



Caracterização experimental e numérica de juntas adesivas com aderentes compósitos fabricados por impressão 3D

JOÃO ANDRÉ CARVALHO VILARES

outubro de 2025

Caracterização experimental e numérica de juntas adesivas com aderentes compósitos fabricados por impressão 3D

João André Carvalho Vilares

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

**Orientador: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, ISEP
Coorientador: João Augusto de Sousa Bastos, ISEP**

Júri:

Presidente:

Elza Maria Morais Fonseca, Professor Coordenador com Agregação, ISEP

Vogais:

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Coordenador com Agregação, ISEP

Mariana Doina Banea, Professor Auxiliar, UA

Porto, setembro 2025

Agradecimentos

A concretização desta dissertação de mestrado só foi possível graças ao apoio e contributo de várias pessoas e instituições, a quem desejo expressar a minha mais profunda gratidão.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela orientação rigorosa, pela disponibilidade constante e pela exigência científica, que foram determinantes para a evolução deste trabalho.

Ao meu coorientador, Doutor João Augusto de Sousa Bastos, deixo um agradecimento muito especial pelo apoio essencial na área da impressão 3D, pela proximidade e pela partilha de conhecimento prático, que permitiram ultrapassar muitos dos desafios encontrados durante a parte experimental.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, e em particular ao Departamento de Engenharia Mecânica, agradeço as condições laboratoriais e os recursos disponibilizados, que tornaram possível a realização deste estudo com qualidade e rigor.

Aos meus colegas de mestrado, agradeço a amizade, a entreaajuda e os momentos de partilha que fizeram deste percurso algo mais leve, mais humano e mais enriquecedor.

À minha família, devo tudo o que alcancei até hoje. Aos meus pais, agradeço o amor incondicional, a paciência infinita e o exemplo de dedicação, esforço e resiliência que sempre me transmitiram. Foram, e continuarão a ser, a minha maior inspiração. Sem o vosso apoio constante, este caminho não teria sido possível.

À minha namorada, agradeço de forma sentida a compreensão, o carinho e o apoio constante, fundamentais para ultrapassar os momentos mais exigentes deste percurso académico.

Por fim, a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho, expressei o meu mais sincero agradecimento.

Resumo

Observa-se uma necessidade crescente de explorar soluções de união estrutural em materiais produzidos por fabrico aditivo uma vez que, apesar da flexibilidade e vantagens da impressão 3D, subsistem limitações no fabrico de peças de grandes dimensões e na resistência intrínseca dos materiais compósitos impressos. As juntas adesivas assumem-se, assim, como uma alternativa eficiente aos métodos tradicionais, pois permitem a união de diferentes componentes sem comprometer as propriedades mecânicas, reduzem concentrações de tensões e ampliam as possibilidades de aplicação destes materiais em contextos industriais. A presente dissertação pretendeu caracterizar experimentalmente e numericamente juntas adesivas com aderentes com e sem reforço de fibras de carbono fabricados por impressão 3D. Inicialmente, foi conduzido um trabalho experimental que incluiu a produção de provetes em poliamida com e sem reforço de fibra de carbono. Estes provetes foram submetidos a ensaios de tração para determinação das propriedades mecânicas e, posteriormente, utilizados na fabricação de três tipologias distintas de juntas adesivas: juntas de sobreposição simples, juntas em degrau e juntas de chanfro interior. Através destes ensaios foi possível recolher informação relativa à rigidez, resistência máxima, modos de rotura e energia de fratura, bem como observar o comportamento diferenciado de cada configuração geométrica. Em paralelo, foi desenvolvido um modelo numérico com recurso ao Método dos Elementos Finitos, implementado em Abaqus®, que aplicou um modelo de dano coesivo baseado numa lei triangular para modelar o comportamento do adesivo. Os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais. Como resultado do trabalho realizado foi validada a técnica numérica para a previsão da resistência das juntas adesivas e recomendada a geometria de junta para maximizar a resistência. Assim, tanto os ensaios experimentais como as simulações numéricas comprovaram a aplicabilidade das juntas adesivas em materiais fabricados por impressão 3D. A junta de chanfro interior destacou-se como a mais promissora, conjugando maior resistência, melhor distribuição de tensões e maior capacidade de dissipação de energia, pelo que representa a solução mais eficaz para aplicações estruturais que exijam desempenho mecânico elevado e fiabilidade.

Palavras-chave: Impressão 3D, Juntas adesivas, Método dos Elementos Finitos (MEF), Modelo de dano coesivo, Resistência estrutural, Modo e Energia de rotura.

Abstract

There is a growing need to explore structural bonding solutions in materials produced by additive manufacturing because, despite the flexibility and advantages of 3D printing, there are still limitations in the manufacture of large parts and in the intrinsic strength of printed composite materials. Adhesive joints are therefore an efficient alternative to traditional methods, as they allow different components to be joined without compromising mechanical properties, reduce stress concentrations, and expand the possibilities for applying these materials in industrial contexts. This dissertation aimed to experimentally and numerically characterize adhesive joints having adherends with and without carbon fiber reinforcement manufactured by 3D printing. Initially, experimental work was conducted that included the production of polyamide test specimens with and without carbon fiber reinforcement. These specimens were subjected to tensile tests to determine their mechanical properties and were subsequently used in the manufacture of three different types of adhesive joints: single-lap joints, step joints, and scarf joints. Through these tests, it was possible to collect information on stiffness, maximum strength, failure modes, and fracture energy, as well as to observe the different behavior of each geometric configuration. In parallel, a numerical model was developed using the Finite Element Method, implemented in Abaqus®, which applied a cohesive zone model based on a triangular law to model the behavior of the adhesive. The numerical results were compared with the experimental results. As a result of the work carried out, the numerical technique to predict the strength of adhesive joints was validated and the joint geometry to maximize strength recommended. Both experimental tests and numerical simulations have proven the applicability of adhesive joints in materials manufactured by 3D printing. The scarf joint stood out as the most promising, combining greater strength, better stress distribution and greater energy dissipation capacity, making it the most effective solution for structural applications that require high mechanical performance and reliability.

Keywords: 3D printing, Adhesive joints, Finite Element Method (FEM), Cohesive zone model, structural strength, Failure mode and fracture energy.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Acrónimos e Símbolos.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura do relatório.....	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Fabrico aditivo de polímeros.....	5
2.1.1. Caracterização do processo	5
2.1.2. Vantagens e limitações	5
2.1.3. Categorias de fabrico aditivo	6
2.1.4. Fabrico aditivo de materiais compósitos	8
2.1.4.1. Princípios de fabrico aditivo de materiais compósitos.....	8
2.1.4.2. Categorias para materiais compósitos	9
2.1.4.3. Equipamentos disponíveis no mercado	12
2.1.5. Perspetivas de desenvolvimentos futuros.....	12
2.2. Ligações adesivas	15
2.2.1. Generalidades e caracterização	15
2.2.2. Comparação com métodos tradicionais de ligação	16
2.2.3. Aplicações industriais.....	17
2.2.4. Adesivos estruturais.....	18
2.2.5. Configuração típicas de juntas	19
2.2.6. Práticas e métodos de fabrico	21
2.2.7. Estado-da-arte	22
2.3. Previsão de resistência de juntas adesivas	23
2.3.1. Mecânica dos meios contínuos.....	24
2.3.1.1. Métodos analíticos.....	25
2.3.1.2. Métodos numéricos	25
2.3.1.3. Critérios de rotura	25

2.3.2. Mecânica da fratura.....	26
2.3.3. Modelos de dano coesivo	27
2.3.4. Mecânica do dano.....	28
2.3.5. Método de elementos finitos eXtendido.....	29
2.3.6. Métodos sem malha	30
2.3.7. Estado-da-arte	30
3. Desenvolvimento	33
3.1. Planeamento de experiências	33
3.2. Geometria selecionada	35
3.3. Materiais utilizados	36
3.3.1. Aderente	36
3.3.2. Adesivo.....	37
3.4. Trabalho experimental.....	37
3.4.1. Determinação das propriedades dos aderentes.....	37
3.4.1.1. Fabrico de provetes <i>bulk</i>	38
3.4.1.2. Ensaio de tração	39
3.4.1.3. Modos de rotura	40
3.4.1.4. Curvas $P-\delta$	41
3.4.1.5. Curvas $\sigma-\varepsilon$ nominais e reais.....	42
3.4.1.6. Resumo e análise de resultados.....	44
3.4.2. Determinação das propriedades das juntas adesivas.....	46
3.4.2.1. Processo de fabrico	46
3.4.3. Juntas de sobreposição simples.....	49
3.4.3.1. Modos de rotura	49
3.4.3.2. Curvas $P-\delta$	50
3.4.3.3. Rigidez das juntas	52
3.4.3.4. Resistência das juntas	53
3.4.3.5. Energias de rotura	54
3.4.4. Juntas em degrau	56
3.4.4.1. Modos de rotura	56
3.4.4.2. Curvas $P-\delta$	57
3.4.4.3. Rigidez das juntas	59
3.4.4.4. Resistência das juntas	60
3.4.4.5. Energias de rotura	61
3.4.5. Juntas de chanfro interior.....	62
3.4.5.1. Modos de rotura	62
3.4.5.2. Curvas $P-\delta$	64
3.4.5.3. Rigidez das juntas	65
3.4.5.4. Resistência das juntas	66
3.4.5.5. Energias de rotura	67
3.5. Trabalho numérico	68

3.5.1. Preparação dos modelos numéricos.....	68
3.5.2. Modelo coesivo triangular	73
3.5.3. Determinação dos parâmetros coesivos	75
3.5.4. Juntas de sobreposição simples.....	77
3.5.4.1. Modos de rotura	77
3.5.4.2. Curvas $P-\delta$	79
3.5.4.3. Rigidez das juntas	80
3.5.4.4. Resistência das juntas	81
3.5.4.5. Energias de rotura	82
3.5.5. Juntas em degrau	82
3.5.5.1. Modos de rotura	82
3.5.5.2. Curvas $P-\delta$	86
3.5.5.3. Rigidez das juntas	87
3.5.5.4. Resistência das juntas	88
3.5.5.5. Energias de rotura	88
3.5.6. Juntas de chanfro interior.....	89
3.5.6.1. Modos de rotura	89
3.5.6.2. Curvas $P-\delta$	91
3.5.6.3. Rigidez das juntas	92
3.5.6.4. Resistência das juntas	93
3.5.6.5. Energias de rotura	94
3.6. Estudo comparativo	94
3.6.1. Modos de rotura	95
3.6.2. Curvas $P-\delta$	96
3.6.3. Rigidez das juntas.....	100
3.6.4. Resistência das juntas	103
3.6.5. Energias de rotura.....	106
4. Conclusão	111
4.1. Conclusões finais	111
4.2. Limitações e trabalhos futuros.....	112
Referências.....	113
Declaração de Integridade	121
Apêndice A - Dimensões provetes	123
Anexo A- Ficha técnica STYX PA6	127
Anexo B- Ficha técnica STYX PA6-CF15	129
Anexo C- Ficha técnica Alraldite 2015.....	131

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema do <i>contour crafting</i> [7]	7
Figura 2 - Esquema do <i>powder bed fusion</i> [1].....	8
Figura 3 - Princípios de fabrico aditivo de materiais compósitos (adaptado de [1])	9
Figura 4- Esquema do <i>fused filament fabrication</i> [12].....	10
Figura 5 - Esquema do <i>powder printing</i> [14].....	10
Figura 6 -Esquema do <i>selective laser sintering</i> [15].....	11
Figura 7 - Esquema da <i>stereolithography</i> [16].....	12
Figura 8- Tecnologia + LAB ATROPOS a) luz UV e b) deposição de fibras contínuas [24].....	14
Figura 9 - Tecnologia de deposição de fibras embebidas em resina foto-curáveis [26].....	15
Figura 10 - Constituintes de uma junta adesiva [29]	15
Figura 11 - Distribuição de tensões nas ligações (adaptado de [32])	17
Figura 12 - Configuração típica de juntas (adaptado de [34])	20
Figura 13 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [68]).....	27
Figura 14 - Prusa MK3S	34
Figura 15 - Geometria de juntas utilizada	35
Figura 16 - Provete segundo a norma ASTM D638-14.....	38
Figura 17 - Provetes <i>bulk</i> (1-4 provetes em PA s/FC, 5-8 provetes em PA c/FC).....	39
Figura 18 - Máquina de ensaios <i>Shimadzu Autograph AG-X 100</i>	40
Figura 19 - Provete com extensómetro durante ensaio de tração	40
Figura 20 - Modos de rotura dos provetes <i>bulk</i>	41
Figura 21 - Curvas $P-\delta$ dos provetes: a) PA s/FC; b) PA c/FC.....	42
Figura 22 - Curvas $\sigma-\epsilon$ dos provetes: a) PA s/FC; b) PA c/FC.....	43
Figura 23 - Tensão limite elástico à tração	43
Figura 24 - Fabrico de provetes: a) Superfície lixada no provete; b) provete em <i>gabarit</i>	46
Figura 25 - Provete com o fio de pesca com diâmetro calibrado de 0,2 mm	47
Figura 26 - Aplicação do adesivo.....	47
Figura 27 - Processo de cura de juntas adesivas: a) Exemplo de fixação individual dos provetes com recurso a grampos de aperto; b) Vista superior do conjunto de provetes em fase de cura, devidamente alinhados e pressionados; c) Estrutura de suporte utilizada para garantir a pressão e o posicionamento corretos durante a cura.	48
Figura 28 - Remoção de excessos; a) antes de remover excessos; b) depois de remover excessos	48
Figura 29 - Modo de rotura para provetes de sobreposição simples.....	50
Figura 30 - Curvas $P-\delta$ para juntas de sobreposição simples: em (a) e (b) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 5 mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 10 mm, respetivamente; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 20 mm	51
Figura 31 - Esquema de cálculo da energia de rotura.....	55

Figura 32 - Modo de rotura para provetes com comprimento de degrau de 5 mm	57
Figura 33 - Curvas $P-\delta$ para juntas em degrau: em (a) corresponde aos provetes em PA s/FC e em (b) aos provetes em PA c/FC com $L_o=5$ mm; em (c) e (d) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) mostram-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.	58
Figura 34 - Modo de rotura para provetes com comprimento de chanfro	63
Figura 35 - Curvas $P-\delta$ para juntas de chanfro interior: em (a) encontram-se os provetes em PA s/FC e em (b) os provetes em PA c/FC com $L_o=5$ mm; em (c) e (d) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) ilustram-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.	64
Figura 36 - Processo de criação do modelo	69
Figura 37 - Provede desenhado num só corpo	69
Figura 38 - Geometria utilizada no estudo: a) Junta de sobreposição simples; b) Junta <i>scarf</i> ; c) Junta <i>step</i>	69
Figura 39 - Propriedades do adesivo utilizado	70
Figura 40 - Propriedades do PA	71
Figura 41 - Propriedades do PA c/FC	71
Figura 42 - Tamanho do incremento utilizado	72
Figura 43 - Força aplicada	72
Figura 44 - Malhas aplicadas a cada geometria no ABAQUS®: a) sobreposição simples com $L_o=20$ mm; b) <i>step</i> com $L_o=10$ mm; c) <i>scarf</i> com $L_o=20$ mm	73
Figura 45 - Modelo coesivo triangular [108]	74
Figura 46 - Geometria do provede DCB (a); Geometria do provede ENF (b)	76
Figura 47 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de sobreposição simples ($L_o=5$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	78
Figura 48 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de sobreposição simples ($L_o=10$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	78
Figura 49 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de sobreposição simples ($L_o=20$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	79
Figura 50 - Curvas $P-\delta$ numéricas para juntas de sobreposição simples: em (a) e (b) surgem os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=5$ mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.	80
Figura 51 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=5$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	83
Figura 52 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=10$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	84
Figura 53 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=10$ mm) com fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	85
Figura 54 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=20$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	85
Figura 55 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=20$ mm) com fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	86

Figura 56 - Curvas $P-\delta$ numéricas para juntas em degrau: em (a) e (b) encontram-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=5$ mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm..	87
Figura 57 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de chanfro interior ($L_o=5$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	90
Figura 58 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de chanfro interior ($L_o=10$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	91
Figura 59 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de chanfro interior ($L_o=20$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura	91
Figura 60 - Curvas $P-\delta$ numéricas para juntas de chanfro interior: em (a) e (b) estão representados os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=5$ mm; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.	92
Figura 61 - Curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais para juntas de sobreposição simples: em (a) e (b) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 5 mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 10 mm, respetivamente; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 20 mm, respetivamente.....	97
Figura 62 - Curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais para juntas em degrau.....	98
Figura 63 - Curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais para juntas de chanfro interior	99
Figura 64 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples	101
Figura 65 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau	102
Figura 66 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior	103
Figura 67 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples	104
Figura 68 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau	105
Figura 69 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior	106
Figura 70 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples	107
Figura 71 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau	108
Figura 72 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior	110

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Equipamentos disponíveis no mercado	12
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas (adaptado de [29-31]).....	16
Tabela 3 - Comparação entre ligações mecânicas, soldadas e adesivas (adaptado de [32])	16
Tabela 4 - Aplicações industriais das ligações adesivas [32].....	17
Tabela 5 - Famílias de adesivos estruturais (adaptado de [33])	19
Tabela 6 - Esforços aplicados às juntas de ligação adesiva [34]	19
Tabela 7 - Estudos realizados de ligações adesivas	22
Tabela 8 - Critérios de rotura utilizados por diferentes autores (τ : Tensão de corte; τ_r : Resistência ao corte; σ : Tensão normal; σ_r : Resistência à tração; γ : Deformação angular plástica; γ_p : Plastic shear failure strain; GY: Cedência generalizada; ϵ_e : Equivalent strain (von Mises); ϵ_r : Tensile failure strain; σ_{comp} : Tensão axial à compressão) [51]	26
Tabela 9 - Estudos relacionados com a previsão de resistência de juntas adesivas.....	30
Tabela 10 - Parâmetros de impressão	34
Tabela 11 - Propriedades dos aderentes [94, 95]	37
Tabela 12 - Propriedades mecânicas e de fratura Araldite 2015® [97]	37
Tabela 13 - Propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração nos provetes de PA s/FC	44
Tabela 14 - Propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração nos provetes de PA c/FC	44
Tabela 15 - Modo de rotura para provetes para provetes de sobreposição simples	49
Tabela 16 - Rigidez das juntas adesivas de sobreposição simples	52
Tabela 17 - Resistência das juntas adesivas de sobreposição simples	53
Tabela 18 - Energia de rotura das juntas adesivas de sobreposição simples	55
Tabela 19 - Modo de rotura para provetes com comprimento de degrau de 5 mm	57
Tabela 20 - Rigidez das juntas adesivas em degrau	59
Tabela 21 - Resistência das untas adesivas em degrau	60
Tabela 22 - Energia de rotura de juntas adesivas em degrau	61
Tabela 23 - Modo de rotura para provetes com comprimento de chanfro	63
Tabela 24 - Rigidez das juntas adesivas de chanfro interior	65
Tabela 25 - Resistência das juntas adesivas de chanfro interior	66
Tabela 26 - Energia de rotura de juntas adesivas de chanfro interior	67
Tabela 27 - Modo de rotura numérico para provetes de sobreposição simples	77
Tabela 28 - Rigidez numérica das juntas adesivas de sobreposição simples	81
Tabela 29 - Resistência numérica das juntas adesivas de sobreposição simples	81
Tabela 30 - Energia numérica de rotura das juntas adesivas de sobreposição simples	82
Tabela 31 - Modo de rotura numérico para juntas em degrau	83
Tabela 32 - Rigidez numérica das juntas adesivas em degrau	88
Tabela 33 - Resistência numérica das juntas adesivas em degrau	88
Tabela 34 - Energia numérica de rotura das juntas adesivas em degrau	89
Tabela 35 - Modo de rotura numérico para juntas de chanfro interior	89

Tabela 36 - Rigidez numérica das juntas adesivas de chanfro interior	93
Tabela 37 - Resistência numérica das juntas adesivas de chanfro interior	93
Tabela 38 - Energia numérica de rotura das juntas adesivas de chanfro interior	94
Tabela 39 - Comparação de modos de rotura experimentais e numéricos para junta de sobreposição simples	95
Tabela 40 - Comparação de modos de rotura experimentais e numéricos para junta em degrau	95
Tabela 41 - Comparação de modos de rotura experimentais e numéricos para junta de chanfro interior	96
Tabela 42 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples	100
Tabela 43 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau	101
Tabela 44 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior	102
Tabela 45 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples	103
Tabela 46 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau	104
Tabela 47 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior	105
Tabela 48 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples	107
Tabela 49 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau	108
Tabela 50 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior	109

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End Notched Flexure</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
GI	Energia de fratura em modo I
GII	Energia de fratura em modo II
GY	Cedência generalizada
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JSS	Junta de Sobreposição Simples
MDC	Modelo de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
PA c/FC	Poliamida com fibra de carbono
PA s/FC	Poliamida sem fibra de carbono
PLA	Poliácido láctico
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
UV	Ultravioleta

Lista de Símbolos

P_m	Base polinomial	
L_0	Comprimento inicial	mm
a_0	Comprimento inicial da fenda	mm
γ	Deformação angular plástica	rad
δ	Deslocamento	mm
δ_{n0}	Deslocamento relativo à tração	mm
δ_{s0}	Deslocamento relativo ao corte	mm
ϵ_e	<i>Equivalent strain (von Mises)</i>	
t_a	Espessura do adesivo	mm
t_p	Espessura do substrato	mm

P	Força aplicada	N
$P_{\text{máx}}$	Força máxima	N
E	Módulo de Young	MPa
γ_p	<i>Plastic shear failure strain</i>	
G_c	Resistência à fratura	N/mm
σ_r	Resistência à tração	MPa
τ_r	Resistência ao corte	MPa
t_{n0}	Resistência coesiva à tração	MPa
t_{s0}	Resistência coesiva ao corte	MPa
k	Rigidez da junta	N/mm
σ_{comp}	Tensão axial à compressão	MPa
τ	Tensão de corte	MPa
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima	MPa
σ	Tensão normal	MPa
ε_r	<i>Tensile failure strain</i>	MPa

1. Introdução

1.1. Contextualização

A presente dissertação incide sobre a caracterização experimental e numérica de juntas adesivas com aderentes compósitos fabricados por impressão 3D.

