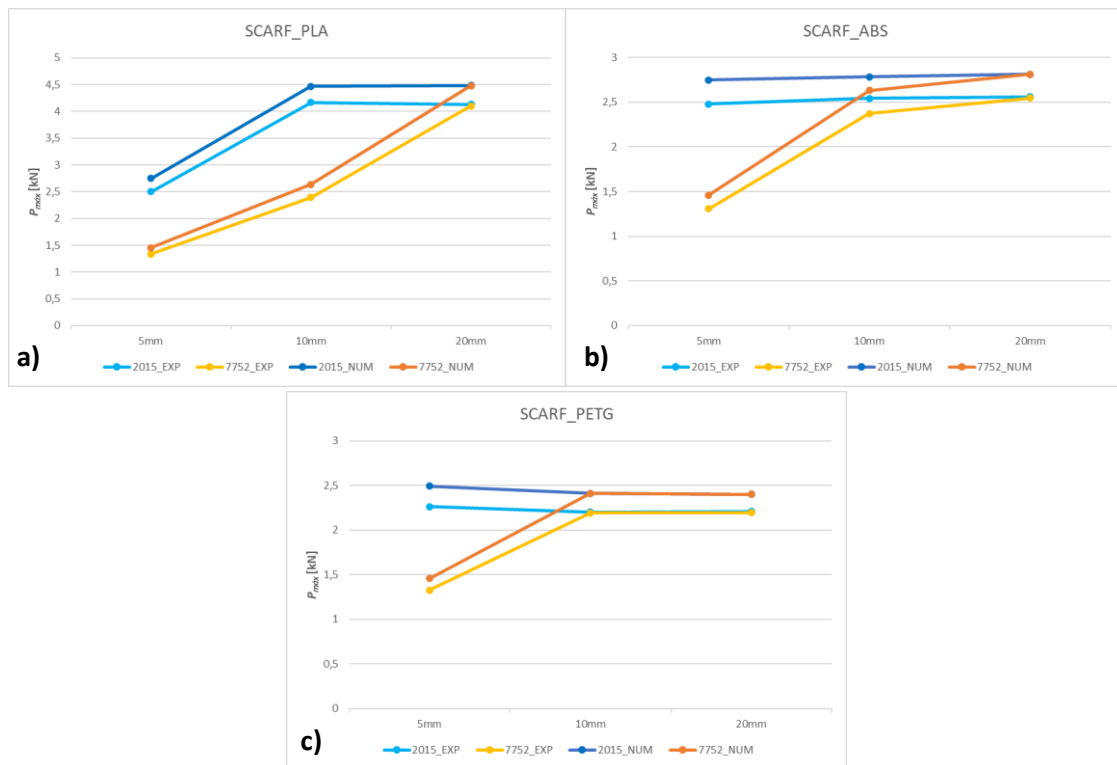


Figura 122 – Comparação de P_{max} obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas *scarf*: a) PLA; b) ABS; c) PETG

3.7.2. Rigidez das juntas

A Figura 123 mostra a diferença de rigidez máxima das juntas entre os valores obtidos experimentalmente e numericamente das SLJ com os diferentes adesivos e aderentes. Para os diferentes aderentes, verifica-se que o aumento de L_0 provoca um aumento de rigidez. Como a rigidez máxima se obtém nos valores iniciais do carregamento, o aumento de rigidez deve-se à maior área de adesivo, que permite distribuir mais uniformemente as tensões pela camada adesiva e resistir de melhor forma ao esforço de corte.

Nas juntas com os aderentes de PLA com o adesivo 2015, com a visualização das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 66 a) e Figura 105 a)) verifica-se que o aumento de L_0 provoca um aumento do declive da zona elástica. Com o adesivo 2015, a rigidez obtida numericamente foi superior em cerca de 25,5% face às obtidas de forma experimental. Com o adesivo 7752, verifica-se o mesmo aumento de declive da zona elástica nas curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 66 b) e Figura 105 b)). Numericamente obteve-se mais 25,4% de rigidez do que experimentalmente.

Nas juntas com aderentes ABS e adesivo 2015, a zona elástica das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 67 a) e Figura 106 a)) aumenta em função de L_0 . Na Figura 123 b), com $L_0=5$ mm verifica-se que numericamente obteve-se mais rigidez do que experimentalmente em cerca de 98%, enquanto que para $L_0=10$ e 20 mm a superioridade da rigidez numérica foi de 25%. A diferença de 98% com $L_0=5$ mm pode estar correlacionado com defeitos de fabrico dos aderentes de ABS, porque seria de esperar que com o adesivo 2015, a rigidez da junta fosse superior às juntas com o adesivo 7752. Com o 7752, o declive na zona elástica aumenta com o aumento de L_0 , como mostram as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 67 b) e Figura 106 b)). Nestas condições

de junta, a rigidez numérica foi superior em cerca de 23% face à rigidez experimental, para $L_0=5$ e 20 mm. Com $L_0=10$ mm, a superioridade da rigidez numérica foi de apenas 9,4%. Esta redução percentual pode estar correlacionada com fusões de camadas mais uniformes permitindo aumentar o declive na componente experimental, como se verifica na Figura 123 b).

Nas juntas com PETG com o adesivo 2015, as zonas elásticas das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 68 a) e Figura 107 a)) tornam-se mais acentuadas com o aumento de L_0 o que permite obter maior rigidez. Com este adesivo, das simulações numéricas resultaram rigidezes superiores em cerca de 24,7% face às obtidas de forma experimental. Com o adesivo 7752, o declive das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 68 b) e Figura 107 b)) aumenta em função de L_0 . Com o adesivo 7752, a rigidez numérica foi superior à experimental em cerca de 24,3%.

Com a visualização da Figura 123 é possível verificar que entre adesivos, as juntas com adesivo 2015 apresentam maior rigidez do que as juntas com adesivo 7752 para os diferentes aderentes e L_0 . Entre os aderentes, o PLA foi o material que permitiu obter maior rigidez de junta, seguido do ABS e PETG.

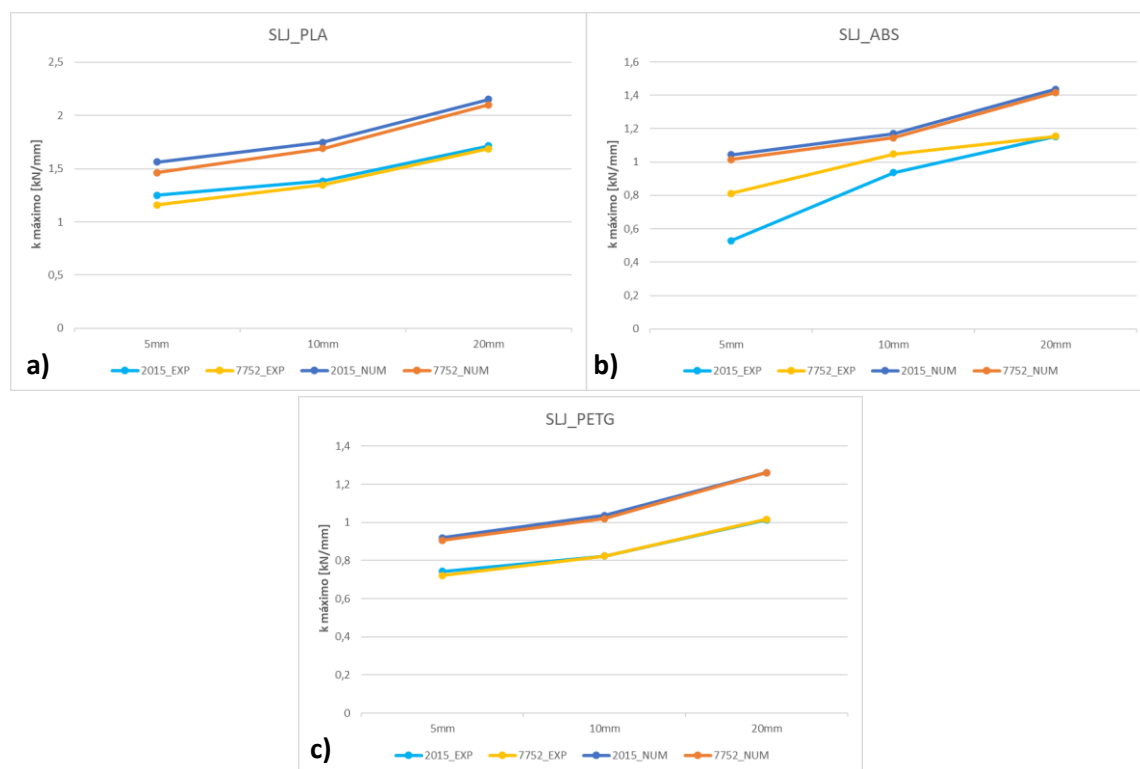


Figura 123 - Comparação de $k_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as SLJ: a) PLA; b) ABS; c) PETG

Através da Figura 124 é possível verificar e comparar a rigidez máxima obtida nos estudos numéricos e experimentais para as juntas *step* com os diferentes adesivos e aderentes em função de L_0 . Verifica-se que a rigidez não evolui de forma significativa para os diferentes L_0 , para as análises efetuadas. Como explicado anteriormente, no capítulo 3.7.1, o esforço a qual as juntas *step* estão sujeitas no início do carregamento é unicamente de arrancamento devido à presença das faces adesivas verticais. Como o aumento de L_0 não afeta o comprimento das faces verticais, a intensidade do esforço de corte é sempre a mesma para os diferentes L_0 . Este fenómeno faz com que a rigidez não varie nas juntas *step*.

Nas juntas com PLA, o declive das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 70 e Figura 108) na zona elástica não varia com o aumento de L_0 , contudo a rigidez obtida numericamente é superior à obtida experimental. Com o adesivo 2015 a rigidez numérica é 26% superior à experimental e com o adesivo 7752 a superioridade numérica é também de 26%.

Nas juntas com ABS, o aumento de L_0 não provoca alterações no declive das zonas elásticas das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 71 e Figura 109) para ambos os adesivos utilizados. A rigidez numérica foi sempre superior do que a experimentalmente obtida. Com o adesivo 2015 a superioridade foi de 26,6% e com o adesivo 7752 foi de 26,9%.

Com o aderente PETG, o fenómeno mantém-se e os declives da zona elástica das curvas $P-\delta$ experimental e numérica (Figura 72 e Figura 110). A rigidez numericamente obtida é também superior à experimental com a utilização dos dois adesivos. Com o adesivo 2015 e 7752 as diferenças registadas foram ambas de 26,6%.

Com a Figura 124 verifica-se que entre os adesivos, a rigidez das juntas com o adesivo 2015 é ligeiramente superior às obtidas com o 7752. As diferenças entre os adesivos não ultrapassaram os 2,5% na análise numérica e experimentalmente não ultrapassaram os 0,3%. Entre os diferentes aderentes, verifica-se que a rigidez máxima é obtida com os aderentes de PLA, seguidos de ABS e PETG.