A impressão 3D, ou fabrico aditivo, tem vindo a afirmar-se como uma tecnologia emergente no setor industrial, que permite a produção de peças com geometrias complexas, elevada eficiência de material e menor custo em séries reduzidas. No entanto, a necessidade de unir componentes impressos, nomeadamente através de ligações adesivas, levanta novos desafios, sobretudo devido às características próprias dos materiais compósitos utilizados neste tipo de fabrico, como anisotropias, porosidades ou irregularidades de superfície.

Neste contexto, torna-se fundamental estudar o comportamento mecânico das juntas adesivas aplicadas a materiais impressos, de modo a compreender a sua resistência, rigidez e modo de rotura, bem como validar modelos numéricos que possam prever com fiabilidade o seu desempenho. Este trabalho visa, assim, contribuir para o avanço do conhecimento nesta área e contribuir para uma utilização mais segura e eficaz da impressão 3D em aplicações estruturais.

Nos últimos anos, o fabrico aditivo tem sido amplamente utilizado no desenvolvimento de protótipos e na redução dos custos de fabrico, uma tendência que tem vindo a alargar-se à produção de materiais compósitos. O fabrico aditivo de compósitos consiste na combinação de diferentes materiais com o objetivo de produzir peças com propriedades mecânicas melhoradas, nomeadamente maior resistência e rigidez. No entanto, uma das principais limitações desta tecnologia reside na produção de componentes com dimensões reduzidas, o que pode restringir a sua aplicabilidade em estruturas de maior escala.

Para colmatar esta limitação, a utilização de juntas adesivas revela-se uma solução eficaz e vantajosa. Para além de permitirem a união de diferentes materiais, as juntas adesivas possibilitam a produção de componentes de maiores dimensões sem comprometer as suas características fundamentais, sejam elas de natureza mecânica ou estética. Estas ligações apresentam ainda a vantagem de distribuir as tensões de forma mais uniforme, o que leva à redução de concentrações localizadas, pelo que são amplamente utilizadas em aplicações estruturais. Além disso, estas oferecem um bom desempenho sob carregamentos cíclicos, o que as torna adequadas para várias exigências industriais.

Com o aumento da aplicação do fabrico aditivo de materiais compósitos e, conseqüentemente, das ligações adesivas, torna-se imprescindível estudar e compreender o comportamento destas

uniões em estruturas fabricadas por impressão 3D. Neste sentido, a presente dissertação propõe-se a realizar uma análise detalhada do desempenho mecânico das juntas adesivas através de ensaios experimentais e simulações numéricas, contribuindo para o aprofundamento do conhecimento nesta área ainda em desenvolvimento.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo a caracterização experimental e numérica de juntas adesivas com aderentes compósitos fabricados através da impressão 3D e com a utilização do processo de fabrico denominado de *Fused Filament Fabrication* (FFF). No que diz respeito à caracterização experimental, esta tem como objetivo a impressão dos aderentes sem e com reforço e a consequente obtenção das propriedades mecânicas. Seguidamente parte-se para o fabrico da junta adesiva e é efetuado um ensaio de tração de modo a analisar os resultados obtidos através das curvas $P-\delta$. A caracterização numérica baseia-se na previsão do comportamento das juntas através dos modos e energia de rotura, a resistência das juntas e curvas $P-\delta$ com a aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF) por meio do modelo de dano coesivo pela lei triangular. O objetivo final consiste em confrontar os resultados experimentais com as previsões numéricas, de modo a avaliar a fiabilidade do modelo e validar a sua capacidade preditiva para a análise e otimização de juntas adesivas em compósitos fabricados por impressão 3D.

1.3. Metodologia

A metodologia desta dissertação baseou-se em quatro fases principais. Numa primeira etapa realizou-se uma revisão bibliográfica abrangente sobre fabrico aditivo de polímeros e compósitos, comportamento de juntas adesivas e métodos de previsão da sua resistência, de modo a estabelecer o enquadramento científico do estudo. De seguida, desenvolveu-se o trabalho experimental, que incluiu a produção de provetes em poliamida sem fibra de carbo (PA s/FC) e em poliamida com fibra de carbono (PA c/FC) através do processo *Fused Filament Fabrication* (FFF), a caracterização mecânica dos materiais por ensaios de tração e o fabrico de juntas adesivas em três configurações distintas (sobreposição simples, degrau e chanfro interior). Estas juntas foram submetidas a ensaios de tração para determinação das curvas $P-\delta$, da rigidez, da resistência máxima, da energia de fratura e dos modos de rotura. Em paralelo, desenvolveu-se o trabalho numérico com recurso ao *software* Abaqus®, onde se construíram modelos tridimensionais baseados no Método dos Elementos Finitos e se implementou um modelo de dano coesivo com lei triangular de tração-separação, calibrado com os resultados experimentais. Por fim, realizou-se uma análise comparativa entre os resultados experimentais e numéricos, o que permite validar o modelo proposto e avaliar a sua capacidade de previsão do comportamento estrutural de juntas adesivas com aderentes compósitos fabricados por impressão 3D.

1.4. Estrutura do relatório

A dissertação de mestrado encontra-se dividida em quatro capítulos principais para que, desta forma, seja possível uma melhor organização da temática aqui desenvolvida.

Inicialmente, no presente capítulo pretende-se introduzir a dissertação, nomeadamente no que diz respeito à sua contextualização, aos objetivos que se pretende alcançar com a concretização do mesmo, à metodologia utilizada para a sua elaboração e, por último, à estrutura seguida.

Em momento ulterior, no capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica dos temas abordados. Esta revisão bibliográfica encontra-se dividida em três subcapítulos. No subcapítulo 2.1 é descrito o fabrico aditivo de polímeros, desde a sua caracterização processual, vantagens e limitações, até aos mais recentes desenvolvimentos. No subcapítulo 2.2 incide-se na tecnologia das juntas adesivas, designadamente na sua caracterização, a sua comparação com os métodos tradicionais, aplicações industriais, o que são adesivos estruturais, as configurações típicas de juntas adesivas, as práticas e métodos de fabrico das mesmas e, por último, os mais recentes desenvolvimentos. No subcapítulo 2.3, o último deste capítulo e da revisão bibliográfica, pretende-se descrever os métodos de previsão de resistência de juntas adesivas, nomeadamente a mecânica dos meios contínuos, a mecânica da fratura, os modelos de dano coesivo, a mecânica do dano, o método de elementos finitos eXtendido, os métodos sem malha e, finalmente, assim como acontece no subcapítulo anterior, o estado-da-arte associado.

No capítulo 3 corresponde ao trabalho desenvolvido e encontra-se dividido em 6 subcapítulos. Inicialmente, nos primeiros três subcapítulos (3.1, 3.2 e 3.3) é descrito o planeamento das experiências, a geometria selecionada e os materiais utilizados. O subcapítulo 3.4 é dedicado ao estudo do trabalho experimental e, aqui, são expostas de forma detalhada as propriedades dos aderentes, o procedimento experimental, as juntas de sobreposição simples, as juntas em degrau e as juntas de chanfro interior. No subcapítulo 3.5 é descrito o trabalho numérico e, nos seus subcapítulos, a preparação dos modelos numéricos, o modelo coesivo triangular, a determinação dos parâmetros coesivos, as juntas de sobreposição simples, as juntas em degrau, e as juntas de chanfro anterior. Finalmente, no subcapítulo 3.6 é realizado um estudo comparativo das diferentes tipologias de juntas.

Finalmente, o capítulo 4 diz respeito às conclusões finais, limitações e propostas de trabalhos futuros.

Introdução

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Fabrico aditivo de polímeros

O fabrico aditivo, também denominado de *additive manufacturing* (AM), é definido pela norma ISO/ASTM 52900:2015 como sendo o “*processo de junção de materiais para fabricar objetos a partir de dados de modelos 3D, usualmente camada por camada, em oposição às metodologias de fabrico subtrativo*” [1]. Segundo esta norma, o AM pode ser também designado, por exemplo, por processo aditivo ou técnicas aditivas. O presente processo de fabrico é popularmente designado impressão 3D [2].

2.1.1. Caracterização do processo

No AM a peça é produzida por camadas, ou seja, a peça é construída camada a camada. O fabrico aditivo é um processo de fabrico de componentes a partir de um modelo 3D no computador, que deposita e consolida uma camada (*layer*) sobre a outra. Cada camada de uma peça representa a geometria transversal da peça a partir de uma determinada altura. Desta forma, este é um processo de fabrico que apresenta um contraste bastante significativo relativamente aos métodos tradicionais já que, neste caso, não são necessárias ferramentas para que se alcance a produção de uma peça [3].

2.1.2. Vantagens e limitações

O fabrico aditivo é um processo verdadeiramente inovador face às formas tradicionais de fabrico, uma vez que, abre novas oportunidades às empresas que procuram melhorar a sua eficiência no que diz respeito ao desenvolvimento e fabrico de produtos [4]. O método de fabrico abordado é uma forma de simplificar, significativamente, os métodos tradicionais.

De acordo com múltiplos estudos académicos [5], o fabrico aditivo é uma ferramenta que influenciará a redução da complexidade no que toca à cadeia de passos para o fabrico, nas mais variadas abordagens. O AM possui, por isso, inúmeras vantagens em relação aos métodos tradicionais, para além do facto de ser um processo inovador face aos mesmos, nomeadamente:

- Rápido desenho do protótipo, que origina a redução do tempo de chegada do produto ao mercado, o custo no desenvolvimento do produto e aumenta a eficiência e a competitividade da empresa;

- Produção de peças de trabalho com um grau de complexidade elevado a um baixo custo;
- Tempo de produção reduzido.

Todas estas características vantajosas do fabrico aditivo originam uma maior aceitação e funcionalidade do processo, uma maior fiabilidade de produção na indústria e, ainda, uma rápida melhoria no produto final, o que permite intensificar a qualidade do produto final e, consequentemente, a satisfação do cliente [5]. Por outro lado, importa referir que este processo apresenta diversas desvantagens e limitações, já que existem sempre certas deficiências que surgem durante o processo, o que pode aumentar o tempo de impressão e a qualidade do produto final, designadamente [5]:

- As impressoras que procedem ao fabrico apenas estão dependentes da sua área de impressão logo, são capazes de produzir um objeto ou vários, se estes apresentarem um tamanho pequeno;
- Elevado custo do equipamento de fabrico, sendo que esta desvantagem pode ser atenuada com futuros desenvolvimentos tecnológicos;
- As propriedades mecânicas anisotrópicas dos materiais fabricados por impressão 3D, resultantes do processo de deposição camada a camada.

Importa referir que, o AM é um processo de fabrico recente e uma vez que, a tecnologia está em constante mutação, conclui-se que o fabrico aditivo é um processo de fabrico com alguma falta de maturidade [5].

2.1.3. Categorias de fabrico aditivo

Qualquer processo de desenvolvimento de uma peça através do AM requer que um operador proceda a uma série de tarefas, pelo que as máquinas de impressão 3D que são lançadas no mercado têm pretendido simplificar esta sequência de tarefas a realizar. A maior oferta e máquinas de AM, bem como o seu desenvolvimento, fazem com que estas sejam cada vez mais capazes de satisfazer os requisitos que o operador necessita com uma variedade de resultados e efeitos possíveis dependendo do método e tecnologia de fabrico utilizados [1, 6].

Material extrusion

Inserida nesta categoria de fabrico aditivo podem ser utilizadas duas tecnologias distintas: o *fused filament fabrication* (FFF), e o *contour crafting*. Nestas tecnologias, a fonte de energia utilizada é o calor. Estes métodos de fabrico têm como vantagem o custo reduzido do equipamento [1]. No entanto, estes apresentam limitações tais como um fraco acabamento. O FFF será descrito em detalhe no subcapítulo 2.1.4.2.

O *contour crafting* (Figura 1) é o método de fabrico aditivo que é usado nas grandes estruturas de edifícios, e permite realizar a extrusão de cimento usando bicos de extrusão de maior dimensão e de alta resistência abrasiva [6]. Nesta tecnologia pode ser encontrada uma abordagem inovadora baseada na extrusão. O ponto mais crítico, neste caso, é o facto de a superfície externa pode não preencher os requisitos de precisão, pelo que foi desenvolvido um

método para alisar a superfície com uma ferramenta de raspagem. Este processo é utilizado pelos artesãos, nomeadamente pela forma como estes moldam o barro ou peças cerâmicas ao usar uma espátula [1]. No *contour crafting*, as camadas são contornadas com a ferramenta de raspagem à medida que elas são depositadas, de modo a interpolar as camadas. Ao utilizar esta técnica é possível fabricar peças de grandes dimensões de forma rápida uma vez que não se determina a precisão exterior pela espessura de cada camada [1].

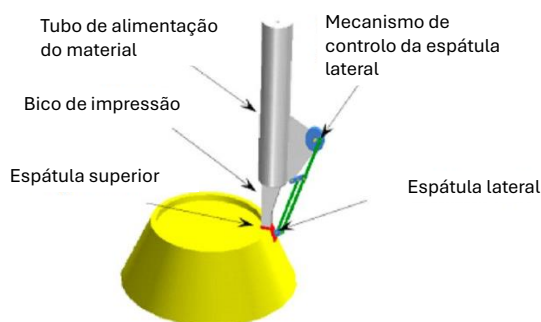


Figura 1 - Esquema do *contour crafting* [7]

Binder jetting

A tecnologia utilizada nesta categoria é o *powder printing* (3DP). O 3DP trata-se de uma tecnologia criada com base na utilização de pós e material ligante, descrita em detalhe no subcapítulo 2.1.4.2. A fonte de energia utilizada para proceder ao fabrico aditivo através deste método é calor e são apresentadas várias vantagens relativamente ao uso deste método, como a possibilidade de impressão a cores. No entanto, este método também aufere algumas limitações, como a obtenção de peças de elevada porosidade [1].

Vat polymerisation

A tecnologia utilizada nesta categoria de fabrico aditivo é denominada de *stereolithography*, que utiliza como fonte de energia uma luz UV, tecnologia esta desenvolvida no subcapítulo 2.1.4.2. No que diz respeito a esta tecnologia, as vantagens apresentadas são a velocidade de impressão elevada e uma maior resolução da peça relativamente aos métodos mencionados anteriormente, embora esta apresente ainda algumas limitações, como um elevado custo de produção [1, 8].

Powder bed fusion

O processo *powder bed fusion* (PBF) (Figura 2) é um dos primeiros processos de fabrico aditivo a ser comercializado. A tecnologia *Selective Laser Sintering* (SLS) foi desenvolvida na Universidade do Texas em Austin utilizando como base o PBF sendo esta a primeira tecnologia de PBF comercializada. O SLS utiliza como fonte de energia um laser de alta intensidade. As vantagens de utilização desta forma de processo são a elevada resistência das peças, assim com a sua rigidez, a alta precisão e detalhe e a elevada densidade das mesmas. Assim como algumas das tecnologias mencionadas anteriormente, o SLS encontra-se igualmente ilustrado no subcapítulo 2.1.4.2 [1].

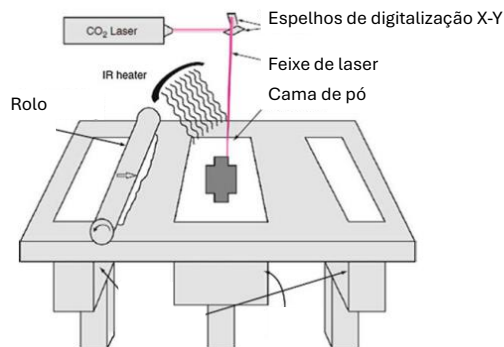


Figura 2 - Esquema do *powder bed fusion* [1]

Material jetting

Como tecnologia utilizada nesta categoria de fabrico aditivo encontra-se o *inkjet printing*, que tem como fonte de energia a energia térmica [9], tal como algumas das tecnologias mencionadas anteriormente. Assim como as demais tecnologias, este procedimento apresenta vantagens, tais como a possibilidade de proceder à impressão com diversos materiais e um acabamento exterior fino. Por outro lado, este processo apresenta ainda limitações como a fraca resistência do material [1, 10].

2.1.4. Fabrico aditivo de materiais compósitos

O fabrico aditivo de materiais compósitos consiste num processo de impressão 3D de um material que possui um reforço de fibra. Este processo vai fornecer uma tecnologia de fabrico de peças mais resistente e mais rápida, que anteriormente não seria possível, já que era difícil recorrer às tecnologias de fabrico de materiais compósitos. O fabrico aditivo de materiais compósitos permite fabricar a peça com materiais compósitos camada por camada tendo, desta forma, propriedades químicas e mecânicas próximas aos compósitos fabricados de forma tradicional [11].

2.1.4.1. Princípios de fabrico aditivo de materiais compósitos

Os processos de fabrico aditivo na sua totalidade envolvem um conjunto de etapas e métodos, com a finalidade de alcançar a peça física que se pretende. O processo fabrico aditivo a adotar vai depender, sempre, da peça que se pretende fabricar bem como a finalidade da mesma. Pode afirmar-se que, o fabrico aditivo é muitas vezes utilizado devido à rapidez no fabrico de cada peça. O esquema da Figura 3 demonstra as fases e etapas do fabrico aditivo até ao alcance da peça pretendida.

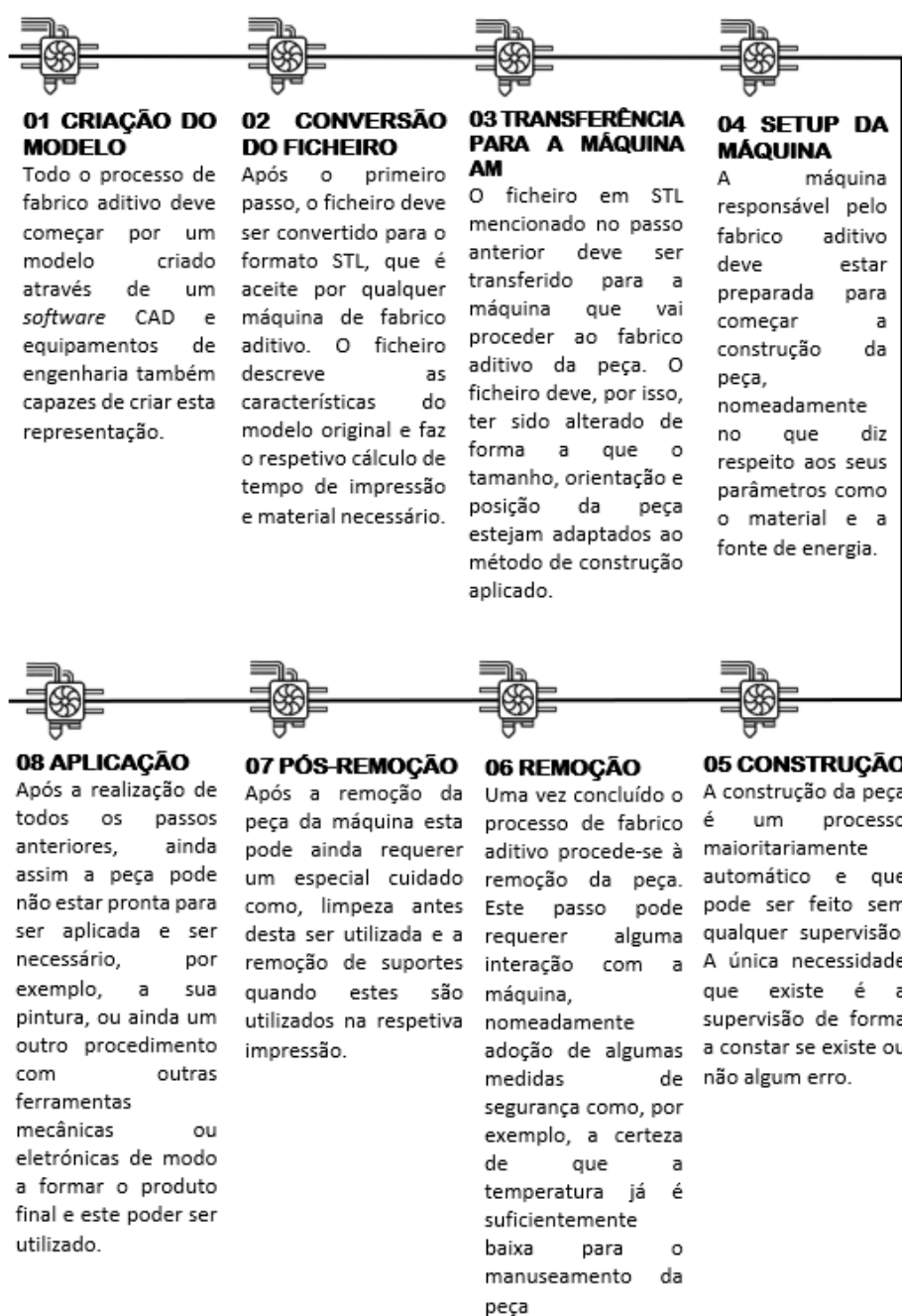


Figura 3 - Princípios de fabrico aditivo de materiais compósitos (adaptado de [1])

2.1.4.2. Categorias para materiais compósitos

Ao longo do tempo, fruto da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico, várias formas de fabrico aditivo foram sendo desenvolvidas, como já mencionado anteriormente. Estas técnicas partilham todas de uma característica em comum, designadamente o fabrico *layer-by-layer*, seguido da formação das camadas subsequentes que dão origem a uma estrutura tridimensional [6]. No fabrico aditivo de materiais compósitos são várias as técnicas que se podem aplicar, nomeadamente as descritas em seguida [6].