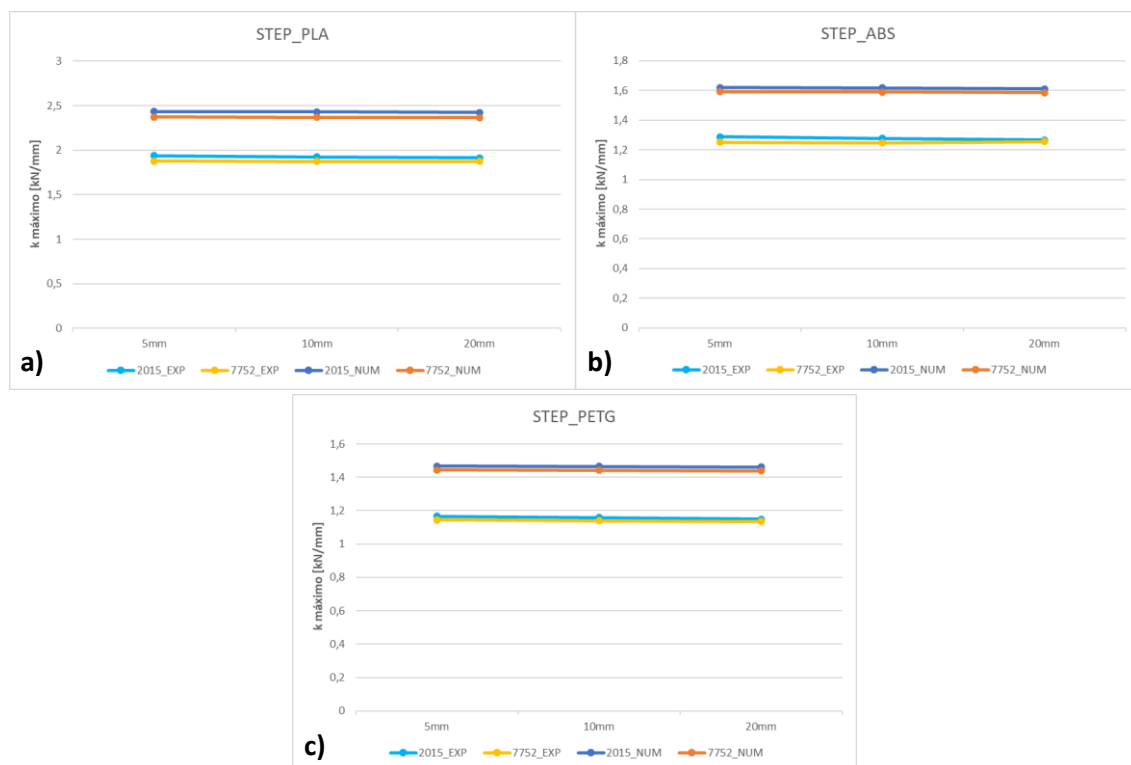


Figura 124 – Comparação de $k_{máx}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas *step*: a) PLA; b) ABS; c) PETG

A Figura 125 apresenta os valores de $k_{máx}$ obtidos numérica e experimentalmente nas juntas *scarf* para os diferentes adesivos e aderentes em função de L_0 . De forma semelhante à rigidez das juntas *step*, as juntas *scarf* apresentam valores de rigidez muito semelhante para as diferentes condições. Nas juntas *scarf*, os esforços a qual a junta está sujeita funciona de forma similar às juntas *step*. Como a inclinação da face adesiva apresenta sempre uma componente de esforço de

arrancamento, esta componente será a responsável pelo declive inicial na zona elástica das curvas $P-\delta$.

Nas juntas com PLA, o declive das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 74 e Figura 111) na zona elástica mantém-se inalterado com o aumento de L_0 , porém a rigidez obtida de forma numérica é superior à obtida experimentalmente. Com o adesivo 2015 a rigidez numérica é 24% superior à experimental e com o adesivo 7752 a superioridade numérica é de 26%.

Nas juntas com ABS, o aumento de L_0 não altera o declive das zonas elásticas das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 75 e Figura 112) para ambos os adesivos utilizados. A rigidez numérica foi sempre superior do que a experimentalmente obtida. Com o adesivo 2015 a superioridade foi de 26,0% e com o adesivo 7752 foi de 28,7%.

Com o aderente PETG, o fenómeno mantém-se e os declives da zona elástica das curvas $P-\delta$ experimental e numérica (Figura 72 e Figura 110). A rigidez numericamente obtida é também superior à experimental com a utilização dos dois adesivos. Com o adesivo 2015 a superioridade da rigidez numérica foi de 24,3% face às obtidas experimentalmente e com o 7752 a superioridade da rigidez numérica foi de 26,1% relativamente à experimental.

Com a Figura 124 verifica-se que entre os adesivos, a rigidez das juntas com o adesivo 2015 é ligeiramente superior às obtidas com o 7752. As diferenças entre os adesivos não ultrapassaram os 2,5% na análise numérica e experimentalmente não ultrapassaram os 0,3%. Entre os diferentes aderentes, verifica-se que a rigidez máxima é obtida com os aderentes de PLA, seguidos de ABS e PETG.

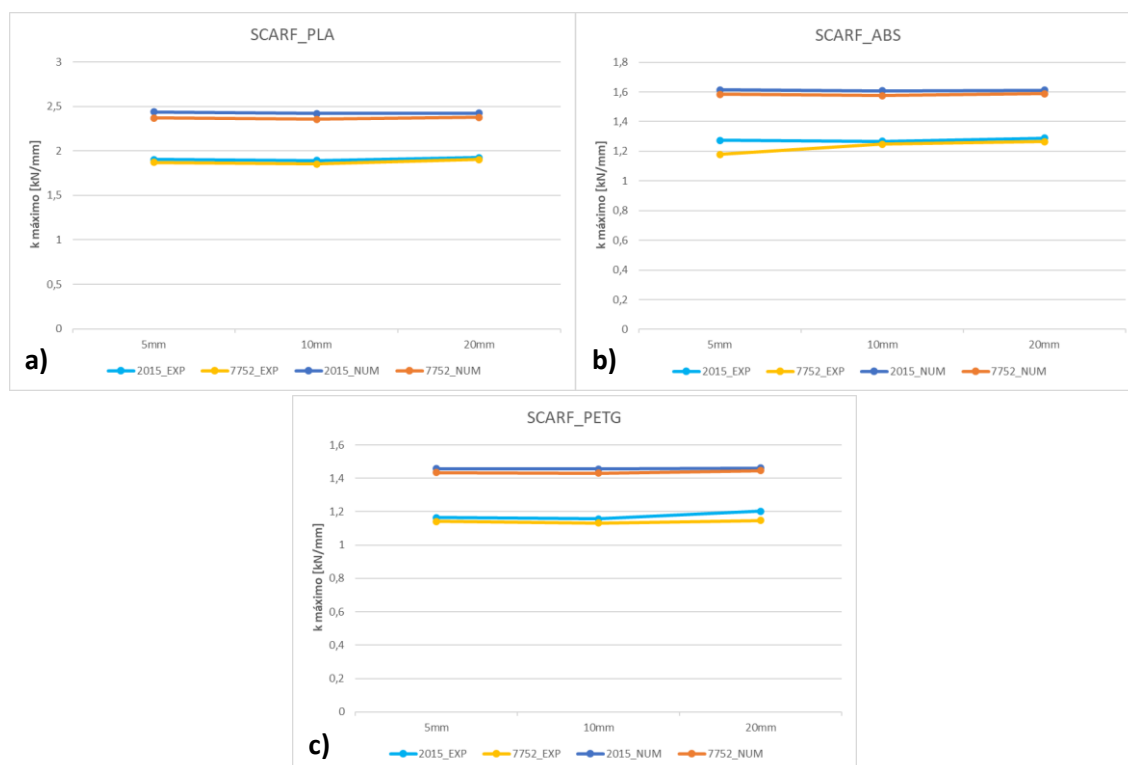


Figura 125 - Comparação de $k_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas scarf: a) PLA; b) ABS; c) PETG

3.7.3. Energia de rotura

Dos parâmetros analisados, a energia de rotura foi a que apresentou maior discrepâncias entre os resultados obtidos numérica e experimentalmente. A principal razão para essas discrepâncias são as curvas $P-\delta$ apresentarem valores de $P_{máx}$ e os deslocamentos de rotura diferentes entre as análises em estudo.

A Figura 126 ilustra a evolução experimental e numérica de $E_{máx}$ nas SLJ para os diferentes adesivos e aderentes. As juntas com aderente de PLA demonstram um aumento da capacidade de absorção de energia com o aumento de L_0 . As curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 66 e Figura 105) das juntas com aderentes de PLA são bastantes semelhantes, já que $P_{máx}$ e o deslocamento de rotura evoluem de forma similar nas análises. Com o adesivo 2015, verifica-se que a análise experimental obteve um maior $E_{máx}$ para $L_0=5\text{mm}$. Com o aumento de L_0 , o $E_{máx}$ numérico ultrapassa o experimental, passando de uma diferença de 26,0% de superioridade da análise experimental com $L_0=5\text{ mm}$, para uma superioridade de $E_{máx}$ numérico de 5,2 e 6,5% para $L_0=10$ e 20 mm, respetivamente. O mesmo se sucede nas juntas com o adesivo 7752, com 24,3% de superioridade da análise experimental sobre a numérica com $L_0=5\text{ mm}$. Com o aumento de L_0 , a simulação numérica apresenta um aumento de $E_{máx}$ superior face à análise experimental, atingindo a mesma energia com $L_0=10\text{ mm}$ e com $L_0=20\text{mm}$, numericamente absorveu-se mais 25,6% energia que o experimental na SLJ de PLA com adesivo 7752.

Nas juntas com aderentes de ABS, o aumento de $E_{máx}$ com o aumento de L_0 não ocorreu da mesma forma nas análises em estudo. Com o adesivo 2015, para $L_0=5\text{ mm}$ as curvas $P-\delta$ experimentais (Figura 67 a)) apresentam um comportamento praticamente elástico até à rotura, enquanto que na curva $P-\delta$ numérica (Figura 106 a)), antes da rotura ocorre uma enorme plastificação dos aderentes. Esta plastificação provoca um aumento do deslocamento de rotura e por consequência um maior $E_{máx}$ fazendo com que a análise numérica apresente mais 101,8% de energia do que a análise experimental. Com o aumento de L_0 para 10 mm, na componente experimental verificou-se um aumento de $E_{máx}$ devido ao aumento de $P_{máx}$ e de plastificações dos aderentes. Na análise também ocorreu o aumento de $P_{máx}$, contudo a plastificação reduziu, permitindo que $E_{máx}$ experimental se aproximasse do numérico, sendo a diferença de 13,5% com superioridade numérica. Com $L_0=20\text{ mm}$, o comportamento verificado nas curvas $P-\delta$ com $L_0=10$ manteve-se, fazendo com que $E_{máx}$ experimental ultrapassa-se em 15,2%. Nas juntas de ABS com o adesivo 7752, inicialmente o $L_0=5\text{ mm}$, verifica-se uma superioridade de $E_{máx}$ experimental em 17,5% face ao numérico, devido aos maiores deslocamentos de rotura obtidos de forma experimental. Com o aumento de L_0 para 10 mm, experimentalmente obtém-se maior $P_{máx}$ e deslocamento, contudo estes aumentos na análise experimental fazem com que $E_{máx}$ numérico seja superior ao experimental em 26,8%. Com $L_0=20\text{ mm}$, apesar de $P_{máx}$ mais elevado na análise numérica, os deslocamentos de rotura diminuíram, enquanto que na análise experimental estes dois parâmetros voltam a aumentar. Com este $L_0=20\text{ mm}$, experimentalmente volta-se a obter mais $E_{máx}$ do que numericamente, em cerca de 43,7%.

Nas juntas com aderentes de PETG, de forma experimental, as curvas $P-\delta$ experimentais (Figura 68) permitiram obter um aumento de $E_{máx}$ com o aumento de L_0 , enquanto que nas curvas $P-\delta$ numéricas (Figura 107), o aumento de L_0 não provocou o mesmo efeito em $E_{máx}$. Com o adesivo 2015, as curvas numéricas com $L_0=5\text{ mm}$ apresentam elevadas plastificações dos aderentes, enquanto experimentalmente a junta comporta-se de forma praticamente elástica até à sua rotura.