Moldação por extrusão e deposição-*fused filament fabrication* (FFF)

O FFF (Figura 4) é o processo mais usual e a tecnologia mais promissora no que diz respeito à versatilidade, fiabilidade e custo comparativamente com os métodos existentes no mercado. Este método utiliza materiais termoplásticos de baixo ponto de fusão, como o PLA, geralmente vendidos em carretéis de filamento que, durante o processo, passam por temperaturas elevadas, o que permite que o material liquefeito flua através de um bico de extrusão e seja depositado numa superfície plana aquecida responsável por equalizar a temperatura de todas as camadas. As propriedades de uma peça produzida através deste método dependem da altura e da largura da camada, da temperatura aplicada na impressão e da percentagem de preenchimento escolhido para a formação da peça [12].

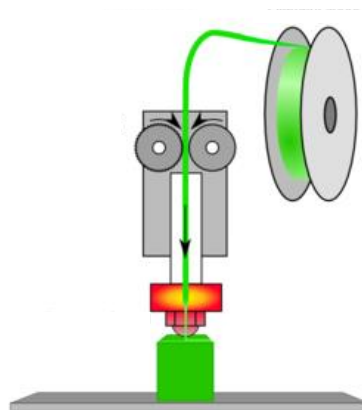


Figura 4- Esquema do *fused filament fabrication* [12]

***Powder printing* (3DP)**

O *3D printing* (Figura 5) trata-se de uma tecnologia criada com base na utilização de pós e material ligante. Inicialmente, o pó é espalhado e comprimido numa plataforma de construção e, seguidamente, um jato de tinta cria a silhueta e um padrão interno. A quantidade de material ligante, assim como a velocidade que é depositada, são fatores críticos para a resistência da parte inicial. Posto isto, após este processo a peça é removida da mesa e o excesso é removido. Em momento ulterior é feita uma impregnação das fibras com o objetivo de aumentar as propriedades mecânicas designadamente a resistência mecânica, a tensão de cedência, entre outras [13].

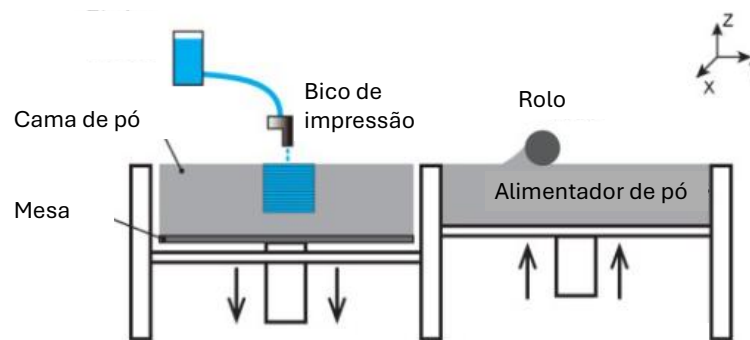


Figura 5 - Esquema do *powder printing* [14]

Selective laser sintering (SLS)

O SLS (Figura 6) é uma técnica que, em semelhança à anterior requer uma configuração da cama de pó. No entanto, ao invés de se usar um material ligante, utiliza-se um laser que procede à renderização da área e derrete o pó camada por camada. A área de impressão é ainda aquecida por forma a ajudar na fusão das partículas, na dissipação de calor e evitar a distorção da peça. Assim como o processo anterior, o SLS não requer materiais de suporte. As partículas estão inseridas no processo, e é usada uma rigorosa gama de materiais, tais como polímeros termoplásticos, materiais cerâmicos e ligantes orgânicos. Por último, importa referir que o acabamento desta técnica é de qualidade superior à do processo mencionado anteriormente embora não tão preciso quanto a *Stereolithography* (SLA), e possui um elevado custo de produção, visto que a utilização do laser provoca um consumo de elevadas quantidades de energia [6].

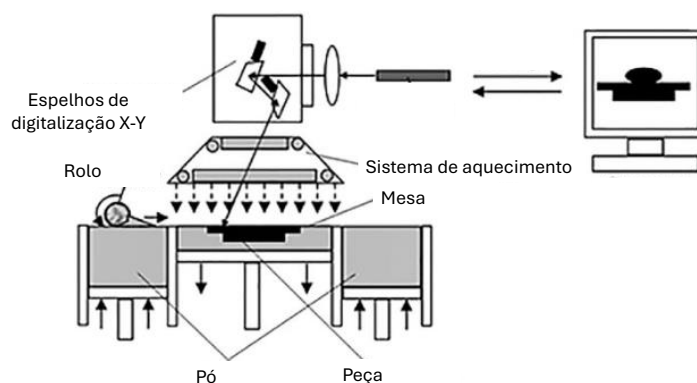


Figura 6 -Esquema do *selective laser sintering* [15]

Stereolithography (SLA)

O SLA (Figura 7) é o processo que usa polímeros foto-curáveis e um laser UV com a finalidade de alcançar a peça desejada. A trajetória do laser é controlada por espelhos que se movem, de modo a curar a resina num tanque. Após a camada ser curada, a plataforma de impressão, que está dentro do tanque, é descida para permitir a adição de outra camada de resina no topo da peça impressa, processo que se repete até à obtenção da peça final. As propriedades da peça e o seu acabamento dependem da intensidade do laser, da sua velocidade de renderização e, ainda, do tempo de cura pós impressão. Neste processo, os materiais usados são, na sua maioria, as resinas epóxidos e acrílicos. São ainda apresentadas algumas vantagens, designadamente a impressão de peças de grande volume, com uma grande resolução, no entanto, esta vantagem tem um custo elevado, visto que as resinas são dispendiosas, assim como qualquer tipo de manutenção. De todas as técnicas de fabrico aditivo que são atualmente aplicadas o método de impressão SLA é aquele que tem uma maior resolução devido ao controlo do número de fotões aplicados [6].

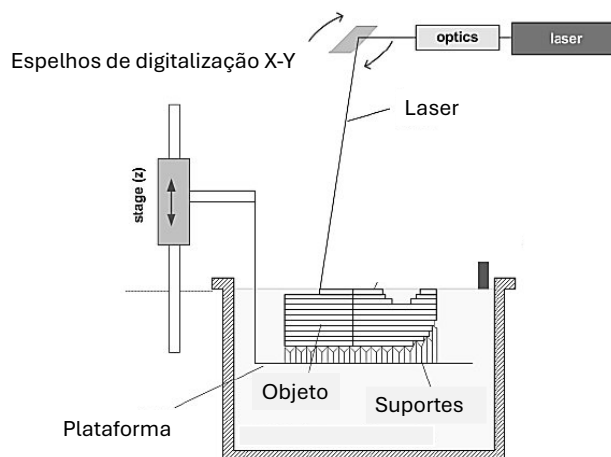


Figura 7 - Esquema da *stereolithography* [16]

2.1.4.3. Equipamentos disponíveis no mercado

Na Tabela 1 são enunciados dois dos equipamentos disponíveis no mercado.

Tabela 1 - Equipamentos disponíveis no mercado

Impressora 3D FFF [17]		• Facilidade de manuseamento; • Preço acessível; • Preço acessível do filamento; • Ideal para ambiente de escritório; • Não depende de produtos químicos fortes.
Impressora 3D SLA [18]		• A matéria-prima utilizada é a resina; • Custo da máquina relativamente elevado; • Acabamento superficial de elevada qualidade; • Equipamento de fácil utilização.

2.1.5. Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Vários métodos e tecnologias de fabrico aditivo têm vindo a ser desenvolvidos. Os métodos mencionados neste subcapítulo constituem protótipos de novos métodos e já se encontram em fase experimental. Segundo Robert Swartz [19], fundador da empresa *Impossible Objects*, responsável pelo desenvolvimento de uma das tecnologias mencionadas neste subcapítulo a maioria das tecnologias de impressão 3D convencionais têm entre vinte a trinta anos, o que torna necessária a criação de métodos inovadores que eliminem as dificuldades apresentadas

por estes métodos convencionais. De seguida apresentam-se as mais recentes inovações na área do fabrico aditivo.

Impossible objects machine- Composite-based additive manufacturing technology (CBAM)

A tecnologia CBAM é um processo inovador que surge com o objetivo de eliminar algumas das limitações do AM através da combinação de um reforço de fibra com matrizes diferentes em velocidades mais elevadas e em escalas maiores comparativamente às existentes no mercado. Segundo a *Impossible Objects*, a CBAM é a impressora 3D mais rápida do mundo [20, 21].

Neste processo de AM, um ficheiro CAD é dividido em camadas que são convertidas em *bitmaps* individuais. Posto isto, a impressora deixa uma solução aquosa na forma do *bitmap* numa folha feita de um material de reforço. De seguida, é derramado sobre a folha um material matriz de termoplásticos em pó que apenas adere na solução aquosa. O excesso de pó é removido e fica apenas o pó termoplástico que aderiu ao líquido. Este ciclo é repetido para cada camada da peça que está a ser produzida até à produção da peça final.

Depois de todas as folhas necessárias a formar as camadas da peça estarem produzidas, estas são aquecidas até à temperatura necessária para a fusão e comprimidas até a altura pretendida para a peça. Finalmente, a peça é retirada do forno e o excesso de material de reforço é removido. A CBAM é uma tecnologia bastante promissora sem limitações em termos de formas geométricas. No entanto, esta apresenta limitações, nomeadamente quando se trata da impressão de formas exatas [22]. A impressão 3D através desta tecnologia dá origem a uma peça com uma elevada relação resistência-peso quando comparada, por exemplo, com o alumínio [20].

+LAB- ATROPOS

Uma outra nova tecnologia inovadora foi criada pelo +LAB do *Politecnico di Milano*. Esta é uma tecnologia robótica denominada de ATROPOS [23] (Figura 8). Este conceito, utiliza um braço robótico de seis eixos capaz de realizar impressões em 3D de materiais compósitos, de criar peças com idêntica matriz e reforço de resina foto curável. O laboratório continua ainda a trabalhar no sentido de expandir o seu âmbito e poder começar a utilizar fibras naturais. Este braço robótico é o primeiro, de 6 eixos, capaz de imprimir materiais compósitos usando resinas, e permite obter objetos com um elevado desempenho. O sistema ATROPOS é um braço robótico que se movimenta no espaço e deposita a fibra impregnada de materiais compósitos termoendurecíveis que endurecem de forma instantânea ao sair pela extrusão [24].

No sistema ATROPOS, também denominado “*Continuous Fiber Composites Smart Manufacturing*”, as fibras são impregnadas e direcionadas para a cabeça da máquina, que é controlada de forma numérica e capaz de as depositar de uma forma precisa e repetível. O material que passou pelo processo de extrusão é irradiado por um aparelho de polimerização que cura rapidamente, o que permite obter a peça em 3D pretendida. Neste procedimento, usufruindo de algoritmos inteligentes para deposição de fibras, torna-se concebível a alteração da direção, o que permite desenvolver, uma melhor solução de construção [24]. Vários académicos [25] relatam que este sistema é compatível com fibras de carbono, vidro ou basalto e pode utilizar resinas foto curáveis por luz ultravioleta (UV) para produzir peças geométricas

com maior complexidade. O projeto apresenta ainda algumas ambições futuras tais como a automatização dos processos e o aumento da velocidade de impressão, principalmente no que concerne à impressão de materiais compósitos com fibra de carbono. Para este efeito, são investigadas fórmulas alternativas de resina com capacidade de cura por uma outra fonte de energia que não unicamente UV [24].

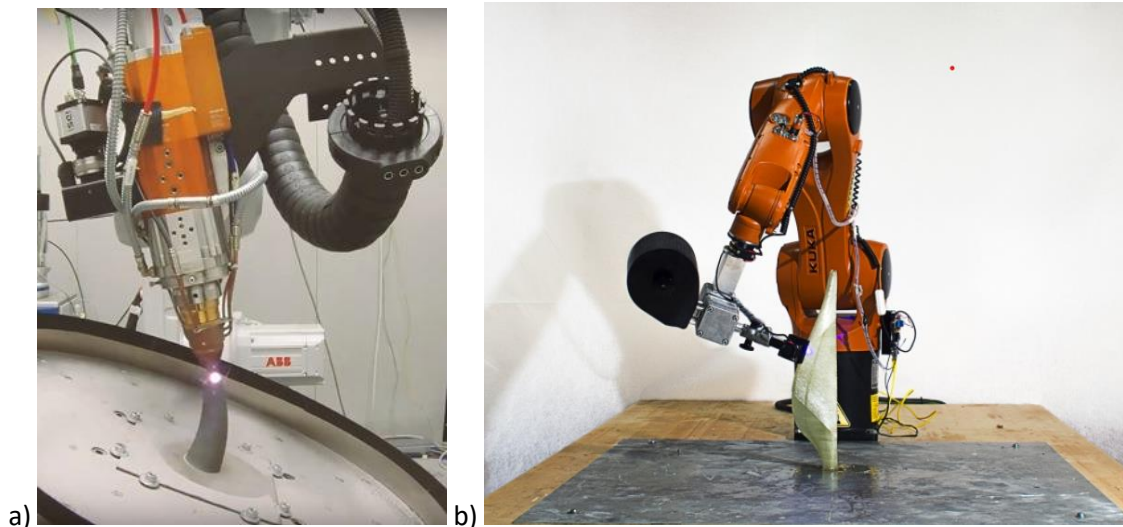


Figura 8- Tecnologia + LAB ATROPOS a) luz UV e b) deposição de fibras contínuas [24]

Continuous Composites 3D (CC3D)

Kenneth Taylor desenvolveu um novo método denominado *de Continuous Composite Three Dimensional Printing* (Figura 9). Trata-se de um processo que tem por base a deposição contínua de fibras embebidas em resina foto-curável. A máquina que procede a esta produção usa um braço robótico cuja cabeça de impressão deposita os fios de fibra. Podem ser utilizadas fibra de carbono ou fibra de vidro incorporadas em resina curável por radiação UV como agente de ligação. A luz UV cura o material para que este possa passar pelo processo de extrusão. Este processo de extrusão proporciona uma impressão de maior velocidade, com formas geométricas mais curvas, sem que seja necessário que a peça passe, por exemplo, por um processo que molde a sua superfície [26].

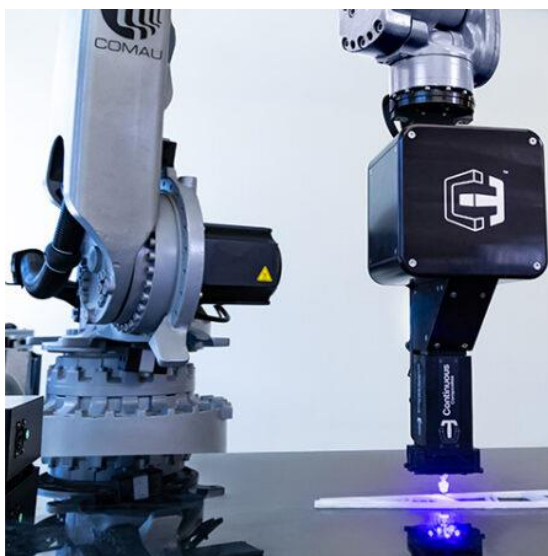


Figura 9 - Tecnologia de deposição de fibras embebidas em resina foto-curáveis [26]

2.2. Ligações adesivas

Para além dos processos tradicionais como a soldadura e ligações aparafusadas e rebetadas, nas últimas décadas tem vindo a ser desenvolvido o processo de ligação adesiva. As ligações adesivas são alternativas a outros métodos de ligação tradicionais e providenciam um número de vantagens maiores relativamente a estes [27].

2.2.1. Generalidades e caracterização

Uma ligação adesiva consiste na união de dois corpos, denominados de substratos ou aderentes, através de um adesivo que possibilita a adesão entre estes dois e garante resistência à separação desta ligação. Os principais constituintes de uma junta estão visíveis na Figura 10. As ligações adesivas apresentam ainda vantagens e desvantagens que se encontram presentes na Tabela 2.

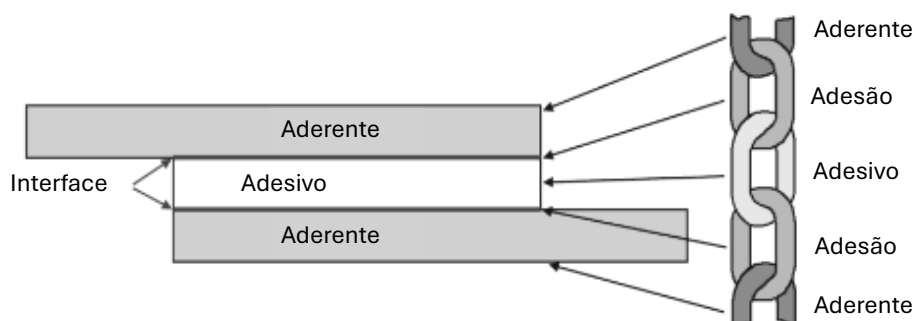


Figura 10 - Constituintes de uma junta adesiva [29]

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas (adaptado de [29-31])

Vantagens	Desvantagens
Distribuição uniforme das tensões ao longo da junta;	Necessidade de tratamento superficial;
Redução ou eliminação de concentração de tensões;	Processo de cura pode ser bastante moroso;
Melhoria da resistência à fadiga;	Resistência e durabilidade fortemente dependentes das condições de processamento;
Capacidade de amortecimento de vibrações;	Durabilidade pode ser baixa, dependendo das condições em que a junta estará ao serviço;
Possibilidade de unir diferentes materiais;	Fraca resistência aos esforços de arrancamento ou clivagem.
Boa resistência à corrosão;	

2.2.2. Comparação com métodos tradicionais de ligação

Tradicionalmente, os métodos de ligação utilizados são a soldadura e ligações aparafusadas e rebetadas. Com o aumento da utilização de ligações adesivas ao longo dos anos é necessário realizar uma comparação entre estas e as ligações mais utilizadas anteriormente. Através da Tabela 3 é possível comparar estas ligações.

Tabela 3 - Comparação entre ligações mecânicas, soldadas e adesivas (adaptado de [32])

	Ligação adesiva	Soldadura	Ligações mecânicas
Permanência	Junta não desmontável	Junta não desmontável	Junta desmontável
Distribuição de tensões (Figura 11)	Distribuição uniforme de tensões ao longo da largura da junta	Criação de tensões internas	Pontos de elevada tensão nos locais de fixação
Aparência	Junta praticamente invisível, sem marcas na superfície	Aparência aceitável	Cria descontinuidade na superfície
Materiais ligados	Materiais distintos	Materiais similares	Materiais distintos
Resistência à temperatura	Fraca resistência a altas temperaturas	Elevada resistência a altas temperaturas	Elevada resistência a altas temperaturas
Resistência mecânica	Boa resistência à corrosão e fadiga	Necessita de tratamento para boa resistência à fadiga	Pouco resistente à fadiga
Preparação de junta	Tratamento superfície	Preparação de chanfros	Preparação de furos e roscas
Pós-processamento	Não necessita	Tratamentos térmicos	Não necessita
Consumíveis	Adesivos	Fio, elétrodos	Parafuso, rebites
Taxa de produção	Lenta	Rápida	Rápida
Garantia de qualidade	A aplicação de ensaios não destrutivos é limitada	Os ensaios não destrutivos são aplicáveis à maioria dos processos	Confiança razoável quando controlado o binário de aperto

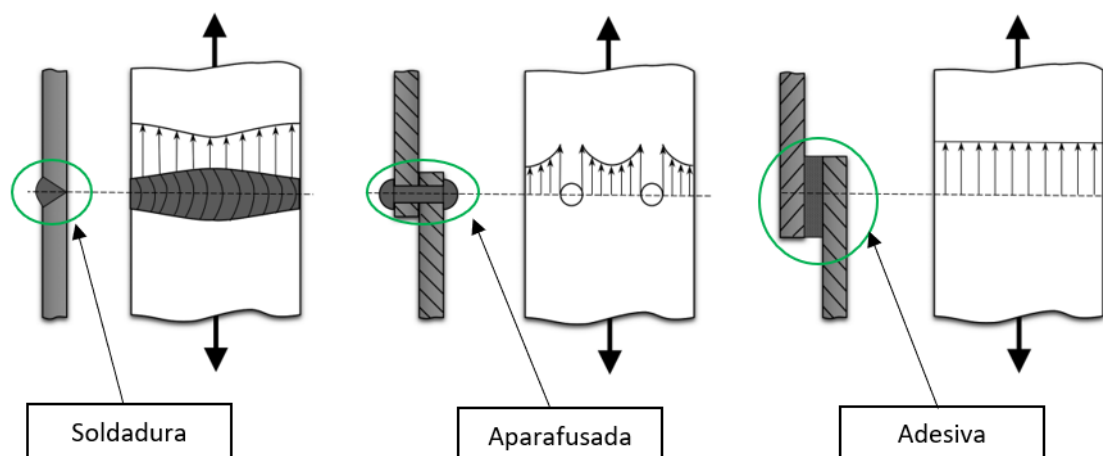


Figura 11 - Distribuição de tensões nas ligações (adaptado de [32])

2.2.3. Aplicações industriais

As ligações adesivas têm um âmbito de aplicação muito vasto (Tabela 4), o que significa que estas podem ser aplicadas às mais diversas áreas da indústria, como aeroespacial, aeronáutica, automóvel, entre outras.

Tabela 4 - Aplicações industriais das ligações adesivas [32]

Estruturas de aeronaves		Algumas indústrias de aeronaves utilizam ligações adesivas estruturais em diferentes componentes. A aeronave SAAB 340 possui uma aplicação extensa de ligações adesivas na fuselagem de alumínio da aeronave como mostra a figura que possui, desta forma, uma estrutura com eficiência e durabilidade.
Indústria aeroespacial		As ligações adesivas podem ser escolhidas para fazer a montagem de dois painéis compósitos e para que seja feita a junção entre o anel de alumínio e uma estrutura. Um exemplo de estrutura otimizada é aquela que é utilizada no Ariane 5, que tem como função lançar dois satélites pesados denominados SYLDA produzidos pela Airbus Safran Launchers. A estrutura é produzida por sandwich com fibra de carbono projetada com ligações adesivas.

Tabela 4 - Aplicações industriais das ligações adesivas [32] (continuação)

Indústria automóvel		Na indústria automóvel o uso de ligações adesivas começou com aplicações de vedação, como por exemplo substituição da junta do para-brisas por um adesivo elástico de borracha para evitar a corrosão. Uma vez que os automóveis são pintados, os adesivos devem ser aplicados antes da pintura. As figuras demonstram o uso de adesivos em automóveis modernos.
Aplicação ferroviária		No Japão, as ligações adesivas foram aplicadas em protótipos de vagões. Em protótipos de estruturas de comboios de alta velocidade têm sido utilizados plásticos reforçados com fibra de carbono à base de resina de fenol, resistente à chama.

Para além das aplicações mencionadas na tabela, as ligações adesivas são ainda aplicadas noutras indústrias, nomeadamente:

- Na indústria naval, por exemplo na construção do casco do convés;
- Na construção civil, por exemplo nos pavimentos e nas construções de fachadas de vidro através das ligações adesivas;
- Na indústria do calçado, por exemplo, na colagem da sola com o restante sapato.

2.2.4. Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são compostos por dois componentes que, estão ligados quimicamente entre si, e que apresentam uma boa resistência física e propriedades mecânicas elevadas. A utilização dos adesivos estruturais fornece várias vantagens como a união forte dos componentes a serem ligados, elevado desempenho e resistência aos mais variados tipos de ambientes e, por último uma boa resistência ao corte. Na Tabela 5 é feita uma breve apresentação das famílias de adesivos estruturais, as suas principais características e por último as suas aplicações.

Tabela 5 - Famílias de adesivos estruturais (adaptado de [33])

Família	Características	Aplicações
Fenólicos	- Boa resistência ao calor; - Boa resistência a fungos e água até altas temperaturas; - Boa estabilidade dimensional; - Frágeis sob impacto e vibração.	Indústria madeireira
Acrílicos	- Tempo de cura baixo; - Baixa contração térmica; - Baixa resistência mecânica a altas temperaturas; - Elevada flamabilidade.	Indústria de construção mecânica
Poliuretanos	- Elevada flexibilidade; - Alta resistência ao corte e arrancamento, devido à ductilidade do adesivo; - Formação de ligações com boa tenacidade.	Indústria automóvel
Poliimidas	- Boa ductilidade; - Tenacidade reduzida; - Temperatura de transição vítrea elevada.	Indústria aeronáutica
Epóxidos	- Versáteis, devido à boa adesão em materiais distintos; - Excelente resistência à tração e ao corte; - Resistentes a resíduos, como óleos, solventes ou humidade.	Indústria de construção mecânica

2.2.5. Configuração típicas de juntas

A concentração de tensões pode determinar a resistência máxima da junta. Assim sendo, é importante conhecer os modos de carregamento possíveis nas juntas, para depois ser escolhida a configuração ideal para o fabrico de uma junta para uma determinada aplicação (Tabela 6).

Tabela 6 - Esforços aplicados às juntas de ligação adesiva [34]

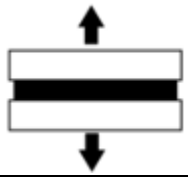
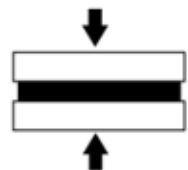
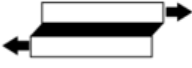
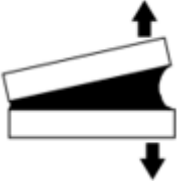
Esforços	Explicação	Imagem
Tração	Forças perpendiculares ao plano do adesivo que provocam o seu afastamento. Estes esforços possuem teoricamente distribuição uniforme de tensões, embora na prática existam picos de tensão nas extremidades da junta.	
Compressão	Forças perpendiculares ao plano do adesivo que tendem a comprimir um aderente contra o outro. Os esforços de tração possuem uma distribuição de tensões é uniforme.	

Tabela 6 - Esforços aplicados às juntas de ligação adesiva [34] (continuação)

Corte	Este é o carregamento preferencial para juntas adesivas. Neste caso, as forças, que são paralelas ao plano do adesivo, tendem a provocar escorregamento entre os dois aderentes. A distribuição de tensões não será uniforme, uma vez que as extremidades estão expostas a um maior nível de tensão quando comparadas com a parte central da junta.	
Clivagem	Os esforços de clivagem são provocados por forças de tração aplicadas das extremidades da junta rígida. A extremidade oposta à da aplicação da junta pouco ou nada contribui para a resistência da junta.	
Arrancamento	Este tipo de carregamento é bastante semelhante ao verificado nos esforços de clivagem. No entanto, pelo menos um dos aderentes é flexível e acaba por deformar quando a força é aplicada, o que acaba por criar zonas muito mais localizadas de concentração de tensões na junta.	

No que diz respeito aos dois últimos esforços analisados na tabela, nomeadamente, a clivagem e o arrancamento é importante reter que, quer as forças de arrancamento, quer as forças de clivagem, devem ser evitadas ao máximo em juntas. Caso estas não possam ser evitadas, deverão ser utilizados adesivos mais dúcteis e flexíveis para diminuir a concentração de tensões.

Após o desenvolvimento dos esforços que podem estar nas ligações adesivas, enumeram-se na Figura 12 as configurações típicas das juntas. O tipo de juntas adesivas utilizadas mais comumente são as juntas de sobreposição simples (*single-lap joint*, SLJ), juntas de sobreposição dupla (JSD), juntas de chanfro e degraus [34].

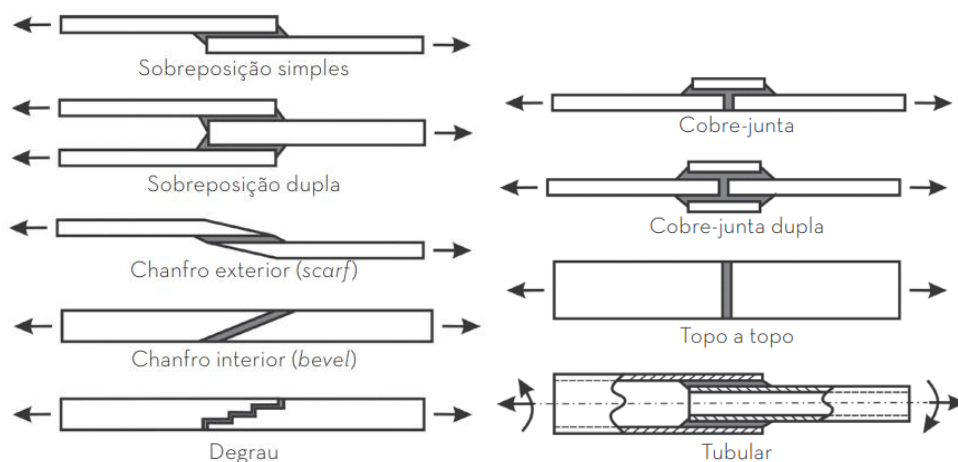


Figura 12 - Configuração típica de juntas (adaptado de [34])

- Junta de sobreposição simples: Uma das juntas mais utilizadas na indústria devido à sua simplicidade e boa resistência ao corte. No entanto, a não colinearidade do carregamento conduz à flexão da junta, flexão que provoca tensões de arrancamento significativa;
- Junta de sobreposição dupla: Reduz os efeitos de flexão sentidos na sobreposição simples, mas irá ser mais moroso. Este tipo de configuração de juntas possui uma construção balanceada e, apenas está sujeita a flexão se as forças no lado duplo da sobreposição não estiverem equilibradas [35].
- Junta de chanfro exterior: Tal como as juntas degrau diminui os esforços de arrancamento, mas o tempo de produção é demorado;
- Junta de chanfro interior: tem a vantagem de diminuir os gradientes de tensões no adesivo, mas o fabrico é mais moroso e dispendioso;
- Junta de degrau: Diminui os esforços de arrancamento, mas o seu processamento é mais complexo e, no caso de o material ser compósito, as fibras podem ser danificadas;
- Cobre-junta: utilização de uma tira na junta, sendo assim mais resistente que a sobreposição simples, mas fica sujeita a esforços de arrancamento;
- Cobre-junta dupla: utilização de uma tira em cada um dos lados da junta, o que minimiza o problema da flexão da junta.
- Junta topo a topo simples: Junta simples de fabricar, mas não permite esforços de flexão;
- Junta tubular: possuem alta rigidez à torção, maior resistência e um baixo custo de construção [36].

2.2.6. Práticas e métodos de fabrico

O processo de ligação por adesivos pode ser dividido em cinco fases [37]:

1. Seleção do adesivo: este é um dos aspetos mais importantes na totalidade do processo inteiro, uma vez que se torna necessário um conhecimento aprofundado da área em causa de forma a ser feita uma escolha de adesivo acertada consoante o tipo de material base, as solicitações de carga, o ambiente envolvente, entre outros fatores;
2. Projeto de junta: com o conhecimento das propriedades do adesivo selecionado é possível projetar a junta de forma a garantir que a tensão no adesivo não exceda a sua resistência. Para tal, é necessário realizar um dimensionamento da junta tendo em conta a resistência mecânica, à fadiga e à fluência. Um dos aspetos a ter em conta é o tipo de junta a ser utilizado;
3. Preparação da superfície: após conhecer o material base e o adesivo para a formação da junta é necessário preparar a superfície do substrato para que se garanta uma boa adesão de forma a minimizar o risco de rotura da junta quando esta estiver em serviço;

4. Fabrico da junta: Nesta fase, o adesivo é aplicado nos substratos e realizada a cura, sobre condições previamente estabelecidas e consoante as indicações do fabricante do adesivo;
5. Controlo do processo: Por fim, de forma a garantir que a junta está adequada a ser colocada em serviço realizam-se vários ensaios, destrutivos e não destrutivos, de maneira a averiguar o desempenho da junta.

2.2.7. Estado-da-arte

As ligações adesivas são uma tecnologia em constante mutação, e o número de aplicações desta tecnologia está constantemente a aumentar. Na Tabela 7 são apresentados cinco estudos de que demonstram o estado-da-arte das ligações adesivas nomeadamente a forma como estas estão a ser encaradas por os mais variados académicos e como se encontram nos dias de hoje.

Tabela 7 - Estudos realizados de ligações adesivas

Artigo	Descrição
Fernandes et al. [38] - Previsão de fadiga de juntas adesivas estruturais por inteligência artificial	Neste estudo foram comparados modelos baseados em física, modelos baseados em dados e modelos híbridos para a previsão da vida à fadiga de juntas adesivas estruturais, no que diz respeito à complexidade de implementação. Foram desenvolvidos dois modelos híbridos através da combinação de abordagens baseadas em parâmetros de dados físicos obtidos através de tensões invariantes e na abordagem do plano crítico de Findley. Foi implementado um conjunto de dados de fadiga com 979 pontos de fadiga de quatro adesivos estruturais com quatro configurações de junta para avaliar a sensibilidade face ao tamanho dos dados. Os resultados demonstraram que os modelos baseados em dados são mais precisos, mas também mais sensíveis ao tamanho do conjunto de dados, quando comparados com os modelos baseados em física. Os modelos híbridos permitiram aumentar a precisão das previsões.
Gollins et al. [39] - Caracterização de juntas adesivas sujeitas a impacto normal de alta velocidade - Estudos numéricos	Neste estudo foram realizadas simulações de elementos finitos para determinar parâmetros aproximados de modelação de materiais como o epóxico e o metacrilato e para elaborar a caracterização de juntas adesivas sob carga de impacto balístico. O método de elementos finitos foi utilizado de forma a obter perfis de tensão na área de interface e estimar as forças de contacto. Foi possível concluir que as tensões dinâmicas máximas são quatro vezes superiores à tensão de corte. Este trabalho concluiu que, os perfis de tensão são semelhantes aos perfis do teste de bolha estática que, por sua vez corresponde à pressão uniforme aplicada a uma placa circular por uma camada adesiva. Além disso, a rigidez do adesivo é considerada insignificante em relação aos aderentes, caso contrário a absorção de energia dos adesivos medida de forma experimental poderia não ser tão detalhada. Concluiu-se ainda que deve ser sempre realizado um estudo sobre o efeito da geometria no desempenho dos adesivos sob carga balística.

Tabela 7 - Estudos realizados de ligações adesivas (continuação)

Pizzorni et al. [40] - Ligações adesivas de materiais compósitos de fibras curtas e contínuas de carbono impressos em 3D: Análise experimental de métodos de projeto para aumentar a resistência da junta	O estudo concentra-se no efeito de vários fatores de projeto de juntas adesivas de peças de Nylon reforçadas com fibra de carbono e impressas segundo a tecnologia FFF. Durante o fabrico das juntas, foi realizado um tratamento com plasma de baixa pressão para maximizar a adesão da superfície adesiva no compósito. O tratamento permitiu a definição de uma referência de desempenho e concluir que a não homogeneidade do compósito pode conduzir a falhas nas juntas devido à delaminação dos substratos. Posto isto, foram considerados parâmetros de como o comprimento de sobreposição, a geometria e o tipo de adesivo, e investigada a sua influência no comportamento mecânico das juntas de sobreposição simples e no modo de propagação de fissuras através dos laminados. Os resultados experimentais permitiram concluir que a resistência da junta aumenta com o aumento da rigidez da junta, através da utilização de um comprimento da sobreposição mais elevado, uma vez que as tensões de corte são mais baixas nas extremidades aderentes. Em alternativa, considera-se que a união dos aderentes de fibra oferece uma abordagem de alto desempenho.
Pereira et al. [41] - Efeito do aderente na resistência ao arrancamento de um adesivo frágil	Neste estudo, foram utilizados testes de arrancamento para caracterizar a resistência das juntas adesivas e controlar a qualidade da adesão. Foi investigada a influência do tipo de material do aderente na resistência à tração de um adesivo frágil através do teste de rolete flutuante. Pretendeu-se ainda comprovar a aplicabilidade deste teste no controlo de qualidade da adesão e determinação de resistência à tração em juntas adesivas com materiais compósitos. Através deste estudo, concluiu-se que o desempenho do adesivo Araldite AV138 está dentro dos valores característicos de resistência à tração de outros adesivos estruturais.
Kaiser e Tan [42] - Análise do dano e resistência de uma junta tubular de sobreposição de polímero reforçado com fibra de carbono e titânio através da utilização de um adesivo de design híbrido	Neste estudo experimental, foi desenvolvido um modelo de dano a aplicar a uma junta tubular de sobreposição em titânio e compósito fibra de carbono para investigar novas juntas adesivas híbridas. Foram utilizados modelos de dano coesivo para investigar a evolução do dano nomeadamente a delaminação. Com a realização deste estudo, verificou-se a importância das considerações de geometria para as juntas adesivas, foi revelado um aumento significativo da resistência com a utilização de juntas adesivas de design híbrido quando comparadas com as restantes devido à melhor distribuição de tensões.

2.3. Previsão de resistência de juntas adesivas

O processo evolutivo das juntas adesivas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização, possibilitando assim ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, devido à falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas. As duas metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 do século XX com o modelo analítico de Volkersen [43], que parte do princípio que os

materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade de o adesivo se deformar plasticamente, ou de se utilizarem substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [44] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [45], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes de adesivo. Estes autores recorrem à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas adesivas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho a fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [46]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

As juntas adesivas desempenham um papel importante e por isso devem ser sempre projetadas principalmente no que diz respeito aos adesivos. O objetivo das juntas adesivas é alcançar a máxima resistência para uma determinada área de ligação. A junta quando projetada para a colagem adesiva é projetada de acordo com as características básicas do adesivo e consequentemente, devem também ser projetadas com o objetivo de minimizar a concentração de tensões.

De salientar que as juntas adesivas possuem a vantagem de serem menos limitadas geometricamente quando comparadas com as ligações mecânicas. Durante o projeto, deve-se dar relevância aos potenciais efeitos de choques mecânicos e vibrações, especialmente no que diz respeito a aplicações sujeitas a esforços dinâmicos.

Por fim, a montagem, a metodologia de fabrico e os fatores de custo de produção devem ser tidos em conta quando se propõe um projeto de juntas adesivas.

2.3.1. Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são

comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas.

2.3.1.1. Métodos analíticos

Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [43], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [47] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [48]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que a as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [45], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, este ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.3.1.2. Métodos numéricos

A complexidade das juntas adesivas tem vindo a aumentar, pelo que em muitos casos a utilização de métodos analíticos torna-se insuficiente e de aplicação impossível. Desta forma, é necessário o uso de métodos numéricos para se conseguir prever o comportamento das juntas adesivas de forma precisa. Estes métodos numéricos podem ainda ser utilizados para determinar a resistência das juntas adesivas.

Os critérios da mecânica dos meios contínuos em conjunto com o MEF são utilizados para o estudo das tensões ao longo da espessura média da camada adesiva e para realizar a previsão de resistência das juntas através da utilização de um critério de rotura. Atualmente, a utilização da mecânica dos meios contínuos para realizar a previsão de resistência é menos comum, porque as singularidades da tensão nas zonas com entalhe dão origem ao aumento da tensão com o aumento do refinamento da malha, sem que se obtenha convergência. [49].

2.3.1.3. Critérios de rotura

Os académicos que se dedicaram ao estudo dos critérios de rotura são vários e na Tabela 8 são apresentados alguns deles e o tipo de análise que cada modelo segue. Geralmente, os critérios de rotura podem ser agrupados em diferentes categorias nomeadamente critérios de tensão ou deformação máxima, critério de tensão e deformação crítica à distância ou sobre uma zona, critérios de estado limite [50].

Tabela 8 -Critérios de rotura utilizados por diferentes autores (τ : Tensão de corte; τ_r : Resistência ao corte; σ :Tensão normal; σ_r : Resistência à tração; γ :Deformação angular plástica; γ_p : *Plastic shear failure strain*; GY: Cedência generalizada; ϵ_e : *Equivalent strain* (von Mises); ϵ_r : Tensile failure strain; σ_{comp} : Tensão axial à compressão) [51]

Modelos	Tipo de análise	Critério de rotura
Volkersen [43]	Análise elástica	$\tau > \tau_r$
Goland e Reissner [52]	Análise elástica	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
Hart-Smith [53]	Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
	Análise não linear	$\gamma > \gamma_p$ ou GY
Bigwood e Crocombe [54]	Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
	Análise não linear	$\epsilon_e > \epsilon_r$ ou GY
Frostig et al. [55]	Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
Adams e Mallick [56]	Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
	Análise não linear	$\epsilon_e > \epsilon_r$ ou GY
	Módulo efetivo	$\epsilon_e > \epsilon_r$
	Rotura transversal do compósito	$\sigma_{comp} > \sigma_{r\ comp}$
Wang et al. [57]	Análise não linear total	$\epsilon_e > \epsilon_r$ ou GY
Adams et al. [47]	Aderente elástico e adesivo dúctil	GY
	Aderente elasto-plástico	Cedência do aderente

2.3.2. Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados pelo processo de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fendas pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [58]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [59] relativo ao estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-

se de forma estável, antes da rotura final [60]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [61] e por Rice [62] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia à tração e corte, G_I ou G_{II} respetivamente, e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [63], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. No entanto, a fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na solitação [64].

2.3.3. Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com os estudos de Barenblatt [65] e Dugdale [66], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caraterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [67].

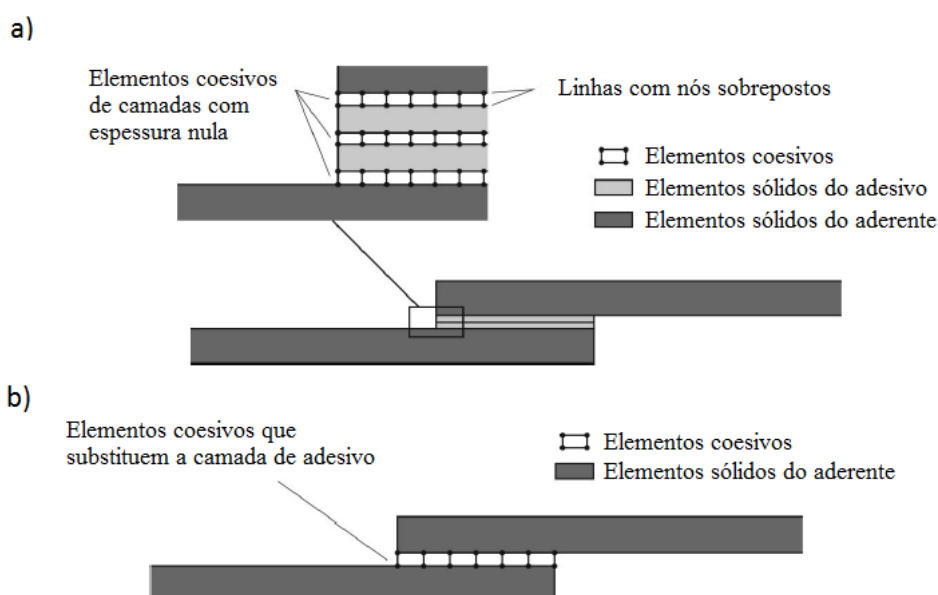


Figura 13 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [68])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [69]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos.

A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 13), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos - aproximação local [70], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva - aproximação contínua [71].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e consequentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [72]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do Abaqus®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. Relativamente ao modelo 2D, o modelo 3D apresenta uma componente adicional de corte [73].

2.3.4. Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [74] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [75] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [67].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [76]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [77] ou do número de ciclos para análises de fadiga [78, 79]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [80].