Estes comportamentos diferentes fazem com que $E_{m\acute{a}x}$ numérico seja superior ao experimental em 312,0%. Com o aumento de L_0 para 10 mm, os comportamentos aproximam-se ligeiramente, não se verificando plastificações elevadas, contudo a análise numérica apresentou um $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamentos superiores. A diferença inicial de 312,0% com $L_0=5$ mm, reduziu para 66,3%. Com $L_0=20$ mm, as juntas experimentais mantiveram o mesmo comportamento, aumento de $P_{m\acute{a}x}$ e dos deslocamentos de rotura, e as análises numéricas apesar do aumento de $P_{m\acute{a}x}$, reduziram o seu deslocamento na rotura. Estes comportamentos, fazem com que $E_{m\acute{a}x}$ obtido experimentalmente ultrapasse em 2,0% $E_{m\acute{a}x}$ numérico. Nas juntas com PETG e adesivo 7752, com $L_0=5$ mm, $E_{m\acute{a}x}$ obtido nas duas análises são bastante semelhantes, em que a diferença é de 12,6%, com superioridade numérica. Com o aumento de L_0 para 10 mm, verifica-se que curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 68 b) e Figura 107 b)) aumentaram $P_{m\acute{a}x}$ e os deslocamentos na rotura, contudo estes deslocamentos foram superiores na análise numérica, permitido que neste comprimento de adesivo, numericamente se obtenha mais 135,6% de energia face ao experimental. Porém, com $L_0=20$ mm, o comportamento das curvas $P-\delta$ altera-se. De forma experimental o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ e dos deslocamentos mantém-se, contudo na análise numérica apenas $P_{m\acute{a}x}$ aumentou. A concentração de tensões nos aderentes provocou uma rotura a deslocamentos inferiores. Este comportamento faz com que $E_{m\acute{a}x}$ numérica reduza entre $L_0=10-20$ mm e que entre as análises, $E_{m\acute{a}x}$ numérica seja superior à experimental em apenas 40,0%.

Pela visualização da Figura 126, entre adesivos não é possível indicar com exatidão qual o adesivo permite obter $E_{m\acute{a}x}$ superiores, visto que a evolução de $E_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 não sempre a mesma. Porém verifica-se que o aumento de L_0 provoca, na generalidade, aumento de $E_{m\acute{a}x}$ com a utilização do adesivo 7752, o que indica que com este adesivo é capaz de absorver mais energia com comprimentos superiores, enquanto que o adesivo 2015 por ser mais rígido é capaz de absorver mais energia com camadas adesivas inferiores. Entre os aderentes, as juntas com ABS apresentam maior capacidade de absorção de energia, seguido do PLA e PETG.

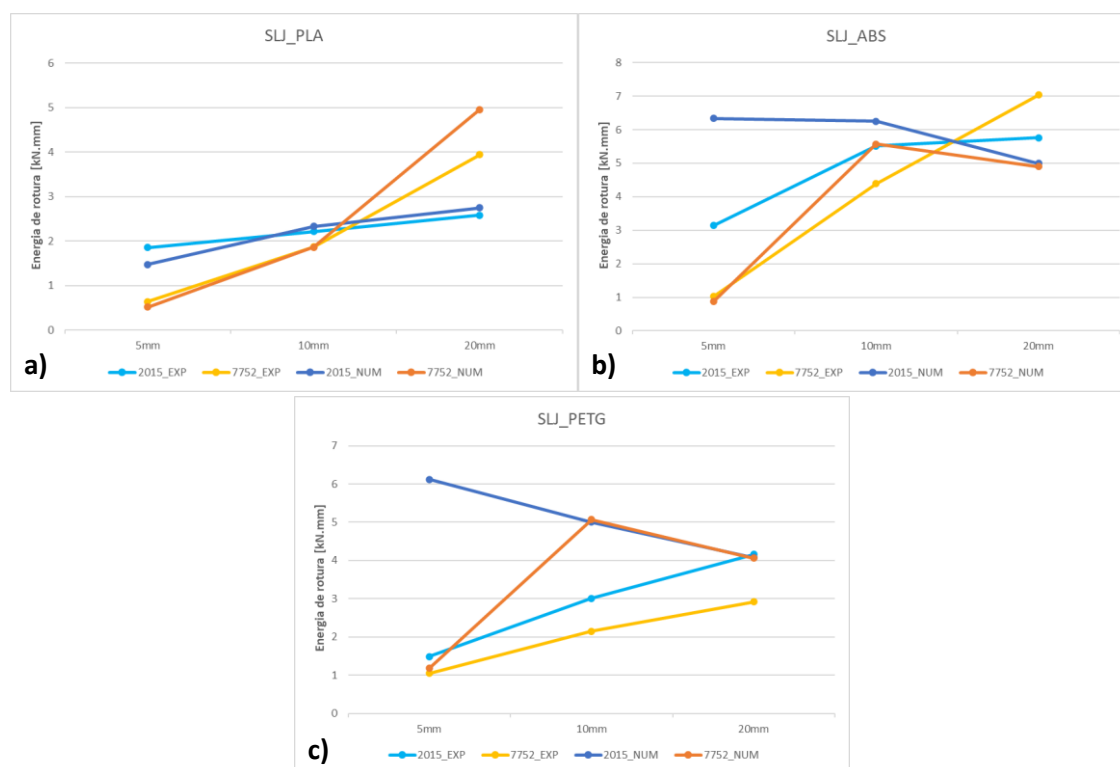


Figura 126 – Comparação de $E_{máx}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as SLJ: a) PLA; b) ABS; c) PETG

A Figura 127 representa a variação de $E_{máx}$ obtidas pelas análises numéricas e experimentais nas juntas *step* para os diferentes aderentes e adesivos. Ao contrário da SLJ, com as juntas *step*, verifica-se uma melhor uniformidade de $E_{máx}$ com o aumento de L_0 .

Para as juntas com aderente de PLA e o adesivo 2015, através das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 70 a) e Figura 108 a)) verifica-se uma uniformidade dos valores $E_{máx}$ com ligeiro aumento no ensaio experimental com $L_0=20$ mm, possivelmente devido a ligeiras plastificações de aderente, aumentando o deslocamento. Como as curvas $P-\delta$ experimentais, numéricas e as roturas obtidas foram registadas sempre nos aderentes, esperava-se que $E_{máx}$ para diferentes L_0 não fosse variar de forma significativa. Com $L_0=5$ e 10 mm, verificou-se que experimentalmente se obtém mais 22,8% de $E_{máx}$ face aos valores numéricos, pois sendo $P_{máx}$ obtido semelhantes nas duas análises, os deslocamentos na rotura provocam a diferença. Com $L_0=20$ mm, como os deslocamentos de rotura numéricos não se alteram enquanto que de forma experimental ocorre um aumento, $E_{máx}$ experimental é superior em 31,3%.

As juntas com aderentes de PLA e o adesivo 7752, com a análise das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 70 b) e Figura 108 b)) verifica-se que o aumento de L_0 provoca um aumento acentuado na $E_{máx}$ obtida numericamente, e um ligeiro aumento nas análises experimentais., devido às roturas ocorrerem de forma coesiva no adesivo. Com $L_0=5$ mm, como os $P_{máx}$ são semelhantes, os deslocamentos na rotura são o fator de diferenciação. Como experimentalmente se verificou um maior deslocamento de rotura, $E_{máx}$ obtido nesta análise é superior em 63,9% ao obtido numericamente. Com o aumento de L_0 para 10 e 20 mm, numericamente verificam-se maiores deslocamentos na rotura, resultantes da plastificação do adesivo, do que os experimentais. Com estes L_0 , verificou-se que a análise numérica apresenta $E_{máx}$ superior em 60,1 e 47,9% para $L_0=10$ e 20 mm, respetivamente.

Nas juntas com os aderentes de ABS verifica-se que $E_{m\acute{a}x}$ experimental foi superior ao numérica para os diferentes adesivos e L_0 . Com a visualização das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 71 e Figura 109), verifica-se que os deslocamentos de rotura são sempre superiores na análise experimental, enquanto que $P_{m\acute{a}x}$ não apresenta diferenças entre as análises. As juntas com o adesivo 2015, experimentalmente apresentam uma ligeira descida de $E_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=5-10$ mm. Esta acontece devido aos deslocamentos superiores observados com $L_0=5$ mm. O $E_{m\acute{a}x}$ obtido experimentalmente é 52, 43 e 46% superior ao $E_{m\acute{a}x}$ obtido numericamente, para os $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente. Nas juntas com o adesivo 7752, verifica-se que a energia absorvida aumenta de igual forma com o aumento de L_0 . Percentualmente, $E_{m\acute{a}x}$ obtido de forma experimental é 30, 28 e 20,5% superior ao obtido numericamente, para $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente.

Nas juntas com aderentes de PETG verifica-se uma estagnação de $E_{m\acute{a}x}$ nas análises numéricas com o aumento de L_0 , enquanto experimentalmente verifica-se um aumento acentuado de $E_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 . Com a visualização das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 72 e Figura 110), verifica-se que de forma experimental há um aumento dos deslocamentos de rotura com o aumento de L_0 , enquanto numericamente tal não se verifica. Nas juntas com adesivo 2015, verificou-se que para $L_0=5$ mm o estudo numérico apresenta maior $E_{m\acute{a}x}$, 51,2% superior. Por outro lado, para $L_0=10$ e 20 mm, experimentalmente obteve-se valores superiores em cerca de 27,0% aos valores numéricos. Com a visualização das curvas $P-\delta$ obtidas, verifica-se que $E_{m\acute{a}x}$ é superior para $L_0=10$ e 20 mm devido ao aumento dos deslocamentos registados experimentalmente. Com $L_0=5$ mm, o $P_{m\acute{a}x}$ obtido foi superior no estudo numérico para deslocamentos semelhantes. Com o aumento de L_0 os deslocamentos experimentais aumentam resultando numa maior área da curva $P-\delta$ e por consequência maior $E_{m\acute{a}x}$ experimental. Com o adesivo 7752 verifica-se sempre superioridade de $E_{m\acute{a}x}$ experimental, visto que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos foram próximos dos numéricos, mas a nível de deslocamentos, os ensaios experimentais mostraram plastificações dos aderentes e com tal, deslocamentos superiores em função de L_0 . Em termos percentuais verifica-se que experimentalmente se absorveu mais 51, 97 e 120% de energia do que numericamente, para os $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente.

Com a análise da Figura 127, verifica-se que entre adesivos $E_{m\acute{a}x}$ é geralmente superior com a aplicação do adesivo 2015 nas diferentes análises. Contudo, com o aderente de PLA, verifica-se que o adesivo 7752 apresenta maiores valores de $E_{m\acute{a}x}$ na análise numérica. O adesivo 2015 foi o que apresentou mais $E_{m\acute{a}x}$ devido às roturas serem maioritariamente nos aderentes na zona de transição entre degraus. Entre os aderentes, as juntas com os aderentes de ABS foram as que apresentaram mais energia absorvida. Depois segue-se o PETG e o PLA.