Hua et al. [81] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a

degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [82] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.3.5. Método de elementos finitos eXtendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de (espessura) t_{n0}/t_{s0} ou δ_{n0}/δ_{s0} (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{m\acute{a}x}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [83]. Belytschko e Black [84], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseado no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [85]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano estabelecidas entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [86].

2.3.6. Métodos sem malha

Os métodos sem malha são identificados pela sua função de aproximação e esquema de integração. Nestes métodos, a conectividade nodal é alcançada pela sobreposição de domínios de influência, contrariamente à utilização de elementos característicos do método de elementos finitos. Os métodos sem malha surgiram de forma a eliminar as limitações que se encontravam associadas à malha.

A realidade é que, embora este método ofereça algumas vantagens quando comparado com o método de elementos finitos, nomeadamente a eliminação de limitações relativas à fratura, a sua utilização na previsão da resistência de juntas adesivas ainda não está explorada na sua totalidade [49]. Ao longo do tempo surgiram diversos novos métodos, nomeadamente [87]:

- *Reproducing kernel particle method* (RKPM);
- *Element free Galerkin method* ((EFG);
- *Radial Basis Function* (RBF);
- *Meshless Local Petrov-Galerkin Method* (MLPG);
- *Point Collocation Method* (PCM);
- *Radial Point Interpolation Method* (RPIM);
- *Natural Neighbour Radial Point Interpolation Method* (NNRPIM)

2.3.7. Estado-da-arte

Vários são os autores que se têm dedicado ao estudo da previsão de resistência das juntas adesivas, o que tem conduzido a diversos estudos, teorias e novos desenvolvimentos. Na Tabela 9 são apresentados vários novos desenvolvimentos acerca da previsão de resistência estática de juntas adesivas.

Tabela 9 - Estudos relacionados com a previsão de resistência de juntas adesivas

Artigo	Descrição
Ramalho et al. [49] - Previsão de resistência estática de juntas adesivas	Este trabalho consiste numa revisão do estado-da-arte dos diferentes métodos de previsão aplicáveis a ligações adesivas. Em função da pesquisa realizada concluiu-se que os métodos analíticos são geralmente limitados a avaliações iniciais de projeto ou a juntas simples. Por outro lado, os métodos numéricos são mais comumente usados, especialmente quando o projeto da junta é complexo. Entre os diferentes métodos numéricos, os modelos de dano coesivo (MDC) são o método mais popular para prever a resistência de juntas adesivas. Esta abordagem é capaz de prever a resistência de uma ampla gama de projetos de juntas com erros mínimos. No entanto, é necessária a determinação das leis coesivas que geralmente mudam de acordo com os diferentes parâmetros geométricos das juntas. Técnicas numéricas avançadas, como o MEFX ou Métodos Sem Malha, têm sido usadas para estudar juntas adesivas, mas sua aplicação precisa de melhorias antes que estas possam ser utilizadas de forma generalizada.

Tabela 9 - Estudos relacionados com a previsão de resistência de juntas adesivas (continuação)

De Sousa et al. [88] - Visão geral das diferentes técnicas de previsão de resistência para juntas de sobreposição simples	Este estudo teve como objetivo comparar diferentes métodos analíticos e numéricos na previsão de resistência de juntas de sobreposição simples com diferentes comprimentos de sobreposição. As juntas adesivas foram produzidas com aderentes de alumínio, com um adesivo frágil (Araldite AV138), um adesivo moderadamente dúctil (Araldite 2015) e um adesivo poliuretano dúctil (Sikaforce 7888). Foram utilizados diferentes métodos analíticos em conjunto com MDC e o MEFX. Através da realização deste estudo foi possível concluir que a utilização de métodos analíticos fornece resultados relativamente precisos em condições muito específicas. A utilização de MDC triangular revelou ser um método muito preciso excetuando-se as juntas com adesivos muito dúcteis. Por outro lado, a análise através da utilização do MEFX não foi tão adequada como a anterior, especialmente no que concerne ao crescimento de fissuras em modo misto.
Fernandes e Campilho [89] - Precisão das leis de coesão com diferentes formas para a previsão do comportamento ao corte de juntas adesivas	Este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar a resistência à fratura por corte e as leis de modelos de dano coesivo de juntas adesivas para três adesivos com ductilidade distinta através da utilização de geometria de teste <i>End-Notched Flexure</i> (ENF). Este estudo experimental consistiu na caracterização da tenacidade à fratura ao corte pela integral <i>J</i> . Para esta última, foi utilizada a correlação de imagem digital para avaliar o deslocamento de corte da camada adesiva acoplada a um código em <i>Matlab</i> para extração deste parâmetro de forma automática. No <i>Abaqus</i> foram também realizadas simulações de MEF para avaliar a precisão de leis coesivas triangular, trapezoidal e linear-exponencial no comportamento experimental dos testes ENF. Com a realização deste estudo experimental foi possível concluir que, os dados de fratura fornecidos permitem a previsão da resistência das juntas adesivas.
Machado et al. [90] - Modelação numérica e validação experimental de juntas adesivas em degraus	Este estudo tem como objetivo validar o MEFX e prever o comportamento de juntas adesivas em degrau com o adesivo Araldite. Para este efeito, foram avaliadas as tensões de arrancamento e de corte no adesivo que permitem uma análise do comportamento do adesivo face a condições geometricamente distintas. De forma a prever a resistência pelo MEFX foram utilizados diferentes critérios de início de dano baseados em tensões e deformações, e avaliadas as leis de propagação de dano linear e exponencial. Através deste estudo concluiu-se que o MEFX é um método adequado para prever a resistência de uma junta adesiva com a utilização do critério de iniciação de tensão quadrática e tensão máxima.
Resende et al. [91] - Abordagem de conceção de juntas adesivas elasto-plásticas através de um método sem malha de interpolação de pontos radiais	No presente trabalho foram estudados os parâmetros e critérios que influenciam o desempenho de uma junta adesiva. O estudo numérico foi realizado através da implementação de critérios <i>von Mises</i> e <i>Exponent Drucker-Prager</i> no método sem malha RPIM. O estudo foi realizado para juntas com adesivos frágeis a dúcteis com comprimentos de sobreposição variados. Foram analisadas as distribuições de tensões e deformações na camada adesiva e a carga de rotura (P_m) foi avaliada por critérios da mecânica dos materiais. Em suma, o RPIM foi considerado como uma ferramenta com potencial no que concerne à previsão do comportamento de juntas adesivas.

3. Desenvolvimento

3.1. Planeamento de experiências

Tal como mencionado no subcapítulo 2.1, de modo a garantir a qualidade de impressão e a ligação de todas as camadas, as diferentes combinações de parâmetros utilizados em processos de fabrico aditivo, nomeadamente FFF, são limitadas. Segundo Pérez et al. [92] e Lokesh et al. [93], parâmetros como a espessura de cada camada, a velocidade de impressão, ângulos de construção, padrões e densidades de enchimento influenciam de maneira diferente as propriedades dos componentes. Assim sendo, foram analisadas as fichas técnicas de cada material utilizado, presentes no Anexo A e B, de modo a garantir uma melhor qualidade de impressão.

Foram utilizados dois tipos de materiais poliméricos:

- Poliamida sem reforço (PA s/FC);
- Poliamida reforçada com fibra de carbono (PA c/FC).

A poliamida sem reforço constitui um termoplástico amplamente utilizado no fabrico aditivo, devido à sua boa resistência mecânica, elevada tenacidade e capacidade de dissipar energia antes da fratura, embora apresente maior ductilidade e menor rigidez em comparação com materiais reforçados.

A poliamida com fibra de carbono resulta da combinação da matriz polimérica com fibras curtas de carbono, originando um material com rigidez superior, maior resistência à tração e menor deformabilidade, mas também com fratura mais abrupta e comportamento mais frágil. A incorporação de fibras aumenta a estabilidade dimensional e reduz a contração térmica durante a impressão, o que limita o aparecimento de empeno, mas eleva a complexidade do fabrico e pode introduzir heterogeneidades microestruturais.

Os parâmetros utilizados na impressão estão presentes na Tabela 10 e a impressora utilizada durante o processo foi uma Prusa MK3S (Figura 14).

É importante referir que no caso da poliamida com reforço de fibra de carbono, a maior rigidez do filamento e a presença de fibras introduzem maior complexidade no processo de extrusão, exigindo uma espessura de linha de 0,6 mm de forma a garantir um fluxo estável e uma deposição consistente. Já a poliamida sem reforço apresenta maior facilidade de impressão, permitindo a utilização de uma espessura de linha inferior, de 0,4 mm, o que assegura melhor definição geométrica e acabamento superficial. Esta diferença nos parâmetros de impressão

Desenvolvimento

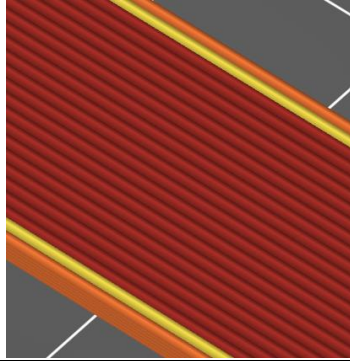
refletiu-se na qualidade final das peças e destacou a necessidade de adaptar a estratégia de fabrico aditivo às características específicas de cada material

Tabela 10 - Parâmetros de impressão

Material	PA	PA c/ FC
Temperatura da mesa de adesão [°C]	90	90
Temperatura de extrusora [°C]	275	275
Velocidade de impressão [mm/s]	30	30
Altura de camada [mm]	0,2	
Espessura de linha [mm]	0,4	0,6
Espessura de parede exterior [mm]	1,2 (3 linhas)	
Espessura de camadas base e topo [mm]	0,8	
Espessura de extrusor [mm]	0,4	0,6

Padrão de enchimento

Unidirecional - sentido da força



Densidade de enchimento	100%
-------------------------	------

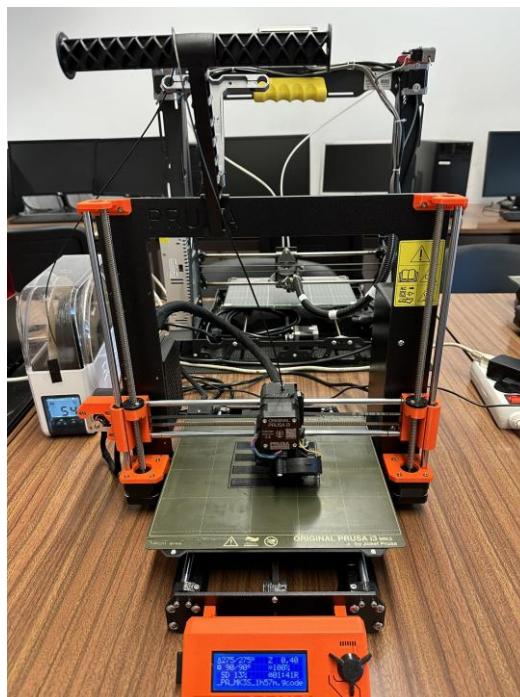


Figura 14 - Prusa MK3S

3.2. Geometria selecionada

A existência de múltiplas tipologias geométricas de juntas adesivas, amplamente reconhecida pela literatura, reflete a diversidade de soluções disponíveis, cada uma com características e aplicações distintas [34], que merecem análise detalhada. No âmbito da presente dissertação são analisadas três geometrias diferentes, designadamente:

- Juntas de sobreposição simples;
- Juntas em degrau;
- Juntas de chanfro interior.

As juntas de sobreposição simples (Figura 15 a), conforme já referido no subcapítulo 2.2.5, destacam-se por serem das mais utilizadas na indústria, devido à sua simplicidade de fabrico e à sua boa resistência ao esforço de corte. No entanto, a não colinearidade do carregamento pode conduzir à flexão da junta, flexão essa que provoca tensões de arrancamento significativas que podem comprometer o seu desempenho.

Por outro lado, as juntas em degrau (Figura 15 c), representam uma alternativa geométrica com o intuito de reduzir os esforços de arrancamento, de modo a proporcionar um comportamento estrutural mais favorável quando comparadas com as juntas de sobreposição simples. Esta configuração permite distribuição mais homogênea de tensões, tornando-a particularmente adequada para aplicações onde predominam forças de arrancamento.

Por último, as juntas de chanfro interior (Figura 15 b), apresentam a vantagem de atenuar os gradientes de tensões no adesivo. Esta geometria de juntas contribui para uma distribuição mais uniforme das forças, o que resulta numa maior durabilidade e resistência à fadiga.

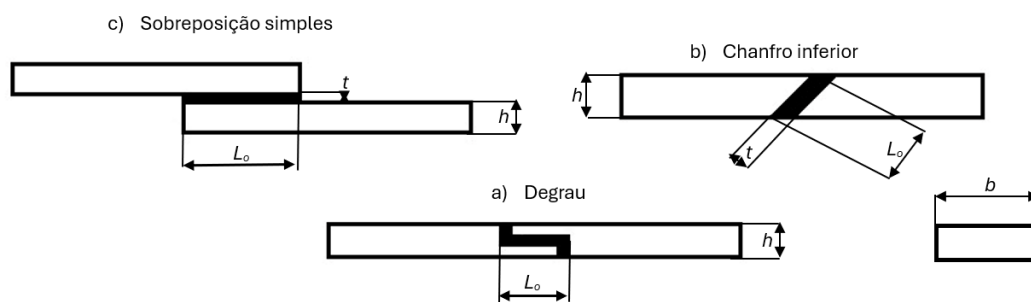


Figura 15 - Geometria de juntas utilizada

Para o **provete de sobreposição simples** e para o **provete de chanfro interior** a área de sobreposição foi determinada através da equação

$$A = L_o \times b, \quad (1)$$

Onde:

- A é a área de sobreposição (mm^2);
- L_o é o comprimento de sobreposição efetivamente medido (mm);

- b é a largura do provete (mm).

Por outro lado, para o **provete em degrau**, a área de sobreposição foi determinada através da equação

$$A = b \times (h - t) + b \times L, \quad (2)$$

Onde:

- A é a área de sobreposição (mm²);
- h é a espessura total do provete (mm);
- t é a espessura da linha de adesivo e corresponde a 0,2 mm.

A b dos provetes permaneceu constante em todas as configurações de junta, com um valor fixo de 15 mm, o que garantiu a comparabilidade entre os diferentes ensaios.

3.3. Materiais utilizados

3.3.1. Aderente

Para efeitos do presente trabalho experimental foi considerado o mesmo material base, a poliamida, distinguindo-se dois tipos de aderentes:

- Poliamida sem reforço (PA s/FC);
- Poliamida reforçada com fibra de carbono (PA c/FC).

No que concerne ao PA s/FC, foi utilizado um material da marca FormFutura denominado STYX PA6, que, segundo a ficha técnica datada de fevereiro de 2023, apresenta maior facilidade de impressão em comparação com outros filamentos de poliamida. Esta facilidade resulta da menor contração térmica durante o processo de arrefecimento e da melhor adesão entre camadas, fatores que reduzem o risco de empeno e de falhas de deposição. Para além disso, o material demonstra elevada adesão intercamadas, o que o torna um filamento versátil para impressão 3D de peças destinadas a aplicações finais. O STYX PA6 evidencia ainda boa resistência a combustíveis, lubrificantes e óleos, bem como propriedades mecânicas adequadas e elevada resistência ao impacto.

Quanto ao PA c/FC, o filamento utilizado é também da marca supramencionada, que combina o filamento anterior com 15% de fibras de carbono, ao qual se dá a designação de STYX PA6-CF15. Trata-se de um filamento reforçado com fibra de carbono de alto desempenho que resulta numa rigidez e resistência incomparáveis com outros tipos de filamentos.

A Tabela 11 apresenta as principais propriedades dos materiais selecionados e utilizados no âmbito desta dissertação.

Tabela 11 - Propriedades dos aderentes [94, 95]

Propriedades	PA s/FC	PA c/FC
Massa volúmica [g/cm ³]	1,15	1,18
Módulo de Young, E [MPa]	2900	9000
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	50	120
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	1,9	4

3.3.2. Adesivo

O Araldite® 2015 da marca Huntsman® é o adesivo considerado para o presente trabalho experimental. Este adesivo consiste numa pasta epóxida composta por dois componentes, a resina e o endurecedor, que curam à temperatura ambiente, o que o dá origem a uma ligação resiliente [96]. Após rotura, a pasta epóxida pode ser aplicada de duas formas, de forma robótica ou manualmente, pelo que se encontra disponível em cartuchos com um bico misturador que faz a mistura dos dois componentes e é aplicado como adesivo pronto para utilização. A Huntsman enfatiza ainda que o design adequado da junta é fundamental para uma ligação com maior durabilidade. O adesivo em apreço apresenta várias vantagens no que diz respeito à sua utilização, nomeadamente o bom desempenho de fadiga, a possibilidade de ligação de substratos distintos e a resistência a cargas dinâmicas.

As propriedades mecânicas e de fratura da Araldite® 2015 são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades mecânicas e de fratura Araldite 2015® [97]

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

* Valor de fabricante

3.4. Trabalho experimental

3.4.1. Determinação das propriedades dos aderentes

De modo a sustentar a análise experimental das juntas e aplicação dos modelos numéricos, procedeu-se à determinação das propriedades mecânicas dos aderentes de poliamida (PA s/FC)

e de poliamida reforçada com fibra de carbono (PA c/FC). Os provetes de tração foram fabricados por impressão 3D nas mesmas condições de fabrico dos aderentes utilizados nas juntas (matéria-prima, parâmetros de impressão, orientação das trajetórias e espessura de camada), de modo a garantir a comparabilidade dos resultados.

Os ensaios de tração foram realizados sob controlo de deslocamento, com a utilização da célula de carga adequada e, extensómetro na secção útil. A partir dos registos força-deslocamento extraíram-se os parâmetros relevantes para o estudo:

- Módulo de Young (declive do troço elástico por regressão linear);
- Tensão de cedência (critério de 0,2% de offset);
- Tensão máxima;
- Deformação/alongamento à rotura;
- Tensões a 0,05% e 0,25%.

Para cada material foram testados quatro provetes, registadas médias, desvios-padrão e coeficientes de variação, de modo a quantificar a repetibilidade e a dispersão associadas ao fabrico por impressão 3D (nomeadamente efeitos de anisotropia e de adesão intercamadas). Estes resultados servem simultaneamente para:

- Inserir propriedades do material no modelo de elementos finitos;
- Base para a interpretação dos modos de rotura observados nas juntas;
- Referência para a comparação entre PA s/FC e PA c/FC ao longo desta dissertação.

3.4.1.1. Fabrico de provetes *bulk*

Com o objetivo de alcançar as propriedades de materiais pretendidas foram impressos oito provetes, sendo que quatro são constituídos por poliamida sem adesão de fibra de carbono posteriormente designado por PA s/FC, e os restantes de poliamida com fibra de carbono posteriormente designado por PA c/FC para que estes pudessem ser testados e consequentemente extraídas as propriedades mecânicas dos mesmos.

O fabrico dos provetes *bulk* foi realizado segundo a norma ASTM D638-14 e consideradas as dimensões segundo a Figura 16 [98].

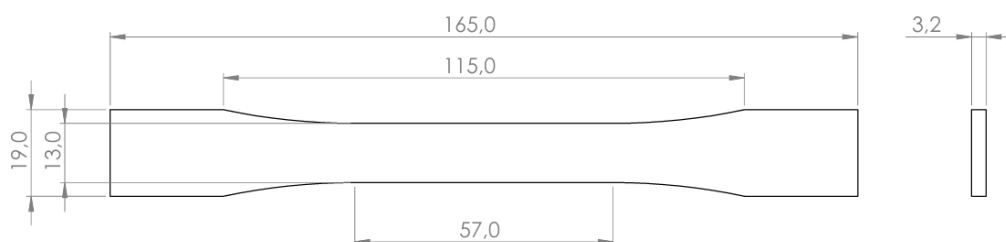


Figura 16 - Provette segundo a norma ASTM D638-14

3.4.1.2. Ensaio de tração

Com a finalidade de obter as propriedades dos provetes *bulk*, foram impressos quatro provetes de cada material, tal como mostra a Figura 17. Na Tabela A. 4 e na Tabela A. 5 do Apêndice A são indicadas as medidas da espessura e da largura da zona útil de cada provete, determinadas através de medições realizadas diretamente na zona útil com recurso a um paquímetro *Mitutoyo*, o qual possui uma resolução de 0,01 mm. Na Figura 17 são apresentados os provetes, sendo que os provetes de 1 a 4 correspondem a poliamida sem reforço de fibra de carbono (PA s/FC), enquanto os provetes de 5 a 8 correspondem a poliamida com reforço de fibra de carbono (PA c/FC).



Figura 17 - Provetes *bulk* (1-4 provetes em PA s/FC, 5-8 provetes em PA c/FC)

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 18). A máquina está equipada com uma célula de carga de 100 kN, bem como amarras de cunha capazes de garantir o não escorregamento dos provetes quando os mesmos se encontram a ser ensaiados. A velocidade de ensaio foi mantida constante em 2 mm/min.

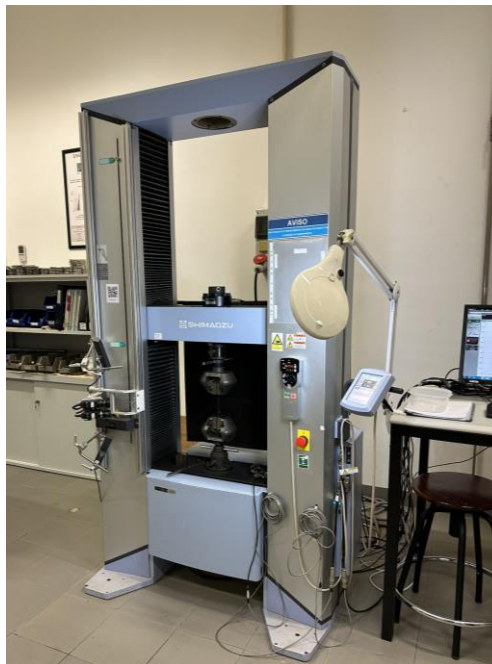


Figura 18 - Máquina de ensaios *Shimadzu Autograph AG-X 100*

Durante os ensaios foi utilizado um extensómetro mecânico capaz de medir as deformações longitudinais na zona útil do provete (Figura 19). O extensómetro possui um comprimento base (l_e) de 50 mm e o mesmo é colocado antes de o ensaio iniciar na zona útil de cada provete e retirado depois de 0,1 mm de extensão.