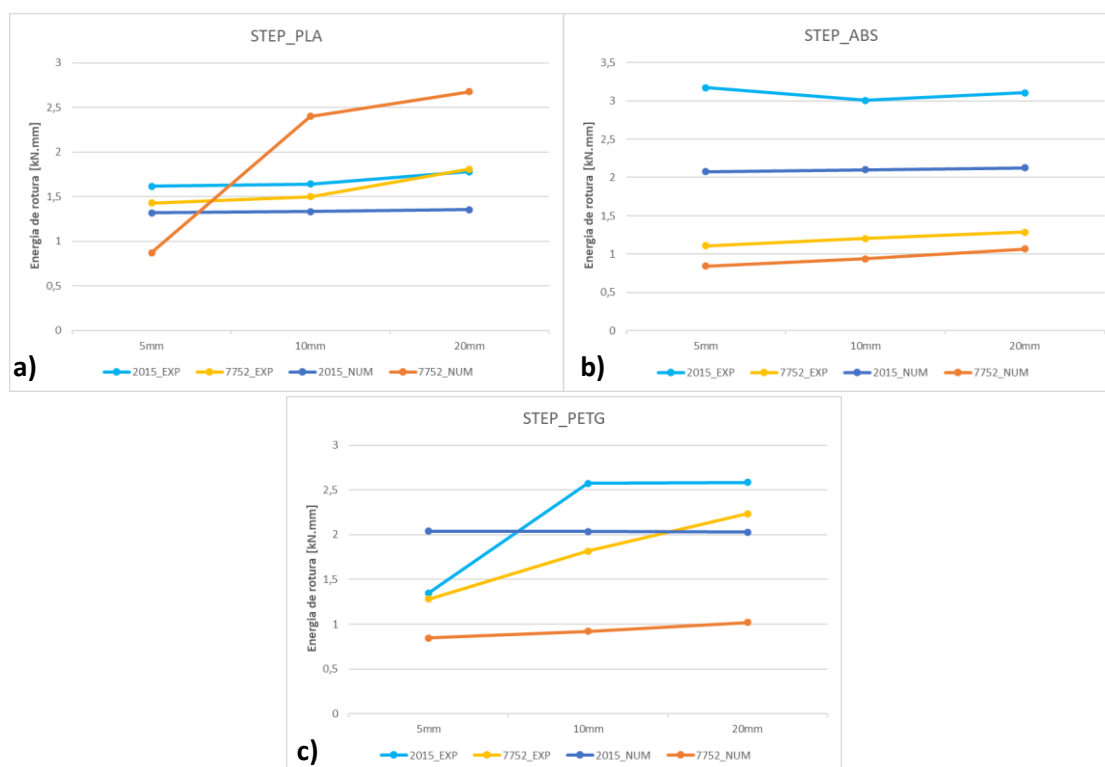


Figura 127 - Comparação de $E_{máx}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas *step*: a) PLA; b) ABS; c) PETG

No que diz respeito à energia absorvida pelas juntas *scarf*, a Figura 128 mostra como evolui $E_{máx}$ com o aumento de L_0 para os diferentes aderentes e adesivos. Comum a todas as juntas *scarf*, regista-se que a absorção de energia é superior nas análises experimentais, devido aos ensaios de tração resultarem curvas $P-\delta$ com plastificações na maioria dos aderentes.

Nas juntas com aderentes de PLA, verifica-se um aumento da energia com o aumento de L_0 com os dois adesivos em estudo e uma superioridade das análises experimentais sobre as numéricas. Este aumento de $E_{máx}$ deve-se ao facto que, nas curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 74 e Figura 111) existe um aumento de $P_{máx}$ e dos deslocamentos na rotura, em função de L_0 . Com o adesivo 2015, os valores de $E_{máx}$ foram 28,8, 46,7 e 77,4% superior aos valores numéricos, para $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente. Com o adesivo 7752, com o aumento de L_0 verifica-se um aumento de $E_{máx}$, em que os resultados experimentais são 54,3, 44,4 e 26,6% superiores aos numéricos, para $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente.

Nas juntas com aderentes de ABS, verifica-se um aumento de $E_{máx}$ com o aumento de L_0 . Nas curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas (Figura 75 e Figura 112) verifica-se que o aumento de $E_{máx}$ deve-se principalmente aos deslocamentos de rotura. Com o adesivo 2015 e $L_0=5$ mm, verifica-se valores de $E_{máx}$ próximos entre as duas análises com superioridade dos valores experimentais, porque os deslocamentos experimentais de rotura foram relativamente superiores. A diferença entre as duas análises foi de 28,9%. Com o aumento de L_0 para 10 e 20 mm, a superioridade dos valores experimentais aumentou para 91,5% em ambos L_0 . Este aumento resulta da plastificação dos aderentes nos ensaios de tração que provocam o aumento dos deslocamentos, enquanto que na análise numérica às juntas tiveram um comportamento perto de elástico até à rotura. De igual forma se verificam estas ordem de percentagem nas juntas com aderentes de ABS e o adesivo 7752. Com $L_0=5$ mm, como não ocorre qualquer tipo de plastificação dos aderentes ou adesivo em ambas

as análises, $E_{máx}$ é semelhante, com 37,8% de diferença com superioridade experimental. Com o aumento de L_0 para 10 e 20 mm, como se verificaram plastificações dos aderentes nos ensaios de tração, os elevados deslocamentos de rotura provocam um aumento diferencial de $E_{máx}$ entre a análise experimental e numérica de 72,4 e 145,0% para $L_0=10$ e 20 mm, respetivamente.

Para as das juntas *scarf* com aderentes de PETG, experimentalmente obteve-se $E_{máx}$ superior aos resultados numéricos. Com a análise das curvas $P-\delta$ experimental e numérica (Figura 76 e Figura 113) verifica-se que os deslocamentos de rotura obtidos nos ensaios de tração são bastante superiores aos obtidos de forma numérica. Estes aumentos dos deslocamentos surgem e devido às plastificações dos aderentes. Com o adesivo 2015, na análise experimental existe um aumento elevado de $E_{máx}$ entre $L_0=10-20$ mm devido à plastificação do aderente. O $E_{máx}$ obtido experimental é 13,9, 6,41 e 304,3% superior comparativamente ao $E_{máx}$ obtido numericamente, para $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente. No caso das juntas com o adesivo 7752, verifica-se uma evolução semelhante de $E_{máx}$ com o aumento de L_0 visto que as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas, respetivamente, mostram ser semelhantes, sem plastificação dos aderentes. Em termos de percentagem, as juntas ensaiadas experimentalmente mostraram absorver mais 36,2, 29,5 e 40,2% de energia que as juntas simuladas numericamente, para $L_0=5, 10$ e 20 mm, respetivamente.

Em relação aos adesivos, as juntas com o adesivo 2015 apresentam melhor energia de rotura, quer de forma experimental e numérica. Entre os aderentes, o PLA apresenta maior $E_{máx}$, seguido do PETG e ABS.

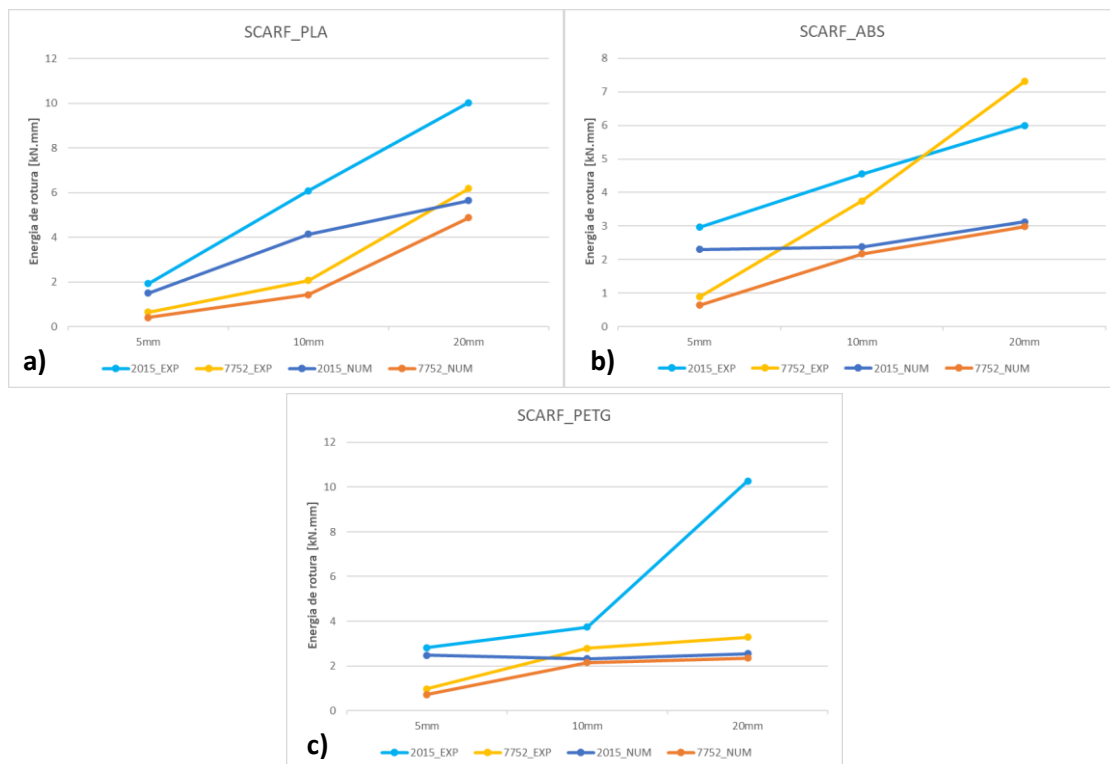


Figura 128 - Comparação de $E_{máx}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas *scarf*: a) PLA; b) ABS; c) PETG

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1. Conclusões

O principal objetivo da presente dissertação consistiu na análise do comportamento de diferentes juntas adesivas solicitadas à tração com aderentes impressos em 3D, fabricados pelo processo FDM. O estudo incidiu sobre diferentes configurações de junta. Foram utilizados adesivos com comportamentos distintos face ao carregamento estudado, designadamente o Araldite® 2015 e o Sikaforce®7752. Utilizaram-se três plásticos possíveis de fabricar por FDM como aderentes, acrilonitrila butadieno estireno (ABS), poliácido láctico (PLA) e polietileno tereftalato glicol (PETG). A geometria das juntas variou entre juntas de sobreposição simples, juntas com degrau e juntas com chanfro interior. Para cada geometria foram estudados diferentes L_0 . A combinação das condições resulta no estudo de 54 configurações de junta diferentes. O estudo residiu na previsão do comportamento das juntas, nomeadamente a resistência, a rigidez e a energia absorvida.

Previamente ao estudo das juntas adesivas, os plásticos foram caracterizados à tração. Devido às ilimitadas combinações de parâmetros no processo de fabrico por FDM, diferentes parâmetros resultam em diferentes propriedades mecânicas. Com base em literatura recente e escolhas pessoais, os parâmetros escolhidos para o presente estudo tiveram em conta a obtenção de boas propriedades mecânicas, para conseguir rápidas impressões e densidades de enchimento inferiores a 100%. Deste estudo resultou a obtenção do módulo de Young e tensões reais. Dos três materiais concluiu-se que o PLA era o mais resistente à tração, porém o mais frágil. O ABS demonstrou a menor resistência ao carregamento, mas um melhor comportamento plástico e dúctil. O PETG apresentou resistência ligeiramente superior ao ABS e um comportamento plástico inconclusivo, visto que dois dos quatros provetes ensaiados na zona plástica apresentaram comportamentos frágeis, semelhantes ao PLA, e outros dois provetes apresentaram comportamentos dúcteis, semelhantes ao ABS. Destes materiais, previu-se que as juntas com PLA seriam as mais resistentes, enquanto as com ABS resistiriam a maiores deformações e por consequência teriam mais energia absorvida até à rotura.

As juntas adesivas foram tracionadas até à sua rotura. Concluiu-se que a geometria de junta que apresenta melhor desempenho na globalidade é a geometria *scarf*. Com esta geometria foram obtidas as maiores resistências de junta, seguidas das juntas *step* e SLJ. Relativamente à rigidez, as juntas *scarf* e *step* apresentaram valores semelhantes e superiores aos obtidos com as SLJ. Em termos da energia de rotura as juntas *scarf* obteve $E_{máx}$ superiores, seguidas das SLJ e *step*. Em relação aos aderentes, as juntas com o PLA mostraram ser as mais resistentes e com maior rigidez, independentemente do adesivo utilizado. Contudo, os aderentes de ABS permitiram, na generalidade das juntas, obter energias de rotura superiores. Entre adesivos, a utilização do adesivo Araldite®2015 permitiu obter as resistências de junta máximas na maioria das condições, com exceção da SLJ com PLA e adesivo Sikaforce®7752 para $L_0=20$ mm. Em relação à rigidez o adesivo Araldite®2015 permitiu obter rigidez máxima, visto ser um adesivo mais rígido e a obtenção deste parâmetro ter lugar no início dos carregamentos. Acerca da energia de rotura, foi neste adesivo que se verificaram maiores valores de $E_{máx}$ na maioria das condições.