Figura 19 - Provete com extensómetro durante ensaio de tração

3.4.1.3. Modos de rotura

Os provetes foram tracionados até à sua rotura, que ocorreu na maioria dos casos na zona útil dos provetes. No entanto também foram registados provetes nos quais a rotura se deu na zona do raio da curvatura, como é possível observar na Figura 20. O facto de a rotura não acontecer de igual modo em todos os casos poderá ter sucedido devido a um desnivelamento da mesa de

adesão que ocorreu durante a impressão dos provetes, ou seja, quando o extrusor passa numa zona da mesa em que a distância entre ambos (extrusor e mesa) seja mais elevada. Nestas situações pode ocorrer má homogeneidade da junção das linhas, o que significa que a fusão entre estas não é uniforme.

O PA s/FC foi o material utilizado para fabricar os provetes numerados de 1 a 4 na Figura 20. Neste caso, primeiramente ocorreu a estrição do provete e só em momento ulterior ocorreu a sua rotura. Os provetes da Figura 20 com a numeração de 5 a 8 foram fabricados com PA c/FC. Nestes provetes, verificou-se uma rotura frágil distintamente dos casos dos provetes mencionados anteriormente.



Figura 20 - Modos de rotura dos provetes *bulk*

3.4.1.4. Curvas $P-\delta$

Durante os ensaios de tração foram recolhidos dados que permitem a obtenção das curvas $P-\delta$. Através dos gráficos representados na Figura 21 possível observar as curvas $P-\delta$ dos provetes fabricados em PA s/FC e PA C/FC. Desta forma, em cada ensaio de tração é possível comprovar que, na zona elástica, existem momentos em que ocorrem pequenas quebras de rigidez resultantes da remoção do extensómetro, mas que são desconsideradas aquando do cálculo da zona elástica.

Posteriormente a examinar as curvas $P-\delta$ é realizada uma análise dos dados que foram coletados, juntamente com o cálculo de médias de forças máximas e deslocamentos de rotura. Ao observar os gráficos é possível extrair algumas inferências:

- Os ensaios de tração dos provetes fabricados em PA s/FC demonstram coincidência de comportamento tanto na zona elástica como na zona dúctil e na força máxima atingida. Apenas o deslocamento varia até ocorrer a rotura. Após a obtenção das forças máximas, constata-se que os provetes permaneceram deformados plasticamente, o que dá origem a uma zona plástica acentuada.

- Os ensaios de tração dos provetes fabricados em PA c/FC demonstram uma consistência dos resultados na zona elástica e as forças máximas atingidas são aproximadamente semelhantes. Na zona dúctil, os deslocamentos de cada provete evidenciam diferenças mínimas entre si.

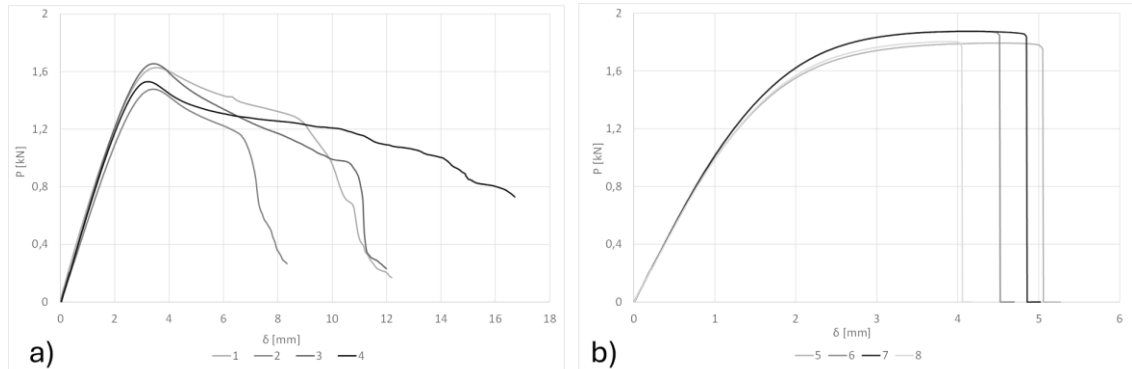


Figura 21 - Curvas P - δ dos provetes: a) PA s/FC; b) PA c/FC

A análise comparativa entre os provetes fabricados em PA s/FC (provetes 1 a 4) e em PA c/FC (provetes 5 a 8) evidencia diferenças significativas no comportamento mecânico. Os provetes em PA s/FC atingiram forças máximas próximas de 1,5-1,6 kN e alongamentos elevados até à rotura, com deslocamentos da ordem dos 12 a 15 mm. Este comportamento revela maior ductilidade e capacidade de dissipação de energia antes da falha.

Por outro lado, os provetes em PA c/FC demonstraram maior rigidez inicial, com uma inclinação mais acentuada na zona elástica, e alcançaram forças máximas ligeiramente superiores, em torno de 1,7-1,8 kN. Este resultado traduz um aumento de resistência na ordem dos 8 a 12% em relação aos provetes sem reforço. Contudo, a ductilidade revelou-se bastante inferior, uma vez que os deslocamentos máximos ficaram limitados a cerca de 4,5-5 mm, o que corresponde a uma redução superior a 60% relativamente aos provetes em PA s/FC.

De forma global, a introdução de fibras de carbono na matriz polimérica resultou num material mais resistente e rígido, mas também mais frágil, com menor capacidade de deformação plástica e rotura mais abrupta. Assim, verifica-se que os provetes em PA s/FC privilegiam a ductilidade e a absorção de energia, enquanto os provetes em PA c/FC asseguram maior resistência, embora à custa da redução da tenacidade.

3.4.1.5. Curvas σ - ϵ nominais e reais

A Figura 22 apresenta as curvas nominais σ - ϵ obtidas a partir da equação (3), que permite calcular as tensões com base na força e na área da secção inicial.

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.

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

O cálculo da deformação, ε , segue equação (4) em que ΔL [mm] corresponde ao deslocamento registado pelo extensómetro e L_o corresponde à distância inicial do extensómetro (50 mm).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (4)$$

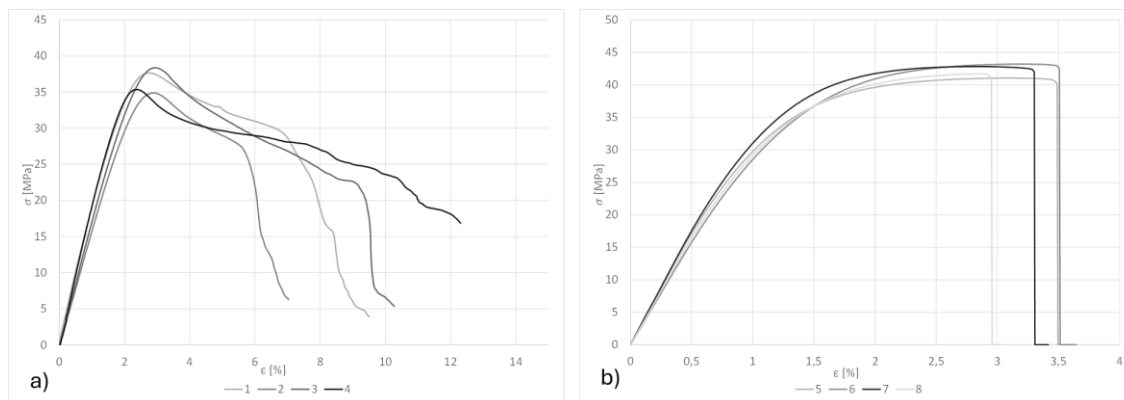


Figura 22 - Curvas σ - ε dos provetes: a) PA s/FC; b) PA c/FC

Através do recurso à interseção de uma reta com declive paralelo à curva σ - ε é realizado um cálculo da tensão limite elástica à tração para uma deformação de 0,2%. A Figura 23 mostra o processo realizado para o provete 1 de PA s/FC.

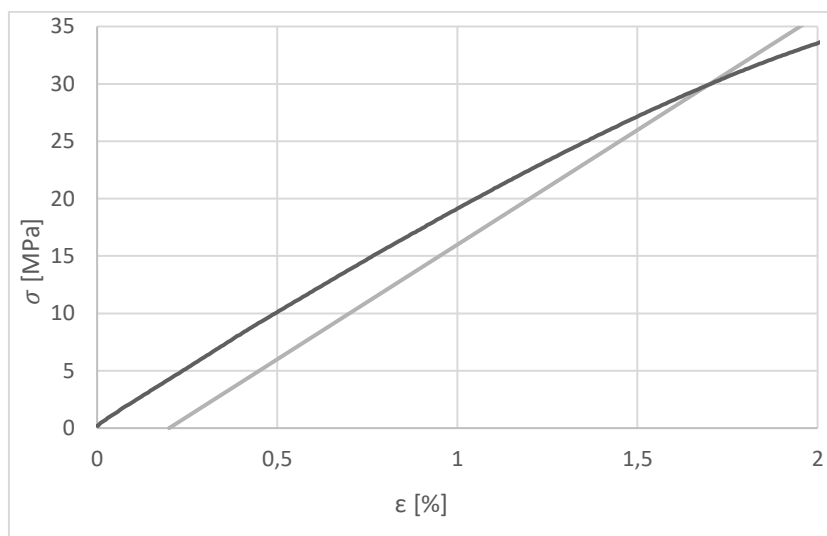


Figura 23 - Tensão limite elástico à tração

A Figura 23 apresenta a determinação da tensão limite elástica à tração (σ_y) para o provete 1 de PA s/FC, recorrendo ao método da *offset line*. Neste procedimento traça-se uma reta paralela ao declive inicial da curva σ - ε , correspondente ao módulo de elasticidade, deslocada horizontalmente de 0,2% de deformação. O ponto de interseção entre a reta traçada e a curva experimental define o valor da tensão limite elástica do material.

3.4.1.6. Resumo e análise de resultados

A Tabela 13 e Tabela 14 apresenta os dados relevantes para a continuidade do projeto, e demonstram as propriedades mecânicas dos dois materiais em apreço que foram possíveis de estimar com os ensaios de tração realizados.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração nos provetes de PA s/FC

Proвете	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Deformação de tensão máxima [%]	Along. Máximo [mm]	Tensão a 0,05% [MPa]	Tensão a 0,25% [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	1627,19	12,19	29,98	37,65	2,72	9,51	1,17	5,16	1998,22
2	1477,29	8,33	28,83	34,87	2,85	7,03	0,27	3,60	1663,48
3	1655,01	11,98	29,79	38,37	2,91	10,27	0,56	4,19	1817,53
4	1529,33	14,53	32,58	35,35	2,39	10,69	0,31	4,21	1953,64
Média	1572,20	11,76	30,30	36,56	2,72	9,37	0,57	4,29	1858,22
Desv. Padrão	83,11	2,56	1,60	1,71	0,23	1,64	0,41	0,64	150,86
CoV [%]	5,29	21,77	5,30	4,67	8,63	17,48			8,11

Tabela 14 - Propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração nos provetes de PA c/FC

Proвете	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Deformação de tensão máxima [%]	Along. Máximo [mm]	Tensão a 0,05% [MPa]	Tensão a 0,25% [MPa]	Módulo de Young [MPa]
5	1758,05	5,26	32,21	41,05	3,05	3,64	1,74	8,58	3419,75
6	1875,29	4,69	33,01	43,19	3,20	3,64	1,42	7,76	3169,28
7	1873,78	5,02	34,19	42,81	2,75	3,41	1,74	8,81	3537,01
8	1803,14	4,16	32,69	41,68	2,82	3,03	1,61	8,19	3290,97
Média	1827,57	4,78	33,03	42,18	2,96	3,43	1,63	8,33	3354,26
Desvio Padrão	57,27	0,47	0,84	0,99	0,20	0,28	0,15	0,46	159,06
CoV [%]	3,13	9,91	2,55	2,34	6,93	8,31			4,74

As Tabela 13 e a Tabela 14 revelam os resultados dos ensaios de tração realizados em provetes de PA s/FC e PA c/FC, respetivamente. A análise comparativa entre ambos os materiais, evidencia diferenças significativas nas propriedades mecânicas, refletindo os efeitos da adição do reforço na matriz polimérica.

Os provetes de PA c/FC apresentaram um desempenho superior em termos de resistência mecânica. A força máxima média aumentou de 1572,20 N (PA s/FC) para 1827,57 N (PA c/FC). A tensão máxima média passou de 36,56 MPa para 42,19 MPa, o que corresponde a um

acréscimo de aproximadamente 15,4%. A tensão limite elástica a 0,2% também foi mais elevada nos provetes reforçados, com média de 33,03 MPa, em comparação com 30,30 MPa nos provetes sem reforço, valor que representa um aumento de cerca de 9%.

Um dos resultados mais expressivos refere-se ao E , que aumentou de 1858,22 MPa para 3354,26 MPa com a adição das fibras de carbono, o que indica um ganho de aproximadamente 80% em rigidez estrutural. Este comportamento é corroborado pelo aumento das tensões a baixos níveis de deformação: a tensão a 0,05% passou de 0,58 MPa para 1,63 MPa, e a tensão a 0,25% praticamente duplicou, de 4,30 MPa para 8,34 MPa.

Apesar das melhorias em resistência e rigidez, o uso do reforço comprometeu a ductilidade do material. O alongamento máximo reduziu de 9,38% para 3,44%, o que representa uma diminuição de cerca de 63%. O deslocamento máximo também apresentou uma queda expressiva, de 11,76 mm para 4,79 mm, correspondente a uma redução aproximada de 59%. Estas reduções evidenciam um comportamento mais frágil do PA c/FC, característica típica de materiais reforçados com fibras, que apresentam menor capacidade de deformação antes da rotura.

Outro aspeto positivo observado nos provetes de PA c/FC foi a maior homogeneidade dos resultados. Os valores de desvio padrão e CoV foram consideravelmente menores em comparação ao grupo de PA puro, indicando maior consistência nas propriedades mecânicas entre os provetes testados.

Em síntese, a adição de fibras de carbono à matriz de poliamida proporcionou benefícios substanciais em resistência mecânica e rigidez, ao custo de uma redução na ductilidade. Tais resultados indicam que o PA c/FC é mais adequado para aplicações onde se prioriza a resistência e estabilidade dimensional, enquanto o PA s/FC pode ser vantajoso em contextos que exijam maior flexibilidade e capacidade de deformação.

A comparação entre os valores experimentais e os dados fornecidos pelo fabricante evidencia discrepâncias significativas em vários parâmetros mecânicos. Para o PA s/FC, a tensão máxima média obtida experimentalmente foi de 36,56 MPa, cerca de 27% inferior ao valor de referência de 50 MPa, enquanto o módulo de Young médio registado, de 1858,22 MPa, ficou aproximadamente 36% abaixo do valor indicado de 2900 MPa. Em contrapartida, o alongamento máximo médio atingiu 9,37%, valor muito superior ao reportado pelo fabricante (1,9%), o que revela um comportamento substancialmente mais dúctil. No caso do PA c/FC, a tensão máxima média foi de 42,18 MPa, cerca de 65% inferior ao valor de 120 MPa referido na ficha técnica, e o módulo de Young médio alcançou 3354,26 MPa, aproximadamente 63% abaixo do valor de referência de 9000 MPa. O alongamento máximo médio, de 3,44%, apresentou-se próximo do valor indicado pelo fabricante (4%), com uma diferença de apenas 14%.

Assim, o PA s/FC revelou menor resistência e rigidez, mas maior ductilidade do que o previsto, enquanto o PA c/FC manteve valores de alongamento coerentes com os dados de referência, embora com reduções expressivas na resistência e na rigidez.

3.4.2. Determinação das propriedades das juntas adesivas

3.4.2.1. Processo de fabrico

Após a impressão 3D de todos os aderentes, procedeu-se ao fabrico das juntas adesivas correspondentes às geometrias em estudo:

- **Juntas de Sobreposição simples**, que representam a configuração mais tradicional e de fabrico mais direto, embora sejam frequentemente afetadas por tensões de arrancamento;
- **Juntas em degrau**, que permitem uma melhor distribuição das tensões ao longo da interface adesiva, ainda que apresentem maior complexidade de fabrico;
- **Juntas de chanfro interior**, concebidas para reduzir concentrações de tensão e aumentar a resistência, especialmente com o incremento do comprimento do chanfro.

Para cada configuração geométrica foram testados quatro provetes, para três configurações por tipo de junta. Considerando os dois materiais estudados (PA s/FC e PA c/FC), foram testados 72 provetes no total, número que assegura representatividade estatística dos resultados e permite avaliar de forma comparativa o impacto do material e da geometria no desempenho estrutural das juntas.

Numa primeira fase, as superfícies de adesão dos aderentes foram preparadas através da lixagem manual com lixa de grão 80, com o objetivo de aumentar a rugosidade superficial e, consequentemente, melhorar a adesão. Em seguida, as superfícies foram limpas com acetona, de forma a remover resíduos de pó e contaminantes, de modo a garantir uma superfície limpa e pronta para a aplicação do adesivo. Concluída a preparação superficial, os aderentes foram posicionados em *gabarits* específicos para garantir o correto alinhamento e a sobreposição precisa durante a cura do adesivo (Figura 24).



Figura 24 - Fabrico de provetes: a) Superfície lixada no provete; b) provete em *gabarit*

Subsequentemente, foi colocado um fio de pesca com diâmetro calibrado de 0,2 mm na zona de aplicação do adesivo, com o propósito de assegurar uma espessura uniforme da linha adesiva. Esta técnica permitiu garantir a repetibilidade do processo e a consistência geométrica entre todas as juntas fabricadas (Figura 25).

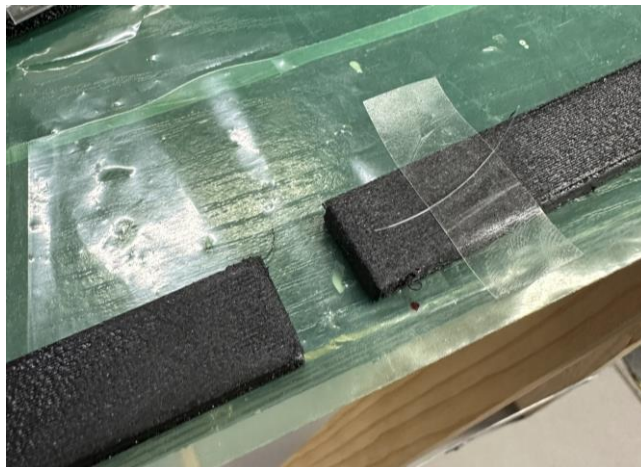


Figura 25 - Provete com o fio de pesca com diâmetro calibrado de 0,2 mm

Após garantida a espessura uniforme da linha de adesivo, procedeu-se à aplicação do adesivo com recurso a uma pistola de aplicação e bico de mistura bicomponente, que assegura a dosagem e homogeneização corretas dos dois componentes do sistema adesivo. O adesivo foi então aplicado manualmente de forma a cobrir uniformemente toda a superfície adesiva do aderente, de acordo as dimensões de sobreposição definidas (Figura 26).



Figura 26 - Aplicação do adesivo

Os aderentes permaneceram em colagem durante 24 horas, tempo necessário para assegurar a cura completa do adesivo de acordo com as especificações do fabricante.

Desenvolvimento

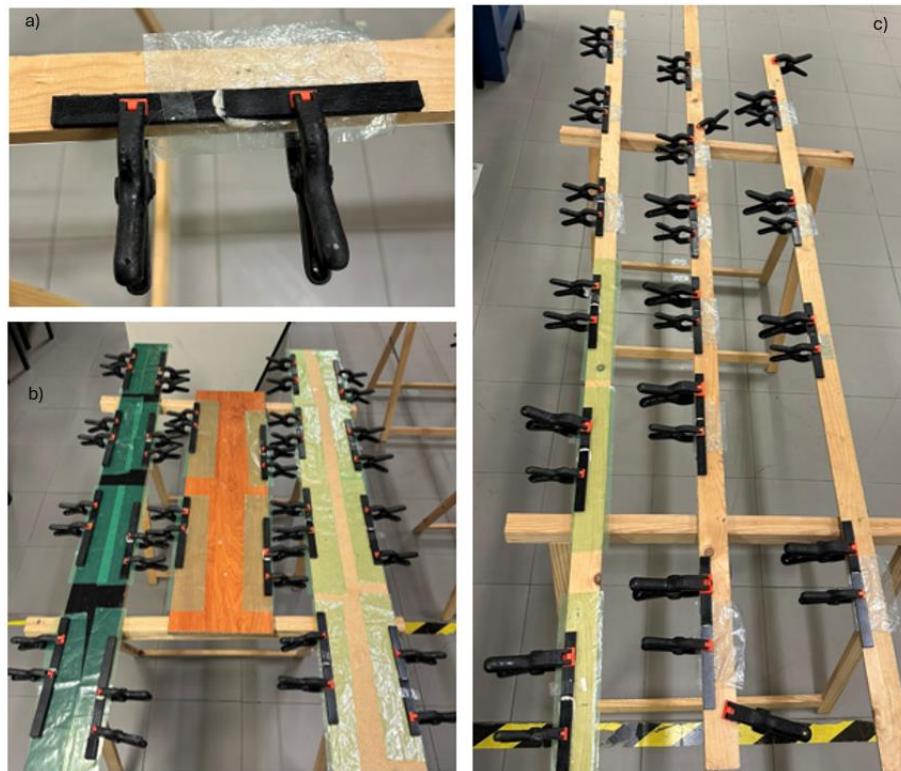


Figura 27 - Processo de cura de juntas adesivas: a) Exemplo de fixação individual dos provetes com recurso a grampos de aperto; b) Vista superior do conjunto de provetes em fase de cura, devidamente alinhados e pressionados; c) Estrutura de suporte utilizada para garantir a pressão e o posicionamento corretos durante a cura.

Após a cura, foi necessário remover o excesso de adesivo das juntas fabricadas com auxílio de uma fresa, de forma a reproduzir a geometria da junta realizada, conforme representado na Figura 28.

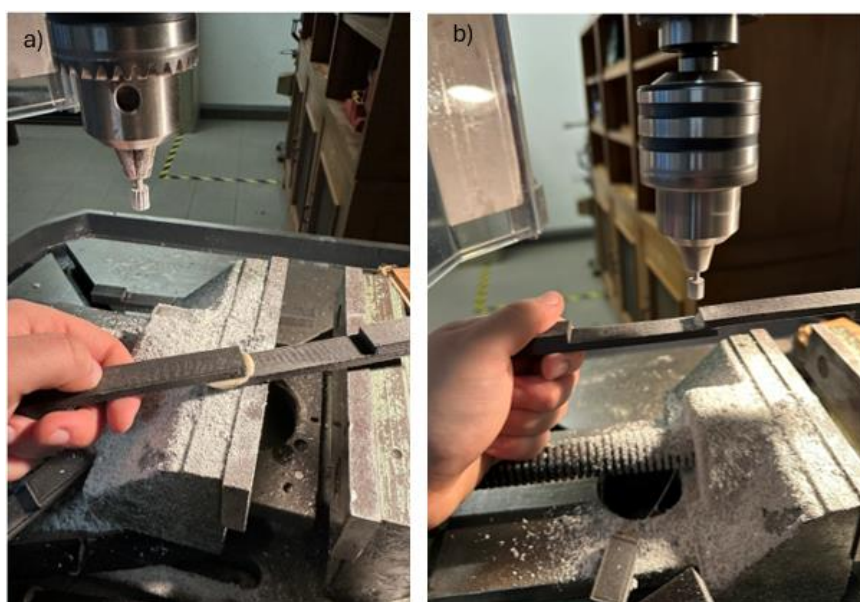


Figura 28 - Remoção de excessos; a) antes de remover excessos; b) depois de remover excessos

3.4.3. Juntas de sobreposição simples

As juntas de sobreposição simples são caracterizadas pela ligação direta entre duas superfícies planas dos aderentes, através de uma área adesiva linear e paralela à direção da carga aplicada. Esta é uma das configurações mais comuns e elementares no estudo de ligações adesivas, sendo amplamente utilizada para analisar o desempenho do adesivo sob esforços de tração [99, 100]. No presente trabalho, foram fabricadas juntas de sobreposição simples (Figura 15) com três L_o : 5 mm, 10 mm e 20 mm. Esta variação teve como objetivo avaliar a influência do comprimento da zona adesiva no comportamento mecânico da junta, nomeadamente na resistência à tração e na distribuição de tensões ao longo da interface adesiva. Antes da realização dos ensaios de tração, foi efetuada a medição do comprimento de sobreposição em ambos os lados de cada provete, de forma a verificar a precisão dimensional das juntas fabricadas. Na Tabela A. 1 do Apêndice A são apresentados os valores de L_o obtidos experimentalmente.

3.4.3.1. Modos de rotura

Com o intuito de analisar o desempenho das juntas adesivas desenvolvidas neste trabalho, foi realizada a caracterização dos modos de rotura dos provetes em PA s/FC e em PA c/FC. Esta análise permite compreender de forma mais aprofundada o comportamento mecânico das diferentes configurações de junta, bem como a influência do reforço com fibra de carbono na integridade da ligação adesiva, sendo bastante útil para a comparação com o modelo numérico. A observação das superfícies fraturadas após os ensaios de tração permitiu identificar o tipo de rotura predominante: coesiva no adesivo, ou pelo aderente. A identificação destes modos de rotura é essencial para interpretar os resultados obtidos e para avaliar a qualidade das ligações adesivas estabelecidas.

De seguida, são apresentados os modos de rotura observados nos provetes correspondentes às juntas de sobreposição simples com L_o de 5, 10 e 20 mm. Na Tabela 15 são discriminados os modos de rotura para cada provete. A Figura 29 ilustra os diferentes casos: em (a) provetes em PA s/FC com $L_o=5$ mm; em (b) provetes em PA c/FC com $L_o=5$ mm; em (c) provetes em PA s/FC com $L_o=10$ mm; em (d) provetes em PA c/FC com $L_o=10$ mm; em (e) provetes em PA s/FC com $L_o=20$ mm; e em (f) provetes em PA c/FC com $L_o=20$ mm.

Tabela 15 - Modo de rotura para provetes de sobreposição simples

L_o [mm]	5		10		20	
Proвете	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC
1	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
2	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
3	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
4	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente

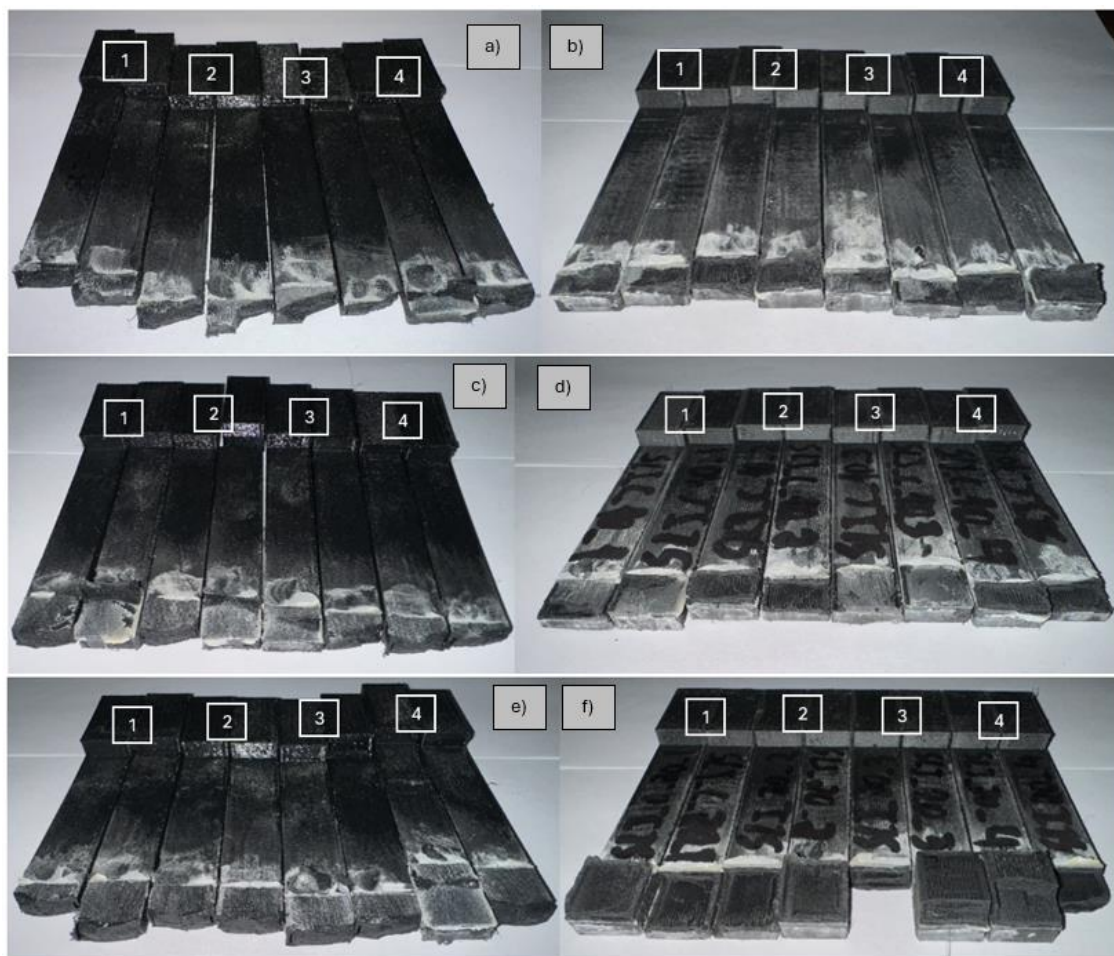


Figura 29 - Modo de rotura para provetes para provetes de sobreposição simples

3.4.3.2. Curvas $P-\delta$

Após a realização dos ensaios de tração nos provetes fabricados foram extraídas as curvas $P-\delta$ dos mesmos. Estas curvas permitem analisar o comportamento mecânico das juntas adesivas ao longo do carregamento, mediante a transmissão de informações relevantes sobre a rigidez inicial, o ponto de cedência, a força máxima suportada e o modo de rotura associado.

A análise destas curvas é essencial para a compreensão da resposta estrutural das diferentes configurações de junta estudadas, bem como para a comparação do desempenho adesivo em função do L_o ou da geometria da ligação. Ademais, serão apresentados e discutidos os principais parâmetros extraídos de cada curva, com o objetivo de identificar tendências e comportamentos típicos dos provetes.

De seguida, apresentam-se as curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios realizados às juntas de sobreposição simples. Foram consideradas três configurações distintas, com L_o de 5 mm, 10 mm e 20 mm, de forma a avaliar a influência deste parâmetro no comportamento mecânico das juntas. Os resultados encontram-se discriminados por material e encontram-se representados na Figura 30: em (a) e (b) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 5 mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 10 mm,

respetivamente; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 20 mm, respetivamente.

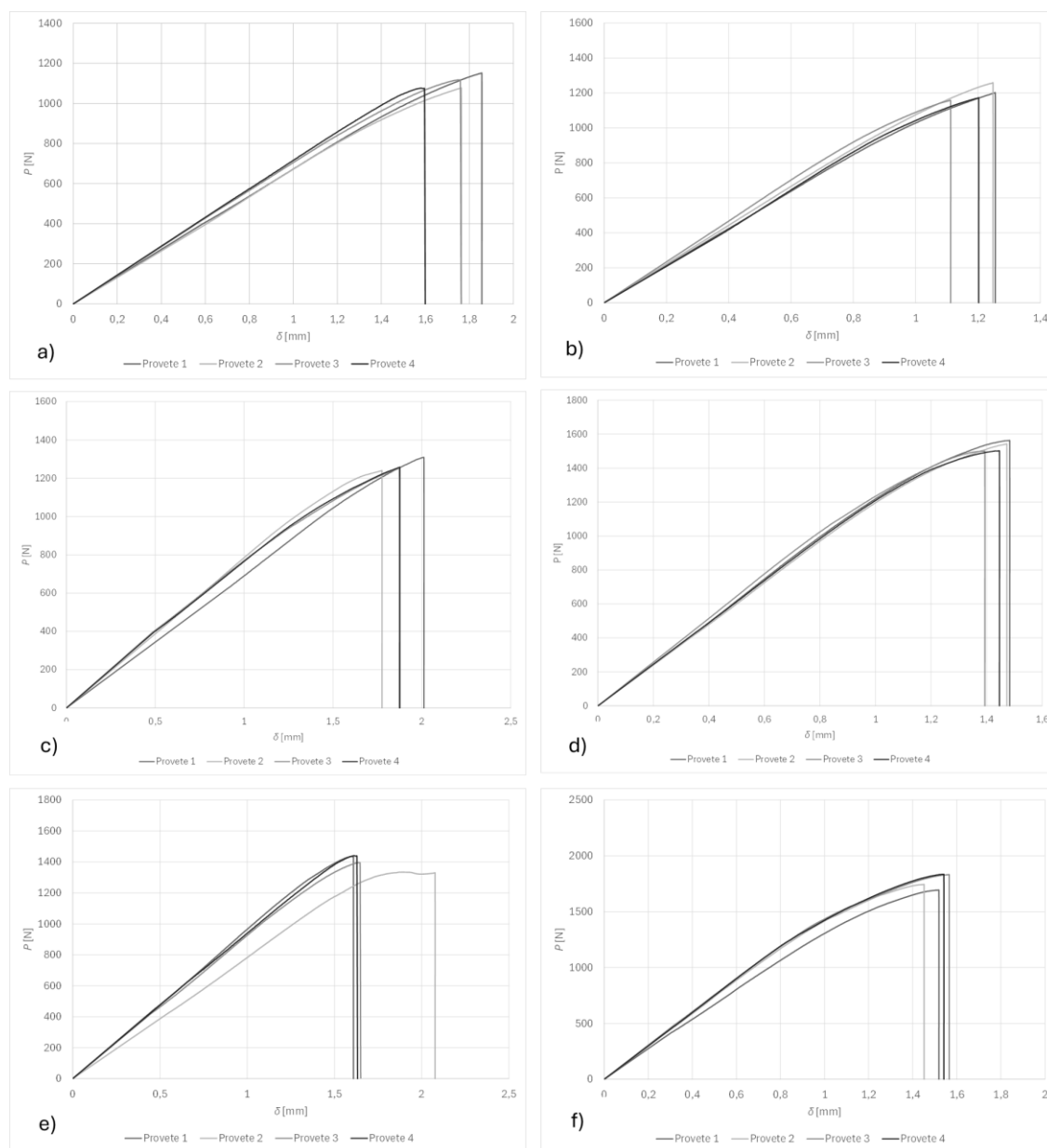


Figura 30 - Curvas P - δ para juntas de sobreposição simples: em (a) e (b) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 5 mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 10 mm, respetivamente; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 20 mm

As curvas P - δ obtidas para as juntas de sobreposição simples evidenciam diferenças claras entre os dois materiais, assim como a influência do L_o .

Nos provetes fabricados em PA s/FC apresentam comportamento mais dúctil, traduzido por deslocamentos mais elevados antes da rotura e por uma maior capacidade de dissipação de energia. Já os provetes em PA c/FC revelam uma resposta mais rígida, com maior inclinação inicial das curvas, mas também uma fratura mais súbita e frágil, apesar de suportarem cargas máximas superiores.

Relativamente ao L_o , verifica-se que a resistência e a energia de fratura aumentam de forma consistente com o incremento de L_o . Para $L_o=5$ mm, as juntas suportam cargas mais reduzidas e falham com deslocamentos limitados, refletindo a maior influência das tensões de arrancamento. Com $L_o=10$ mm, observa-se um ganho significativo de resistência e rigidez, acompanhado de um comportamento mais estável. Por fim, para $L_o=20$ mm, registam-se os valores mais elevados de carga máxima, sobretudo no caso das juntas em PA c/FC, que ultrapassam os 1800 N. No entanto, a fratura mantém-se abrupta nestes compósitos reforçados, enquanto nas juntas em PA s/FC surge uma maior variabilidade entre provetes.

De forma global, os resultados confirmam que o aumento do L_o melhora o desempenho estrutural das juntas adesivas, sendo o comportamento fortemente condicionado pelo tipo de material utilizado, com o PA s/FC a proporcionar maior ductilidade e o PA c/FC a garantir maior rigidez e resistência.

3.4.3.3. Rigidez das juntas

A rigidez (k) de um material pode ser definida, do ponto de vista matemático, como o declive da curva $P-\delta$ no regime elástico. Esta relação é expressa pela seguinte equação:

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

Onde:

- ΔF corresponde à variação da força no regime elástico;
- $\Delta \delta$ corresponde à variação de deslocamento no mesmo intervalo de ΔF ;

A Tabela 16 apresenta um resumo com os valores de rigidez das juntas adesivas (em N/mm), determinados a partir dos ensaios de tração realizados.

Tabela 16 - Rigidez das juntas adesivas de sobreposição simples

Provete	PA s/FC			PA c/FC		
<i>L</i> _o	5	10	20	5	10	20
1	700,31	741,32	1026,77	1101,98	1313,94	1427,96
2	720,85	838,76	851,80	1149,04	1286,30	1591,66
3	725,13	815,62	990,72	1218,09	1340,87	1544,36
4	737,36	804,34	967,52	1165,75	1288,81	1566,93
Média	720,91	800,01	959,20	1158,72	1307,48	1532,73
Desvio Pad	15,41	41,67	75,64	47,91	25,52	72,47
C _o V	2,14	5,21	7,89	4,14	1,95	4,73

A Tabela 16 evidencia uma evolução claramente crescente de k com o aumento do L_o em ambos os materiais.

No PA s/FC, o k médio varia de aproximadamente 721 para cerca de 959 N/mm (ganho global próximo de 33% entre os provetes de 5 e de 20 mm). No PA c/FC, este valor evolui de aproximadamente 1159 para cerca de 1533 N/mm (ganho de 32% no mesmo intervalo).

Esta tendência confirma o efeito expectável do aumento do L_o :

1. Maior área eficaz de transferência de carga,
2. Menores deformações por corte e, conseqüentemente,
3. Maior rigidez global.

A comparação de materiais mostra que, o reforço com fibra de carbono confere um aumento de rigidez consistente. As juntas em PA c/FC são, em média, cerca de 60 a 63% mais rígidas do que as equivalentes em PA s/FC para os três comprimentos de sobreposição. A explicação é estrutural, ou seja, o maior módulo e a maior rigidez à flexão dos aderentes reforçados limitam a rotação da junta na zona da sobreposição e reduzem a flexibilidade do conjunto adesivo-aderentes, o que leva ao aumento da componente elástica e da rigidez global

No que respeita à repetibilidade, os CoV são baixos em todas as condições, o que se traduz numa boa consistência dos ensaios realizados. Os valores de k para o PA c/FC apresenta a dispersão mais reduzida, enquanto no PA s/FC observa-se um CoV um pouco superior para o L_o de 20 mm. Em síntese, aumentar o comprimento de sobreposição e utilizar aderentes reforçados potencia de forma cumulativa a rigidez das juntas.

3.4.3.4. Resistência das juntas

A força máxima corresponde ao valor mais elevado registado nas curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios de tração. Este parâmetro é retirado diretamente dos gráficos experimentais e representa a capacidade máxima de carga da junta adesiva antes de ocorrer a rotura. A análise deste valor permite avaliar o desempenho mecânico das diferentes configurações de juntas, para além de comparar também os resultados experimentais com os valores previstos numericamente. Esta comparação possibilita validar os modelos numéricos utilizados e compreender com maior rigor a influência dos materiais e das geometrias no comportamento estrutural das juntas adesivas.

A Tabela 17 apresenta os resultados de resistência das juntas (em N) para $L_o=5, 10$ e 20 mm em PA s/FC e PA c/FC. Em complemento.

Tabela 17 - Resistência das juntas adesivas de sobreposição simples

Proвете	PA s/FC			PA c/FC		
L_o	5	10	20	5	10	20
1	1151,31	1309,14	1435,80	1201,70	1563,03	1694,08
2	1077,17	1240,44	1334,85	1258,70	1542,77	1744,12
3	1117,18	1253,03	1396,06	1157,91	1500,41	1832,29
4	1076,11	1257,76	1440,82	1172,04	1501,88	1834,98
Média	1105,44	1265,09	1401,88	1197,59	1527,02	1776,37
Desvio Pad	36,06	30,26	48,97	44,64	31,00	69,22
CoV	3,26	2,39	3,49	3,73	2,03	3,90

Em ambos os materiais observa-se a tendência esperada do aumento da resistência com o aumento do L_o , consequência da maior área de transferência de carga. No PA s/FC a média evolui de 1105 N ($L_o=5$ mm) para 1402 N ($L_o=20$ mm), o que corresponde a incrementos de ganho de 27%. No PA c/FC o aumento é mais acentuado, de cerca de 48%.

Ao comparar os materiais, observa-se uma vantagem sistemática das juntas com aderentes reforçados com fibra de carbono para qualquer L_o . As configurações em PA c/FC exibem, de forma consistente, cargas últimas mais elevadas do que as obtidas com PA s/FC. Esta melhoria tem origem no maior módulo elástico e na maior rigidez à flexão dos aderentes reforçados, que reduzem a flexibilidade do conjunto e limitam a rotação nas extremidades da sobreposição, é importante referir que o modo de rotura não se altera em função do material. Como consequência direta, diminuem-se as tensões normais de arrancamento (*peel*) induzidas pela excentricidade do carregamento e torna-se mais uniforme a transferência de corte ao longo da camada adesiva. Do ponto de vista da resposta global, esta maior rigidez dos aderentes reforçados traduz-se num declive inicial mais acentuado nas curvas $P-\delta$, numa elevação da força máxima e, para sobreposições médias/longas, numa maior energia dissipada até à rotura. Além disso, as juntas com PA c/FC tendem a apresentar menor dispersão entre provetes (CoV), e indicam por isso um comportamento mais estável e repetível.

Em suma, o reforço com fibra de carbono melhora simultaneamente a capacidade de carga e a robustez das juntas de sobreposição, sobretudo quando a geometria favorece uma transferência de carga distribuída, confirmando o seu interesse para aplicações nas quais a resistência e a estabilidade da ligação são determinantes.

3.4.3.5. Energias de rotura

A energia de rotura de uma junta adesiva corresponde à quantidade total de energia absorvida pelo sistema até ao momento da sua falha. Este parâmetro é fundamental na avaliação da tenacidade da junta, uma vez que reflete não apenas a sua resistência à carga, mas também a sua capacidade de deformação antes da rotura [101].

Do ponto de vista experimental, a energia de rotura pode ser determinada através da área sob a curva $P-\delta$, até ao ponto de falha do provete. Esta área é calculada experimentalmente pela soma de pequenas parcelas, o que representa uma soma incremental da energia absorvida ao longo do carregamento (Figura 31).