O trabalho numérico focou-se principalmente na obtenção das curvas $P-\delta$ para realizar uma comparação direta com os resultados obtidos experimentalmente. Com o estudo das curvas $P-\delta$

obtidas numericamente para as diferentes condições chegou-se à mesma conclusão obtida experimentalmente. A geometria *scarf* voltou a apresentar-se como a melhor geometria em termos de resistência, rigidez e energia absorvida até à rotura.

A geometria *scarf* demonstrou ser superior em todos os campos devido à face adesiva inclinada. A estas faces de adesivo, durante os ensaios de tração, são aplicados dois tipos de esforços: esforço de corte e de arrancamento. Para $L_0=5$ mm, configuração que resulta numa face perpendicular ao carregamento, o único esforço a ser aplicado é de arrancamento. Este esforço faz com que a camada adesiva se deforme apenas na direção do carregamento, o que pode levar a roturas mais rápidas comparativamente a outros L_0 . Com este L_0 , o comportamento é semelhante às juntas *step*. Nas juntas *step*, a presença das faces verticais de adesivo faz com que, até rotura destas faces, a junta adesiva esteja sujeita unicamente ao esforço de arrancamento. Quando ocorre a rotura das faces verticais, caso o aderente não rompa na zona de transição entre os degraus, a junta *step* inicia o comportamento semelhante a uma SLJ, com esforço predominante de corte, permitindo aumentar a sua resistência. Nas juntas *scarf*, com o aumento de L_0 , a inclinação da camada adesiva vai fazer com que surja a componente do esforço de corte. A transformação ocorre de forma gradual, e este esforço promove o aumento da resistência tal como nas SLJ.

A comparação entre os resultados experimentais e numéricos permitiu concluir que é possível executar este tipo de juntas e prever o seu comportamento. Contudo, verificou-se uma discrepância entre os resultados das duas análises. A resistência numérica das juntas mostrou valores superiores em cerca de 10% para as diferentes condições e, em termos de rigidez, um desvio em cerca de 25%. Os resultados de $E_{máx}$ não permitem retirar conclusões concretas como nos parâmetros anteriores. Devido aos diferentes modos de rotura e plastificações dos aderentes e adesivos, este parâmetro variou de diferentes formas, não sendo possível padronizar de igual maneira nas duas componentes de estudo. Além disto, o modelo numérico utilizado no estudo numérico é relativamente simples no que refere à quantidade de propriedades e descrições dos materiais em estudo. A lei de dano coesiva por elementos triangulares tem a vantagem de reproduzir resultados com precisão relativamente a cargas no regime elástico dos materiais, contudo relativamente ao comportamento plástico fica aquém das expectativas, o que não fornece resultados precisos relativamente a $E_{máx}$.

4.2. Propostas de trabalhos futuros

De forma a complementar o presente trabalho, sugerem-se as seguintes propostas:

- Análise das tensões de arrancamento e de corte possíveis de obter pelo MEF;
- Estudo similar ao apresentado com a solicitação das juntas a ensaios de flexão;
- Estudar as mesmas geometrias de juntas para espessura de aderentes superiores e/ou diferentes parâmetros de junta;
- Análise dos parâmetros de impressão para obtenção de melhores propriedades mecânicas dos aderentes;
- Estudo com a combinação de diferentes materiais aderentes impressos em 3D na mesma junta adesiva;
- Estudo numérico com outros modelos de dano mais complexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ISO/ASTM 52900 Additive manufacturing - General principles - Terminology, ASTM Internacional 2015.
- [2] S. Mallakpour, F. Tabesh, and C. M. Hussain, "3D and 4D printing: From innovation to evolution," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 294, p. 102482, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102482>.
- [3] M. Al-Makky and D. Mahmoud, "The importance of additive manufacturing processes in industrial applications," 2016 2016, vol. 17: Military Technical College, 17th ed., pp. 1-14.
- [4] C. Beyer, "Strategic Implications of Current Trends in Additive Manufacturing," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, p. 064701, 10/24 2014, doi: 10.1115/1.4028599.
- [5] C. W. Hull, "The birth of 3D printing," *Research-Technology Management*, vol. 58, no. 6, pp. 25-30, 2015, doi: <https://doi.org/10.5437/08956308X5806067>.
- [6] A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, and M. I. Ul Haq, "3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0," *Sustainable Operations and Computers*, vol. 3, pp. 33-42, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>.
- [7] M. Cotteleer and J. Joyce, "3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth," *Deloitte Review*, vol. 14, no. 1, pp. 3-19, 2014.
- [8] M. Pérez, D. Carou, E. M. Rubio, and R. Teti, "Current advances in additive manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 88, pp. 439-444, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.076>.
- [9] R. Noorani, *3D Printing*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2018, p. 294.
- [10] A. Kiraz, O. Canpolat, C. Özkurt, and H. Taşkın, "Analysis of the factors affecting the Industry 4.0 tendency with the structural equation model and an application," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 150, p. 106911, 2020/12/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106911>.
- [11] G. Branwyn. "Math Monday: Two-layer geodesic spheres." <https://makezine.com/2010/05/09/math-monday-two-layer-geodesic-sphe/> (accessed 2022).
- [12] E. D. Herderick, "Progress in Additive Manufacturing," *JOM*, vol. 67, no. 3, pp. 580-581, 2015/03/01 2015, doi: 10.1007/s11837-015-1323-x.
- [13] P. B.A, L. N, A. Buradi, S. N, P. B L, and V. R, "A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential," *Materials Today: Proceedings*, 2021/11/18/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.059>.
- [14] P. Fu et al., "4D printing of polymers: Techniques, materials, and prospects," *Progress in Polymer Science*, vol. 126, p. 101506, 2022/03/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2022.101506>.
- [15] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, "Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, no. 1, pp. 389-405, 2016/03/01 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7576-2.
- [16] K. Patel, V. Kalachelvi, R. Karthikeyan, and S. Bhattathiri, "Modelling, Simulation and Control of Incremental Sheet Metal Forming Process using CNC Machine Tool," *Procedia Manufacturing*, vol. 26, pp. 95-106, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.012>.

- [17] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, and S. H. Mian, "Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 2, p. 1687814018822880, 2019.
- [18] S. Henry *et al.*, "Extrusion-based 3D printing of oral solid dosage forms: Material requirements and equipment dependencies," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 598, p. 120361, 2021/04/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120361>.
- [19] S. G. Sarvankar and S. N. Yewale, "Additive manufacturing in automobile industry," *Int. J. Res. Aeronaut. Mech. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 1-10, 2019.
- [20] C. Hampel. "Local Motors' autonomous shuttle draws a new investor." <https://www.electrive.com/2020/10/23/local-motors-autonomous-shuttle-draws-new-investor/> (accessed 2022).
- [21] S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1573-1587, 2016/11/20/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>.
- [22] K. Maxey, "3D Printed Rocket Blasts Off," vol. 2023, ed, 2013.
- [23] N. Lecis, R. Beltrami, and M. Mariani, "Binder jetting 3D printing of 316 stainless steel: influence of process parameters on microstructural and mechanical properties," *La Metallurgia Italiana*, vol. 2, pp. 31-41, 06/09 2021.
- [24] M. Kozakiewicz *et al.*, "Binder jetting 3D printing of challenging medicines: from low dose tablets to hydrophobic molecules," *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2021/11/13/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2021.11.001>.
- [25] M. Li, W. Du, A. Elwany, Z. Pei, and C. Ma, *Binder Jetting Additive Manufacturing of Metals: A Literature Review*. 2019.
- [26] S. Park, W. Shou, L. Makatura, W. Matusik, and K. Fu, "3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications," *Matter*, vol. 5, no. 1, pp. 43-76, 2022/01/05/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.018>.
- [27] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, "Directed Energy Deposition Processes," in *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker Eds. New York, NY: Springer New York, 2015, pp. 245-268.
- [28] F. S. H. B. Freeman, B. Thomas, L. Chechik, and I. Todd, "Multi-faceted monitoring of powder flow rate variability in directed energy deposition," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 2, p. 100024, 2022/04/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2021.100024>.
- [29] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects," *Advances in Manufacturing*, vol. 3, no. 1, pp. 42-53, 2015/03/01 2015, doi: 10.1007/s40436-014-0097-7.
- [30] J.-Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials," *Applied Materials Today*, vol. 7, pp. 120-133, 2017/06/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>.
- [31] A. Cano-Vicent *et al.*, "Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects," *Additive Manufacturing*, vol. 47, p. 102378, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102378>.
- [32] S. Tyagi, A. Yadav, and S. Deshmukh, "Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process," *Materials Today: Proceedings*, 2021/07/14/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.073>.
- [33] Y. L. Tee, P. Tran, M. Leary, P. Pille, and M. Brandt, "3D Printing of polymer composites with material jetting: Mechanical and fractographic analysis," *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101558, 2020/12/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101558>.

- [34] S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, and B. Kieback, "Powders for powder bed fusion: a review," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 4, no. 4, pp. 383-397, 2019/12/01 2019, doi: 10.1007/s40964-019-00078-6.
- [35] H. A. Derazkola, F. Khodabakhshi, and A. Simchi, "Evaluation of a polymer-steel laminated sheet composite structure produced by friction stir additive manufacturing (FSAM) technology," *Polymer Testing*, vol. 90, p. 106690, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106690>.
- [36] L. U. A. M. R. G. AMRG. "About Additive Manufacturing." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/> (accessed 2022).
- [37] W. Piedra-Cascón, V. R. Krishnamurthy, W. Att, and M. Revilla-León, "3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review," *Journal of Dentistry*, vol. 109, p. 103630, 2021/06/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103630>.
- [38] J. Elambasseril *et al.*, "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*, vol. 7, no. 5, pp. 887-901, 2022/10/01 2022, doi: 10.1007/s40964-021-00259-2.
- [39] L. Zhou *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of Zr-modified aluminum alloy 5083 manufactured by laser powder bed fusion," *Additive Manufacturing*, vol. 28, pp. 485-496, 2019/08/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.027>.
- [40] D. Carou, M. Pérez, G. Medina-Sánchez, A. García-Collado, and M. Gupta, "Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters," *Materials*, vol. 11, 08/06 2018, doi: 10.3390/ma11081382.
- [41] M. R. Khosravani and T. Reinicke, "Fracture behavior of intact and defected 3D-printed parts," *Procedia Structural Integrity*, vol. 31, pp. 105-110, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.017>.
- [42] A. a. Alafaghani and A. Qattawi, "Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 36, pp. 164-174, 12/01 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.09.025.
- [43] M. Frascio *et al.*, "Additive manufacturing process parameter influence on mechanical strength of adhesive joints, preliminary activities," *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, vol. 25, pp. 41-47, 2019.
- [44] R. Sarkar, B. Chen, M. E. Fitzpatrick, T. Hilditch, and D. Fabijanac, "Blown-powder direct-energy-deposition of titanium-diboride-strengthened IN718 Ni-base superalloy," *Materials Science and Engineering: A*, p. 145617, 2023/08/26/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145617>.
- [45] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhaes, and M. F. S. F. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. Publindústria Portugal, 2007.
- [46] A. M. G. Pinto, "Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos," Master Degree, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 372, 2007.
- [47] J. P. M. Lopes, "Estudo numérico de juntas adesivas em T com substratos de alumínio," Master Degree, Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2020. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10400.22/16322>
- [48] H. M. D. Rumor, "Improvement of the mechanical strength of single lap

- bonded joints using friction stir welding," Master Degree, Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra, 2017.
- [49] D. P. M. G. Antunes, "Understanding Failure of Adhesively Bonded Joints," Master Degree, Aerospace Engineering, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2015.
- [50] E. W. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*. 1999, p. 765.
- [51] M. Banea and L. F. M. Silva, "Adhesively bonded joints in composite materials: An overview," *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-design and Applications - PROC INST MECH ENG L-J MATER*, vol. 223, pp. 1-18, 01/01 2009, doi: 10.1243/14644207JMDA219.
- [52] F. Hayat, "Comparing Properties of Adhesive Bonding, Resistance Spot Welding, and Adhesive Weld Bonding of Coated and Uncoated DP 600 Steel," *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 18, no. 9, pp. 70-78, 2011/09/01/ 2011, doi: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60037-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60037-5).
- [53] A. Higgins, "Adhesive bonding of aircraft structures," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 20, no. 5, pp. 367-376, 2000/01/01/ 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(00\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(00)00006-3).
- [54] L. F. M. Da Silva, A. Öchsner, and R. D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [55] K. Tserpes, "Adhesive Bonding of Aircraft Structures," in *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*, S. Pantelakis and K. Tserpes Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 337-357.
- [56] O. Volkersen, "Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten," *Luftfahrtforschung*, vol. 15, pp. 41-47, 1938.
- [57] M. Goland and E. Reissner, "The stresses in cemented joints," *Journal of Applied Mechanics*, pp. A17-A27, 1944 (11).
- [58] Hart-Smith L.J, "Adhesive-bonded single-lap joints " 1973: *National Aeronautics and Space Administration, USA*
- [59] J. A. Harris and R. A. Adams, "Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 4, no. 2, pp. 65-78, 1984/04/01/ 1984, doi: [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(84\)90103-9](https://doi.org/10.1016/0143-7496(84)90103-9).
- [60] R. Adams and N. Peppiatt, "Stress Analysis of Adhesive-Bonded Lap Joints," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 9, pp. 185-196, 07/01 1974, doi: 10.1243/03093247V093185.
- [61] S. K. Panigrahi and B. Pradhan, "Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 26, no. 2, pp. 183-201, 2007/01/01 2007, doi: 10.1177/0731684407070026.
- [62] X. Zhao, R. Adams, and L. F. M. Silva, "Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Stress and Strain Analysis," *Journal of Adhesion Science and Technology - J ADHES SCI TECHNOL*, vol. 25, pp. 819-836, 02/01 2011, doi: 10.1163/016942410X520871.
- [63] R. D. S. G. Campilho, *Strength prediction of adhesively-bonded joints*. CRC Press, 2017.
- [64] A. A. Griffith, "VI. The phenomena of rupture and flow in solids," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, vol. 221, no. 582-593, pp. 163-198, 1921, doi: 10.1098/rsta.1921.0006.
- [65] G. I. Barenblatt, "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 23, no. 3, pp. 622-636, 1959/01/01/ 1959, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(59\)90157-1](https://doi.org/10.1016/0021-8928(59)90157-1).

- [66] D. S. Dugdale, "Yielding of steel sheets containing slits," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 8, no. 2, pp. 100-104, 1960/05/01/ 1960, doi: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(60\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0022-5096(60)90013-2).
- [67] P. Feraren and H. M. Jensen, "Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 71, no. 15, pp. 2125-2142, 2004/10/01/ 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2003.12.003>.
- [68] K. Duan and Y. W. Mai, "Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints," *Journal of Adhesion Science and Technology - J ADHES SCI TECHNOL*, vol. 18, pp. 39-53, 01/01 2004, doi: 10.1163/156856104322746992.
- [69] A. Turon, J. Costa, P. P. Camanho, and C. G. Dávila, "Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 11, pp. 2270-2282, 2007/11/01/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.11.009>.
- [70] U. T. F. Carvalho and R. Campilho, "Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 77, 04/01 2017, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.04.002.
- [71] L. F. M. da Silva and R. D. S. G. Campilho, "Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints," in *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*, L. F. M. da Silva and R. D. S. G. Campilho Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 1-93.
- [72] H. Khoramishad, A. D. Crocombe, K. B. Katnam, and I. A. Ashcroft, "Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model," *International Journal of Fatigue*, vol. 32, pp. 1146-1158, 2010.
- [73] L. Daudeville and P. Ladevèze, "A damage mechanics tool for laminate delamination," *Composite Structures*, vol. 25, no. 1, pp. 547-555, 1993/01/01/ 1993, doi: [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(93\)90203-3](https://doi.org/10.1016/0263-8223(93)90203-3).
- [74] M. M. A. Wahab, I. A. Ashcroft, A. D. Crocombe, and S. J. Shaw, "Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 15, no. 7, pp. 763-781, 2001/01/01 2001, doi: 10.1163/15685610152540830.
- [75] M. Imanaka, T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, and M. Kimoto, "Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 17, no. 7, pp. 981-994, 2003/01/01 2003, doi: 10.1163/156856103322112888.
- [76] P. Raghavan and S. Ghosh, "A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding," *Mechanics of Materials*, vol. 37, pp. 955-979, 02/10 2005, doi: 10.1016/j.mechmat.2004.10.003.
- [77] V. Shenoy, I. A. Ashcroft, G. Critchlow, and A. D. Crocombe, "Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue," 2012.
- [78] S. Mohammadi, *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. John Wiley & Sons, 2008.
- [79] T. Belytschko and T. Black, "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 45, pp. 601-620, 1999.
- [80] N. Moës, J. Dolbow, and T. Belytschko, "A finite element method for crack growth without remeshing," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 46, no. 1, pp. 131-150, 1999/09/10 1999, doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990910\)46:1<131::AID-NME726>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:1<131::AID-NME726>3.0.CO;2-J).
- [81] Abaqus®, "Documentation. D. Systèmes. 2013: Vélizy-Villacoublay."
- [82] Markforged. "3D Printed Joinery: Simplifying Assembly." <https://markforged.com/resources/blog/joinery-onyx> (accessed).

- [83] Formlabs. "3D Printing Threads and Adding Threaded Inserts to 3D Printed Parts." <https://formlabs.com/blog/adding-screw-threads-3d-printed-parts/> (accessed).
- [84] M. R. Khosravani, P. Soltani, and T. Reinicke, "Failure and fracture in adhesively bonded 3D-printed joints: An overview on the current trends," *Engineering Failure Analysis*, p. 107574, 2023/08/28/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107574>.
- [85] D. K. K. Cavalcanti, M. D. Banea, and H. F. M. Queiroz, "Mechanical characterization of bonded joints made of additive manufactured adherends," *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII, Welding Equipment and Technology*, vol. 30, pp. 27-33, 2019.
- [86] H. Leicht *et al.*, "Adhesive bonding of 3D-printed plastic components," *The Journal of Adhesion*, p. 16, 10/28 2019, doi: 10.1080/00218464.2019.1682561.
- [87] M. Kariz, M. K. Kuzman, and M. Sernek, "Adhesive bonding of 3D-printed ABS parts and wood," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 31, no. 15, pp. 1683-1690, 2017/08/03 2017, doi: 10.1080/01694243.2016.1268414.
- [88] M. R. Khosravani, P. Soltani, K. Weinberg, and T. Reinicke, "Structural integrity of adhesively bonded 3D-printed joints," *Polymer Testing*, vol. 100, p. 107262, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107262>.
- [89] M. R. Khosravani, P. Soltani, and T. Reinicke, "Fracture and structural performance of adhesively bonded 3D-printed PETG single lap joints under different printing parameters," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 116, p. 103087, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103087>.
- [90] R. J. Nash and Y. Li, "Experimental and numerical analysis of 3D printed suture joints under shearing load," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 253, p. 107912, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107912>.
- [91] M. R. Khosravani, P. Soltani, and T. Reinicke, "Effects of steps on the load bearing capacity of 3D-printed single lap joints," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 1834-1847, 2023/03/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.032>.
- [92] A. Spaggiari and F. Favali, "Evaluation of polymeric 3D printed adhesively bonded joints: effect of joint morphology and mechanical interlocking," *Rapid Prototyping Journal*, vol. ahead-of-print, 03/08 2022, doi: 10.1108/RPJ-09-2021-0259.
- [93] N. Lokesh, B. A. Praveena, J. Sudheer Reddy, V. K. Vasu, and S. Vijaykumar, "Evaluation on effect of printing process parameter through Taguchi approach on mechanical properties of 3D printed PLA specimens using FDM at constant printing temperature," *Materials Today: Proceedings*, vol. 52, pp. 1288-1293, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.054>.
- [94] *ASTM D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, A. International, 2014.
- [95] K. Mikula *et al.*, "3D printing filament as a second life of waste plastics—a review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 10, pp. 12321-12333, 2021, doi: 10.1007/s11356-020-10657-8.
- [96] *ISO 527-1 Plastics — Determination of tensile properties 2012*.
- [97] S. Guessasma, S. Belhabib, and H. Nouri, "Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling," *Polymers*, vol. 11, no. 7, 2019, doi: 10.3390/polym11071220.
- [98] R. Zou *et al.*, "Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material," *Composites Part B: Engineering*, vol. 99, pp. 506-513, 2016/08/15/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.009>.
- [99] S. D. M. Pinto, "Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis," Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [100] J. F. A. Morais, "Desenvolvimento de ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST).", Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [101] R. Campilho, M. Banea, J. A. B. P. Neto, and L. F. M. Silva, "Modelling adhesive joints with cohesive zone models: Effect of the cohesive law shape of the adhesive layer,"

- International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 44, pp. 48–56, 07/01 2013, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2013.02.006.
- [102] T. M. S. Faneco, "Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade," 2014.
- [103] O. Allix and A. Corigliano, "Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens," *International Journal of Fracture*, vol. 77, no. 2, pp. 111-140, 1996/06/01 1996, doi: 10.1007/BF00037233.
- [104] G. Alfano and M. A. Crisfield, "Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 50, pp. 1701-1736, 2001.
- [105] N. Chandra, H. Li, C. Shet, and H. Ghonem, "Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, pp. 2827-2855, 05/01 2002, doi: 10.1016/S0020-7683(02)00149-X.
- [106] J. Chen, "Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models," *Journal of Thermoplastic Composite Materials - J THERMOPLAST COMPOS MATER*, vol. 15, pp. 429-442, 09/01 2002, doi: 10.1177/0892705702015005736.
- [107] M. S. Kafkalidis and M. D. Thouless, "The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, no. 17, pp. 4367-4383, 2002/08/01/ 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00344-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00344-X).
- [108] A. Pinto, A. Magalhães, R. Campilho, M. De Moura, and A. Baptista, "Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive," *The Journal of Adhesion*, vol. 85, pp. 351-376, 06/01 2009, doi: 10.1080/00218460902880313.
- [109] R. J. B. Rocha and R. D. S. G. Campilho, "Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints," *The Journal of Adhesion*, vol. 94, no. 7, pp. 562-582, 2018/06/07 2018, doi: 10.1080/00218464.2017.1307107.
- [110] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, and J. J. M. S. Domingues, "Modelling single and double-lap repairs on composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 13, pp. 1948-1958, 2005/10/01/ 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.007>.
- [111] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, and J. J. M. S. Domingues, "Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, no. 5, pp. 1497-1512, 2008/03/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.10.003>.
- [112] M. Lee, T. Cho, W. Kim, B. Lee, and J. Lee, "Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model," *International Journal of Adhesion and Adhesives - INT J ADHES ADHES*, vol. 30, pp. 322-328, 07/01 2010, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2009.10.005.
- [113] Y. Zhu, K. M. Liechti, and K. Ravi-Chandar, "Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces," *Int. J. Solids. Struct.*, vol. 46, no. 1, p. 31, 2009.
- [114] K. Pandya and J. Williams, "Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene," *Polymer Engineering & Science*, vol. 40, pp. 1765-1776, 08/01 2000, doi: 10.1002/pen.11308.
- [115] U. T. F. Carvalho and R. Campilho, "Strength prediction of adhesively-bonded joints with cohesive laws estimated by the direct method," 2019, pp. 279-291.
- [116] *ASTM D3433-99, Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*, 2012.
- [117] C. J. Constante, R. D. S. G. Campilho, and D. C. Moura, "Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 136, pp. 292-304, 2015/03/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.02.010>.

- [118] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, M. D. Banea, and L. F. M. 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*, vol. 53, pp. 15-22, 2014/09/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.01.015>.
- [119] J. R. Rice, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 379-386, 1968, doi: 10.1115/1.3601206.
- [120] U. Stigh, K. S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, and K. Salomonsson, "Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers," (in English), *International Journal of Fracture*, vol. 165, no. 2, pp. 149-162, 2010/10/01 2010, doi: 10.1007/s10704-010-9458-9.
- [121] H. Yoshihara, "Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test," *Engineering Fracture Mechanics - ENG FRACTURE MECH*, vol. 71, pp. 2065-2077, 09/01 2004, doi: 10.1016/j.engfracmech.2003.09.001.
- [122] P. A. Gustafson and A. M. Waas, "The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, no. 10, pp. 2201-2215, 2009/05/15/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.11.016>.
- [123] E. Marques and L. F. M. Silva, "Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches," *Journal of Adhesion - J ADHES*, vol. 84, pp. 915-934, 11/19 2008, doi: 10.1080/00218460802505275.
- [124] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, D. A. Ramantani, J. J. L. Morais, and J. J. M. S. Domingues, "Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, no. 6, pp. 678-686, 2009/09/01/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2009.02.004>.
- [125] J. C. S. Azevedo, "Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)," Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10400.22/7903>
- [126] R. D. S. G. Campilho, A. M. G. Pinto, M. D. Banea, R. F. Silva, and L. F. M. da Silva, "Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 25, no. 18, pp. 2351-2368, 2011/01/01 2011, doi: 10.1163/016942411X580081.

ANEXO A

Ficha técnica do filamento de PLA, da AzureFilm

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

ANEXO B

Ficha técnica do filamento de PETG, da AzureFilm

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

ANEXO C

Ficha técnica do filamento de ABS, da Mitsubishi Chemical Performance Polymers

ABS-X

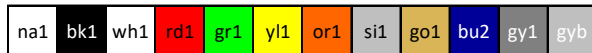
ABS-X is our take on a next-generation ABS filament. By applying our zero-warp technology to the filament we have created a filament with far less cracking, proven near perfect interlayers, reliable bed adhesion (glass, tape & other adhesives) while improving the mechanical properties making ABS-X extra 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.

ANEXO D

Ficha técnica do adesivo Araldite® 2015, da Hunstman

Araldite[®] 2015 Adhesive

Product Description

Araldite[®] 2015 structural adhesive is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It is thixotropic and non-sagging up to 0.394 (10 mm) thickness. It is particularly suitable for SMC and GRP bonding.

Features

- Toughened paste
- Ideal for bonding GRP, SMC and dissimilar substrates
- Low shrinkage
- Gap filling, non-sagging up to 0.394 in (10 mm) thickness
- High shear and peel strength

Typical Properties*

Property	Araldite [®] 2015 A	Araldite [®] 2015 B	Mixed System
Appearance	Neutral paste	Neutral paste	Neutral paste
Density, g/cm ³	~1.4	~1.4	~1.4
Viscosity at 25°C, cP	Thixotropic	Thixotropic	Thixotropic
Pot life at 25°C, 100 g, min	--	--	~30 - 40

*Properties are based on Huntsman test methods. Copies are available upon request

Processing

Mix Ratio

Product	Parts by weight	Parts by volume
Araldite [®] 2015 A	100	100
Araldite [®] 2015 B	100	100

Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, isopropanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low-grade alcohol, gasoline, or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching (“pickling”) the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

Araldite® 2015 structural adhesive is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials.

Application of adhesive

The resin/hardener mix may be applied manually or robotically to the pretreated and dry joint surfaces. Huntsman's technical support group can assist the user in the selection of a suitable application method as well as suggest a variety of reputable companies that manufacture and service adhesive dispensing equipment. A layer of adhesive 0.002 to 0.004 in (0.05 to 0.10 mm) thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. Huntsman stresses that proper adhesive joint design is also critical for a durable bond. The joint components should be assembled and secured in a fixed position as soon as the adhesive has been applied. For more detailed explanations regarding surface preparation and pretreatment, adhesive joint design, and the dual syringe dispensing system, visit www.araldite2000plus.com.

Equipment Maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation. If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Cure times to reach minimum shear strength

Temperature, °F	50	59	73	104	140	212
Cure time to reach LSS* > 145 psi (1 MPa), hours	12	7.5	4	1	-	-
minutes	-	-	-	-	17	6
Cure time to reach LSS > 1450 psi (10 MPa), hours	21	13	6	2	-	-
minutes	-	-	-	-	35	7

*LSS = Lap shear strength

Typical Physical Properties

Advanced Materials

Technical Datasheet

Unless otherwise stated, the data were determined with typical production batches using standard test methods. They are typical values only, and do not constitute a product specification.

Unless a different specification is given, the figures below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 4.5 x 1 x 0.063 in (114 x 25 x 1.6 mm) strips of aluminum alloy. The joint area was 0.5 x 1 in (12.5 x 25 mm) in each case. Samples were cured at 104°F (40°C) for 16 hours and tested at 23°C, unless otherwise noted.

Property	Value			Test Method
Average lap shear strength, metal-metal joints, sand blasting pre-treatment, psi				ISO 4587
Aluminum	2,408			
Steel 37/11	2,886			
Stainless steel V4A	2,640			
Galvanized steel	1,566			
Copper	2,872			
Brass	3,075			
Average lap shear strength, plastic-plastic joints, lightly abrade and alcohol degrease pre, psi				ISO 4587
GRP	1,334			
CFRP	2,074			
SMC	1,015			
ABS	580			
PVC	580			
PMMA	334			
Polycarbonate	435			
Polyamides	276			
Lap shear strength, after immersion in 23°C media, psi	30 days	60 days	90 days	ISO 4587
As-made value	--	--	2,408	
IMS	--	--	2,002	
Gasoline	--	--	2,509	
Ethyl acetate	--	--	1,784	
Acetic acid, 10%	--	827	--	
Xylene	--	--	2,045	
Lubricating oil	--	--	3,002	
Paraffin	--	--	2,683	
Water at 73°F	--	--	1,450	
Water at 140°F	--	--	1,900	
Water at 194°F	1624	--	1,523	
Lap shear strength, exposure to tropical weather,* psi				ISO 4587 / DIN 50015
As-made value	2,408			
30 days	1,871			
60 days	1,871			
90 days	2,263			

Advanced Materials

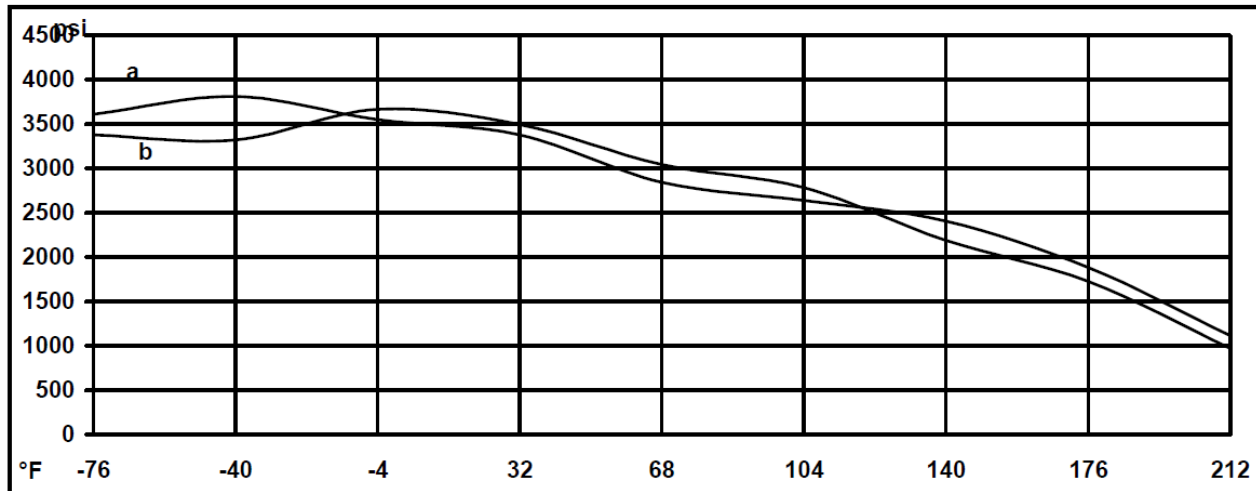
Technical Datasheet

Lap shear strength, heat aging at 158°F, psi		ISO 4587
As-made value	2,408	
30 days	2,814	
60 days	3,321	
90 days	3,292	
Thermal cycling [†]	3,002	
Roller peel test, pli (N/mm)	23 (4.0)	ISO 4578
Glass transition temperature, T _g , °F (°C)		
Cure: 16 h at 104°F (40°C)	153 (67) by DSC	Huntsman
1 h at 176°F (80°C)	189 (87) by shear modulus	DIN 53445
Dielectric constant (500v at 25°C), at 1 kHz	5.6	
Flexural strength, psi (MPa)	6,193 (42.7)	ISO 178
Flexural modulus, psi (MPa)	263,040 (1813.6)	ISO 178
Tensile strength, psi (MPa)	4351 (30)	ISO 527
Tensile modulus, psi (MPa)	290,075 (2)	ISO 527
Elongation at tensile break, %	4.4	ISO 527
Shear modulus, cure 1 h at 176°F, psi (GPa)		DIN 53445
32°F		
G'	145,038 (1.0)	
Λ	0.25	
77°F		
G'	130,534 (0.9)	
Λ	0.25	
122°F		
G'	116,030 (0.8)	
Λ	0.35	
167°F		
G'	29,008 (0.2)	
Λ	1.9	
212°F		
G'	290 (0.002)	
Λ	0.5	
Resistance to fatigue, 40 Hz at 23°C	Cycles to failure	Static failing load: 2321 psi (16 MPa)
Maximum applied load:		
20% of static failing load		
Sandblasted aluminum	>10 ⁷	
Chromate pickled aluminum	>10 ⁷	
25% of static failing load		
Sandblasted aluminum	>10 ⁷	
Chromate pickled aluminum	>10 ⁷	
30% of static failing load		
Sandblasted aluminum	3 x 10 ⁶	
Chromate pickled aluminum	8 x 10 ⁵	

*40/92, DIN 50015; typical average values; test at 23°C.

[†]25 cycles -22°F to 158°F (-30°C to + 70°C).

Figure 1. Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)
Cure: (a) = 7 days at 73°F (23°C); (b) = 24 hours at 73°F (23°C) + 30 min / 176°F (80°C)



Storage

Araldite® 2015 Adhesive should be stored in a dry place, in the original sealed containers, at temperatures between 2°C and 40°C (36°F and 104°F). Under these storage conditions, the product has a shelf life of **3 years** (from date of manufacture). The product should not be exposed to direct sunlight.

If stored below 60°F, the adhesive should be brought to 60°F - 77°F and conditioned at this temperature for some time prior to use.

Precautionary Statement

Huntsman Advanced Materials Americas LLC maintains up-to-date Safety Data Sheets (SDS) on all of its products. These sheets contain pertinent information that you may need to protect your employees and customers against any known health or safety hazards associated with our products. Users should review the latest MSDS to determine possible health hazards and appropriate precautions to implement prior to using this material.

First Aid!

Refer to SDS as mentioned above.

KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN

FOR PROFESSIONAL AND INDUSTRIAL USE ONLY

Important Legal Notice

Sales of the product described herein ("Product") are subject to the general terms and conditions of sale of either Huntsman Advanced Materials LLC, or its appropriate affiliate including without limitation Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., or Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd. ("Huntsman"). The following supercedes Buyer's documents.

Huntsman warrants that at the time and place of delivery all Products sold to Buyer shall conform to the specifications provided to Buyer by Huntsman.

While the information and recommendations included in this publication are, to the best of Huntsman's knowledge, accurate as of the date of publication, NOTHING CONTAINED HEREIN (EXCEPT AS SET FORTH ABOVE REGARDING CONFORMANCE WITH SPECIFICATIONS PROVIDED TO BUYER BY HUNTSMAN) IS TO BE CONSTRUED AS A REPRESENTATION OR WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NONINFRINGEMENT OF ANY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS, OR WARRANTIES AS TO QUALITY OR CORRESPONDENCE WITH PRIOR DESCRIPTION OR SAMPLE, AND THE BUYER ASSUMES ALL RISK AND LIABILITY WHATSOEVER RESULTING FROM THE USE OF SUCH PRODUCT, WHETHER USED SINGLY OR IN COMBINATION WITH OTHER SUBSTANCES.

No statements or recommendations made herein are to be construed as a representation about the suitability of any Product for the particular application of Buyer or user or as an inducement to infringe any patent or other intellectual property right. Buyer is responsible to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any Product for its own particular purpose, and to ensure that its intended use of the Product does not infringe any intellectual property rights.

The Product may be or become hazardous. The Buyer should obtain Material Safety Data Sheets and Technical Data Sheets from Huntsman containing detailed information on Product hazards and toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures for the Product, and should comply with all applicable governmental laws, regulations and standards relating to the handling, use, storage, distribution and disposal of, and exposure to the Product. Buyer shall also take all steps necessary to adequately inform, warn and familiarize its employees, agents, direct and indirect customers and contractors who may handle or be exposed to the Product of all hazards pertaining to and proper procedures for safe handling, use, storage, transportation and disposal of and exposure to the Product, and the containers or equipment in which the Product may be handled, shipped or stored.

Araldite is a registered trademark of Huntsman LLC or an affiliate thereof in one or more, but not all countries.

© 2015 Huntsman Advanced Materials Inc.

Main Offices:

Huntsman Corporation
10003 Woodloch Forest Dr
The Woodlands, TX 77380
888-564-9318

Huntsman Advanced Technology Center
8600 Gosling Rd.
The Woodlands, TX 77381
281-719-7400

ANEXO E

Ficha técnica do adesivo Sikaforce®7752, da Sika

SikaForce® -7752 FRW L60

Der schwerentflammbare standfeste strukturelle Klebstoff

Technische Eigenschaften

	Komponente A (Harz) SikaForce® -7752 FRW L60	Komponente B (Härter) SikaForce® -7752 B
Chemische Basis	Polyole, gefüllt	Isocyanatderivate, ungefüllt
Farbe	Weiss	Braun, transparent
Mischfarbe	Beige	
Härtungsmechanismus	Polyaddition	
Dichte (25 °C)	ca. 1,6 kg / l	ca. 1,2 kg / l
Festkörpergehalt	100%	100%
Mischungsverhältnis	Volumen Gewicht	27 20
Viskosität (20 °C), P/P 30 mm, 0,2 mm Spalt	ca. 200.000 mPas (standfest)	ca. 200 mPas
Mischviskosität (20 °C), P/P 30 mm, 0,2 mm Spalt	ca. 70.000 mPas (standfest)	
Verarbeitungstemperatur	15 – 30 °C	
Topfzeit 20 °C ¹⁾	ca. 60 min	
Shore-D-Härte ²⁾ (DIN 53505)	ca. 60	
Zugfestigkeit ²⁾⁴⁾ (ISO 527)	ca. 10 MPa	
Bruchdehnung ²⁾⁴⁾ (ISO 527)	ca. 25 %	
Zugscherfestigkeit ²⁾³⁾ (DIN EN 1465)	ca. 10 MPa (abhängig vom Untergrund)	
Anfangsfestigkeit (0,5 MPa)	ca. 5h 23 °C / 110 min 40 °C / 35 min 60 °C	
Winkelschälfestigkeit ²⁾ (DIN 53282)	ca. 120 N/3 cm	
Haltbarkeit in ungeöffnetem Gebinde	6 Monate	12 Monate

¹⁾ Viskositätsanstieg bis 150.000 mPas im Rheolab MC 10

²⁾ Prüftemperatur: 23 °C, 50 % relative Luftfeuchtigkeit; Aushärtung: 48 Std. RT + 3 Std. 105 °C + 24 Std. RT

³⁾ Substrat: AlCuMg₂ platinert; Klebstoffschichtdicke: 1,5 mm ⁴⁾ Schichtdicke der Zugprüfkörper: 4 mm

Beschreibung

SikaForce® -7752 FRW L60 ist ein nach IMO FTPC Teil 5 schwerentflammbares 2K-Klebstoff-System, welches aus einem gefüllten polyolbasierenden Harz und einem isocyanatbasierenden Härter besteht. Die zwei Komponenten werden mit geeigneten Pumpanlagen dosiert, gemischt und aufgetragen.

SikaForce® -7752 FRW L60 wird nach dem Qualitätssicherungssystem ISO 9001 / 14001 und dem Responsible Care Programm hergestellt.

Produktvorteile

- Schwerentflammbar
- Raumtemperaturhärtend
- Alterungsbeständig
- Standfest
- PVC- und lösungsmittelfrei
- Gute Schlagzähigkeit
- Hervorragende Kälteflexibilität

Anwendungsbereich

SikaForce® -7752 FRW L60 ist ein standfester zweikomponentiger Polyurethanklebstoff mit breitem Haftspektrum für strukturelle Verklebungen.

Dieses Produkt ist nur für erfahrene Anwender geeignet. Um Haftung und Materialverträglichkeit gewährleisten zu können, müssen Vorversuche mit Originalmaterialien unter den jeweiligen Bedingungen durchgeführt werden.



Härtungsmechanismus

Die Aushärtung von SikaForce®-7752 FRW L60 erfolgt durch Reaktion der beiden Komponenten. Hohe Temperaturen beschleunigen, niedrige Temperaturen verlangsamen die Aushärtung.

Chemische Beständigkeit

SikaForce®-7752 FRW L60 ist hydrolysebeständig. Die Beständigkeit gegen Chemikalien ist immer von der Beschaffenheit des Untergrundes, Konzentration, Temperatur und Einwirkungsdauer abhängig. Das gleiche gilt auch bezüglich Temperaturen. Ohne Chemikalieneinwirkung ist der Klebstoff dauerhaft beständig bis 120 °C, kurzfristig kann der Klebstoff auch höheren Temperaturen ausgesetzt werden.

Bei vorhersehbarer chemischer oder thermischer Belastung ist eine objektbezogene Prüfung notwendig.

Verarbeitungshinweise

Untergrundvorbereitung

Die Untergründe müssen sauber, trocken und frei von Verunreinigungen (Fette, Öle, staubförmige Ablagerungen) sein. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Untergründe und der mechanischen Anforderungen an den Klebstoff werden Vorversuche und eine objektbezogene Beratung empfohlen.

Verarbeitung

Die Dosierung des Klebstoffes erfolgt mittels geeigneter Dosiermaschinen mit dynamischen oder statischen Mischköpfen im Raupen- oder Sprühauftrag. Die Verarbeitungstemperatur sollte oberhalb 15 °C liegen. Für weitere Informationen zur Auswahl geeigneter Verarbeitungsgeräte setzen Sie sich bitte mit der Abteilung System Engineering der Sika Industry in Verbindung.

Reinigung

Nicht ausgehärtetes SikaForce®-7752 FRW L60 kann von Geräten und Werkzeugen mit Sika® Remover-208 entfernt werden. Ausgehärtetes Material kann nur noch mechanisch entfernt werden. Hände/Haut sollten sofort mit Sika® Handclean oder einer geeigneten Handwaschpaste und Wasser gereinigt werden. Keine Lösemittel verwenden!

Lagerung

Trocken und zwischen 10 °C und 30 °C. Vor direktem Sonnenlicht und Frost schützen. Nach Produktentnahme müssen die Gebinde umgehend wieder luftdicht verschlossen werden, um das Material vor Luftfeuchtigkeit zu schützen.

Zu Transportzwecken dürfen die Komponenten kurzfristig Temperaturen bis -10 °C während maximal 3 Tagen ausgesetzt werden. Kristallisierte oder nicht homogene Komponenten dürfen nicht verwendet werden.

Weitere Informationen

Folgende Dokumente sind auf Anfrage erhältlich:
- Sicherheitsdatenblatt

Gebinde

SikaForce®-7752 FRW L60

Komponente A	Eimer	7,5 kg
--------------	-------	--------

SikaForce®-7752 B

Komponente B	Dose	1,5 kg
	Kanister	2 kg
	Hobbock	25 kg
	Fass	250 kg

Hinweis Messwerte

Alle technischen Daten, Maße und Angaben in diesem Datenblatt beruhen auf Labortests. Tatsächlich gemessene Daten können in der Praxis aufgrund von Umständen außerhalb unseres Einflussbereiches abweichen.

Arbeitsschutzbestimmungen

Für den Umgang mit unseren Produkten sind die wesentlichen physikalischen, sicherheitstechnischen, toxikologischen und ökologischen Daten den stoffspezifischen Sicherheitsdatenblättern zu entnehmen. Die einschlägigen Vorschriften, wie z.B. die Gefahrstoffverordnung, sind zu beachten. Auf Wunsch stellen wir Ihnen unser System-Merkblatt TM 7510 "Allgemeine Hinweise zum Arbeitsschutz" beim Umgang mit Produkten der Sika Deutschland GmbH zur Verfügung.

Hinweis

Die vorstehenden Angaben, insbesondere die Vorschläge für Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen im Normalfall, vorausgesetzt die Produkte wurden sachgerecht gelagert und angewandt. Wegen unterschiedlichen Materialien und Untergründen sowie abweichenden Arbeitsbedingungen kann eine Gewährleistung eines Arbeitsergebnisses oder eine Haftung, aus welchem Rechtsverhältnis auch immer, weder aus diesen Hinweisen noch aus einer mündlichen Beratung begründet werden, es sei denn, dass uns insoweit Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt. Hierbei hat der Anwender nachzuweisen, dass schriftlich alle Kenntnisse, die zur sachgemäßen und erfolgversprechenden Beurteilung durch Sika erforderlich sind, Sika rechtzeitig und vollständig übermittelt wurden. Der Anwender hat die Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck zu prüfen. Änderungen der Produktspezifikationen bleiben vorbehalten. Schutzrechte Dritter sind zu beachten. Im Übrigen gelten unsere jeweiligen aktuellen Verkaufs-, Liefer- und Zahlungsbedingungen. Es gilt das jeweils neueste lokale Produktdatenblatt, das von uns angefordert werden sollte oder im Internet unter www.sika.de heruntergeladen werden kann.

Weitere Informationen:
www.sika.de, E-Mail: industry@de.sika.com
www.sika.com

Sika Deutschland GmbH
Stuttgarter Str. 139
72574 Bad Urach
Deutschland
Tel. +49 7125 940 761
Fax +49 7125 940 763