No âmbito deste trabalho, foram determinados os valores de energia de rotura para os provetes de sobreposição simples. Estes valores permitem realizar uma análise comparativa do comportamento energético das juntas adesivas em estudo. Na Tabela 18 são apresentados os valores de energia de rotura (em J) das juntas para $L_o=5$, 10 e 20 mm em PA s/FC e em PA c/FC, obtidos através dos ensaios experimentais. Em complemento.

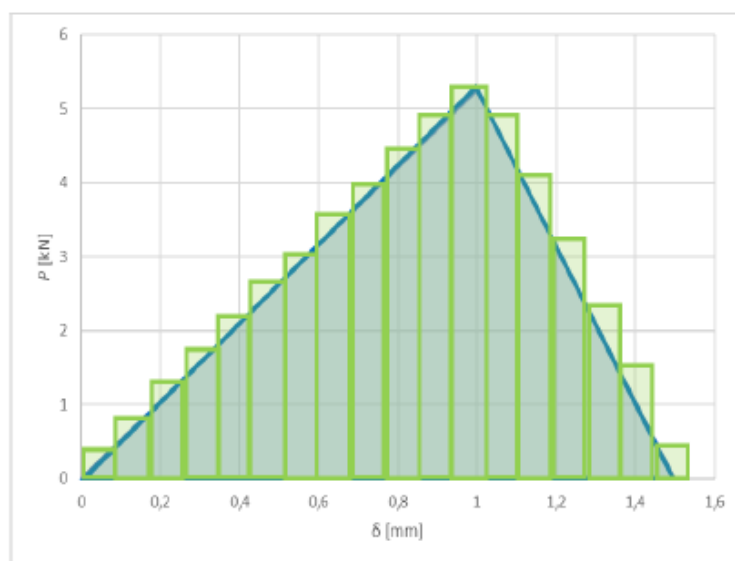


Figura 31 - Esquema de cálculo da energia de rotura

Tabela 18 - Energia de rotura das juntas adesivas de sobreposição simples

Provete	PA s/FC			PA c/FC		
L_o	5	10	20	5	10	20
1	1,02	1,10	1,13	0,74	1,22	1,40
2	0,90	1,07	1,51	0,73	1,19	1,39
3	0,93	1,20	1,14	0,63	1,09	1,61
4	0,72	1,20	1,04	0,68	1,15	1,56
Média	0,89	1,14	1,21	0,70	1,17	1,49
Desvio Pad	0,13	0,07	0,21	0,05	0,06	0,11
CoV	14,35	6,17	17,39	7,29	4,77	7,57

Observa-se uma tendência clara de aumento da energia com o aumento do L_o em ambos os materiais. À medida que o L_o aumenta a força e o deslocamento aumentam o que provoca um aumento da área de adesão, logo a transferência de carga distribui-se por uma zona mais extensa, permitindo ao sistema absorver mais energia até à rotura. Nos provetes em PA s/FC a energia média de rotura aumenta 0,89 ($L_o=5$ mm) para 1,21 J ($L_o=20$ mm), o que se traduz num ganho global de cerca de 28%. Nos provetes em PA c/FC o crescimento é mais pronunciado, cerca de 0,70 ($L_o=5$ mm) para 1,49 J ($L_o=20$ mm), ou seja, corresponde a um aumento de 118%.

A comparação entre materiais revela um comportamento dependente do comprimento de sobreposição. Para $L_o=5$ mm, o PA c/FC apresenta energia inferior à do PA s/FC, o que se explica pela maior rigidez dos aderentes reforçados, ou seja, apresenta deslocamentos menores, e a área total até à rotura diminui. Para $L_o=10$ mm, os valores tornam-se praticamente equivalentes. Já para $L_o=20$ mm verifica-se uma inversão clara, com o PA c/FC a superar o PA s/FC.

No plano da repetibilidade, os coeficientes de variação confirmam boa consistência dos ensaios. O PA c/FC apresenta CoV baixos, enquanto o PA s/FC evidencia maior dispersão, sobretudo para

$L_o=20$ mm, o que é compatível com uma maior sensibilidade a desalinhamentos, variações locais da espessura do adesivo ou heterogeneidade do material impresso quando a sobreposição é mais longa.

Em síntese, os resultados confirmam que aumentar L_o e utilizar PA c/FC potencia a energia que a junta consegue dissipar antes da falha, para além de comprovar o melhor desempenho e a maior robustez estrutural.

3.4.4. Juntas em degrau

As juntas em degrau são uma variação das juntas adesivas tradicionais, nas quais os aderentes são maquinados de forma a criar um degrau escalonado na zona de colagem, tal como é possível visualizar na Figura 15.

No âmbito deste estudo, foram desenvolvidas juntas em degrau com três $L_o=5$, 10 e 20 mm. A variação deste parâmetro teve como principal objetivo analisar a influência do comprimento da ligação escalonada no desempenho mecânico das juntas, nomeadamente na resistência à tração e no modo de rotura.

Antes da realização dos ensaios de tração, foi efetuada a medição de L_o em ambos os lados de cada provete, com o objetivo de verificar a conformidade dimensional das juntas em relação às especificações de fabrico. Na Tabela A. 2 do Apêndice A são apresentados os valores de L_o obtidos experimentalmente para cada provete fabricado.

3.4.4.1. Modos de rotura

Com o objetivo de aferir o comportamento das juntas em degrau estudadas, procedeu-se à análise dos modos de rotura em PA s/FC e em PA c/FC. Esta configuração merece atenção específica, uma vez que o degrau tende a melhorar a distribuição de tensões na zona adesiva e a mitigar esforços de arrancamento, para além de poder conduzir a mecanismos de falha distintos dos observados noutras geometrias, por outro lado, pode fadigar os aderentes devido à redução da secção.

A inspeção das superfícies após os ensaios de tração permitiu classificar a rotura como coesiva no adesivo, pelo aderente ou mista. Esta classificação é determinante para a leitura crítica dos resultados de resistência, rigidez e energia de rotura, bem como para avaliar a qualidade do fabrico e o impacto do reforço com fibra de carbono na integridade da junta e ainda a comparação com a análise numérica.

Os modos de rotura obtidos para os provetes das juntas em degrau com $L_o=5$, 10 e 20 mm são apresentados de seguida. A Figura 32 reúne os resultados de forma organizada: em (a) provetes em PA s/FC com $L_o=5$ mm; em (b) provetes em PA c/FC com $L_o=5$ mm; em (c) provetes em PA s/FC com $L_o=10$ mm; em (d) provetes em PA c/FC com $L_o=10$ mm; em (e) provetes em PA s/FC com $L_o=20$ mm; e em (f) provetes em PA c/FC com $L_o=20$ mm. Para complementar a análise, a Tabela 19 indica os modos de falha correspondentes a cada provete, que possibilita uma avaliação comparativa entre materiais e geometrias.

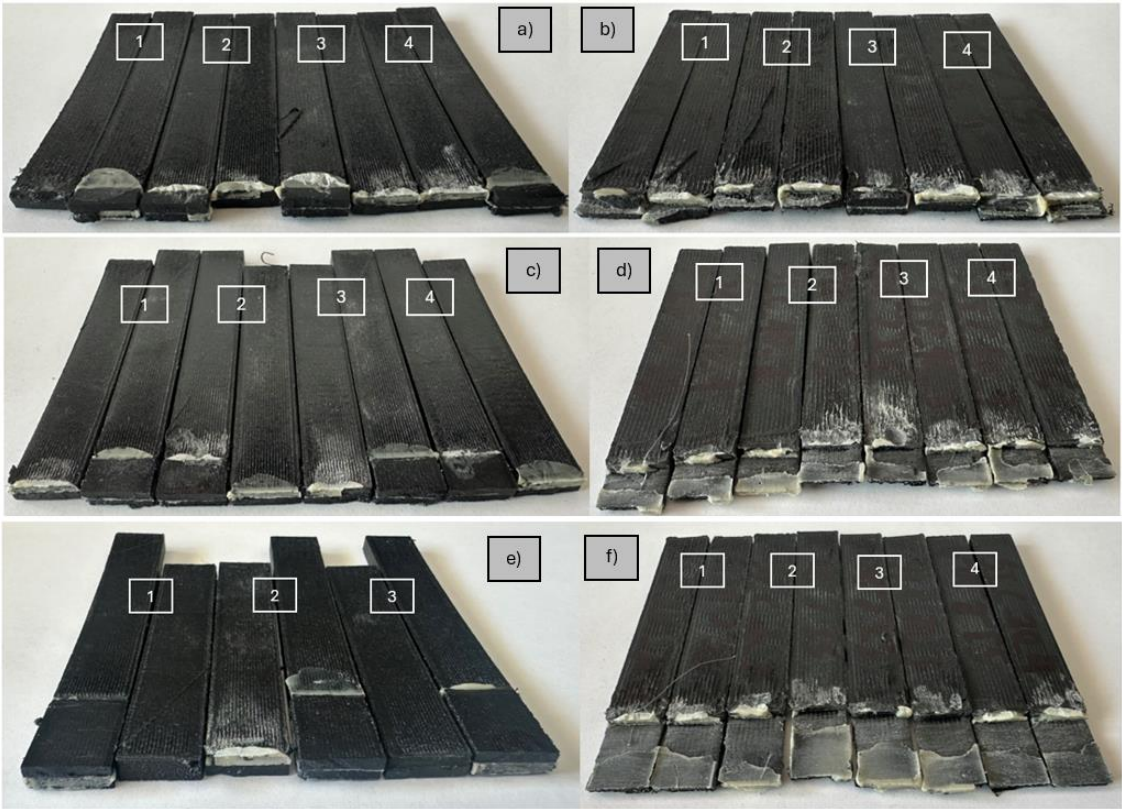


Figura 32 - Modo de rotura para provetes com comprimento de degrau de 5 mm

Tabela 19 - Modo de rotura para provetes com comprimento de degrau de 5 mm

L_o [mm]	5		10		20	
Proвете	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC
1	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	Aderente	Coesiva
2	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	Aderente	Coesiva
3	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	Aderente	Coesiva
4	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	-	Coesiva

3.4.4.2. Curvas $P-\delta$

Após a realização dos ensaios de tração nos provetes fabricados, foram obtidas as respectivas curvas $P-\delta$. Estas curvas descrevem a resposta da junta desde o início do carregamento até à rotura e permitem extrair os principais parâmetros mecânicos: rigidez inicial, força máxima e deslocamento na rotura. A energia de rotura é igualmente determinada pela área sob a curva e reflete a capacidade de dissipação de energia da junta. A análise comparativa das curvas permite avaliar o efeito do comprimento de sobreposição e/ou da geometria da ligação, bem como a influência do material dos aderentes e das condições de fabrico.

As curvas $P-\delta$ obtidas para as juntas em degrau encontram-se representadas na Figura 33. Foram analisados três $L_o=5, 10$ e 20 mm com o objetivo de avaliar de que forma este parâmetro condiciona o comportamento estrutural da ligação. A figura reúne os resultados por material: em (a) corresponde aos provetes em PA s/FC e em (b) aos provetes em PA c/FC com $L_o=5$ mm;

Desenvolvimento

em (c) e (d) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) mostram-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.

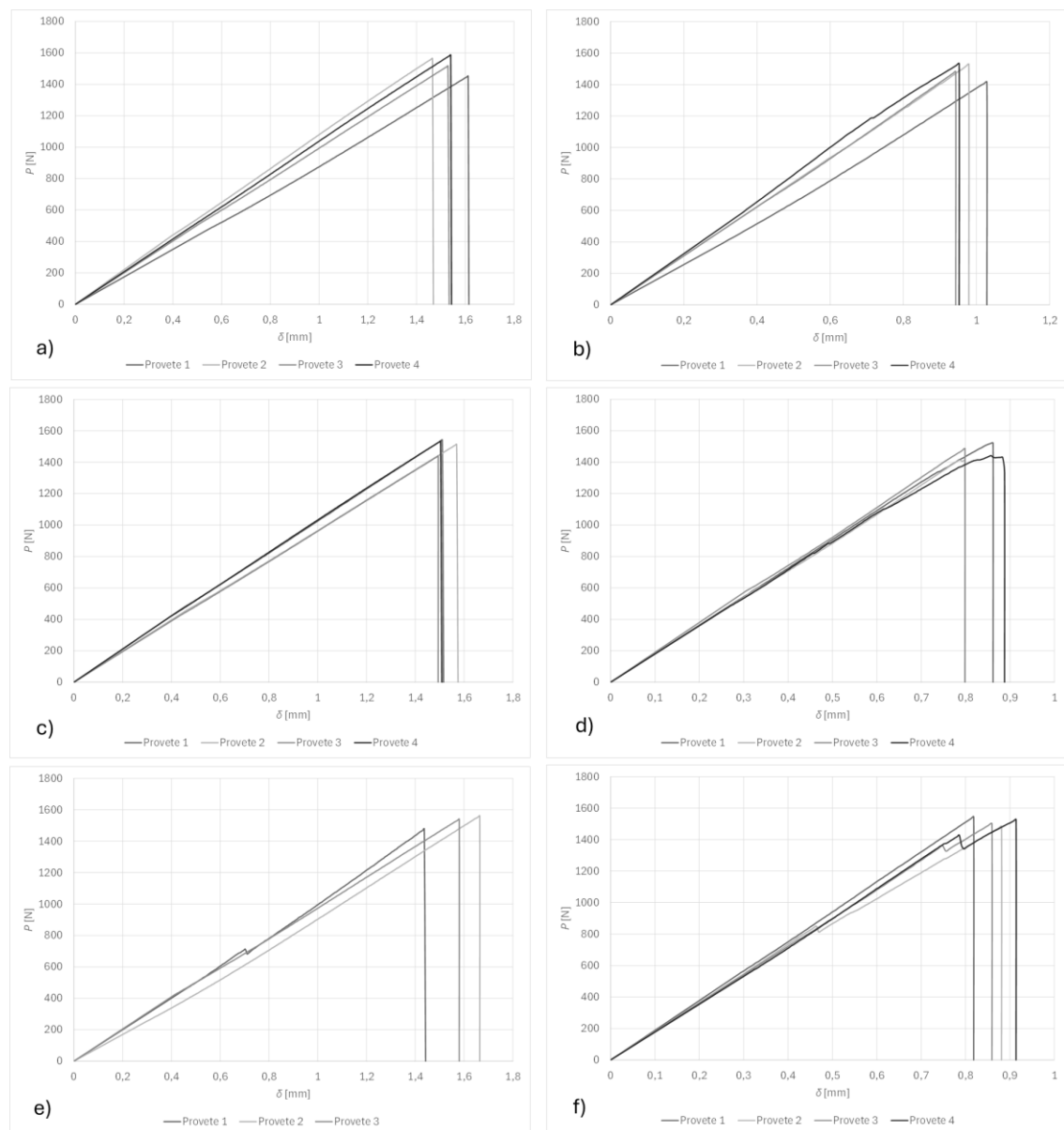


Figura 33 - Curvas $P-\delta$ para juntas em degrau: em (a) corresponde aos provetes em PA s/FC e em (b) aos provetes em PA c/FC com $L_o=5$ mm; em (c) e (d) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) mostram-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.

As curvas $P-\delta$ das juntas em degrau revelam comportamentos semelhantes nos dois materiais para todos os L_o , com diferenças pouco expressivas na força máxima. No PA s/FC, as forças atingem valores médios entre 1507 e 1527 N, enquanto no PA c/FC variam entre 1465 e 1514 N. A proximidade destes resultados confirma que o reforço em fibra de carbono não promoveu ganhos significativos em termos de resistência máxima nesta geometria.

Apesar da semelhança na resistência, nota-se uma distinção clara no modo de deformação. O PA c/FC apresenta declives mais pronunciados na fase elástica e deslocamentos à rotura reduzidos, evidenciando maior rigidez e comportamento mais frágil. Já o PA s/FC suporta

deslocamentos superiores na rotura, próximos de 1,5-1,7 mm, o que traduz uma maior ductilidade e capacidade de dissipação de energia até à falha.

O efeito de L_o mostra-se pouco relevante em ambos os materiais. O aumento de $L_o=5$ mm para 20 mm resultou em acréscimos marginais de força máxima, na ordem de 1-3%, valores que se enquadram dentro da dispersão experimental observada.

Em termos globais, as curvas $P-\delta$ indicam que a geometria em degrau garante forças máximas estáveis e reproduzíveis, mas o reforço em fibra de carbono influencia essencialmente a rigidez e a ductilidade, sem proporcionar aumentos relevantes de resistência.

3.4.4.3. Rigidez das juntas

Segue-se a apresentação da rigidez das juntas em degrau, parâmetro que quantifica a capacidade da ligação em resistir à deformação sob carga. No caso específico das juntas em degrau, este valor é fortemente influenciado pela geometria do degrau, pela espessura da camada de adesivo e pelo módulo e espessura dos aderentes.

Neste trabalho, a rigidez foi estimada por ajuste linear aos primeiros pontos de cada curva $P-\delta$ de maneira que seja garantida a leitura no regime elástico e minimizado o efeito do ruído experimental. Os resultados são analisados em função do L_o e do material dos aderentes (PA s/FC e PA c/FC).

Tabela 20 - Rigidez das juntas adesivas em degrau

Provete	PA s/FC			PA c/FC		
L _o	5	10	20	5	10	20
1	979,04	1058,46	1134,37	1800,30	1868,96	1956,32
2	1104,06	1002,69	1031,56	1932,78	1890,50	1894,42
3	1017,14	995,67	1023,19	1925,56	1937,58	1922,23
4	1079,06	1055,08	-	1943,20	1920,44	1939,91
Média	1044,83	1027,97	1063,04	1900,46	1904,37	1928,22
Desvio Pad	57,08	33,40	61,91	67,17	30,59	26,49
CoV	5,46	3,25	5,82	3,53	1,61	1,37

A Tabela 20 apresenta os resultados de rigidez das juntas (em N/mm) em degrau para os três L_o estudados e compara os provetes em PA s/FC e PA c/FC. Em ambos os materiais observa-se a tendência esperada de um ligeiro aumento da rigidez com o aumento do comprimento do degrau, coerente com a maior área eficaz de transferência de carga e a aumentam os gradientes de tensão. No PA s/FC os valores médios mantêm-se próximos entre si, com um crescimento moderado entre os provetes, enquanto no PA c/FC a evolução é também gradual, mas com níveis de carga claramente superiores.

A influência do reforço é significativa na medida em que, para todos os L_o as juntas em PA c/FC suportam aproximadamente 85% mais carga do que as de PA s/FC, evidenciando o contributo do maior módulo dos aderentes reforçados e uma transferência de carga mais eficiente ao

longo do degrau e maior rigidez axial do conjunto. Quanto à repetibilidade dos resultados para cada configuração de ensaio, os CoV são baixos em todas as condições, com clara vantagem do PA c/FC face ao PA s/FC.

Em síntese, as juntas em degrau exibem rigidez praticamente estabilizada com o aumento do comprimento do degrau, sendo a rigidez dos aderentes o fator preponderante. O reforço com fibra de carbono potencia de forma expressiva a rigidez e melhora a consistência dos resultados experimentais.

3.4.4.4. Resistência das juntas

A resistência das juntas em degrau corresponde à força máxima que a ligação suporta até à rotura. Este valor resulta das curvas $P-\delta$ e traduz a capacidade do sistema aderentes-adesivo em transferir carga ao longo do degrau até ao início da falha. O desempenho desta geometria depende de vários fatores, nomeadamente do comprimento do degrau, da espessura ou altura útil, da espessura e qualidade da camada de adesivo e, ainda, do módulo e da espessura dos aderentes, com ou sem reforço em fibra de carbono.

No âmbito deste trabalho, a resistência será analisada através da comparação de diferentes L_0 e materiais de aderente (PA s/FC vs. PA c/FC).

Tabela 21 - Resistência das juntas adesivas em degrau

Provete	PA s/FC			PA c/FC		
L_0	5	10	20	5	10	20
1	1452,93	1541,91	1478,79	1415,956	1521,52	1545,061
2	1565,08	1513,42	1560,89	1528,303	1413,052	1483,971
3	1516,69	1440,08	1540,02	1481,567	1485,211	1500,911
4	1586,93	1534,32	-	1532,272	1441,652	1527,466
Média	1530,41	1507,43	1526,57	1489,52	1465,36	1514,35
Desvio Pad	59,41	46,49	42,67	54,18	47,77	27,20
CoV	3,88	3,08	2,80	3,64	3,26	1,80

A Tabela 21 apresenta os valores de resistência (em N) das juntas em degrau para três $L_0=5, 10$ e 20 mm, em PA s/FC e em PA c/FC. Em ambos os materiais observa-se uma variação muito moderada da resistência com o L_0 .

No PA s/FC, a resistência manteve-se próxima de 1,50-1,53 kN, com falhas do tipo aderente em todos os L_0 . No PA c/FC, os valores foram semelhantes (1,47-1,51 kN), mas ocorreu falha coesiva em $L_0=10$ e 20 mm, o que indica maior aproveitamento do adesivo.

Ao comparar materiais conclui-se que as diferenças são muito reduzidas, apesar das juntas de PA s/FC apresentaram valores médios ligeiramente superiores comparativamente ao PA c/FC. Este resultado sugere que, para esta geometria, a capacidade de carga é condicionada sobretudo pelo adesivo (regime dominado por corte), pelo que aumentar a rigidez dos aderentes com fibra de carbono não se traduz em ganhos expressivos de resistência. Ainda

assim, o reforço mostra uma vantagem clara na consistência experimental, ou seja, os coeficientes de variação são sistematicamente mais baixos no PA c/FC do que no PA s/FC, indicando um comportamento mais estável e repetível.

Importa salientar que, para a junta de PA s/FC com $L_o=20$ mm no PA s/FC, foi possível testar apenas três provetes (limitação de material).

Em síntese, as juntas em degrau revelam resistência semelhante para os três comprimentos testados, com maior consistência quando se utilizam aderentes reforçados com fibra de carbono.

3.4.4.5. Energias de rotura

A energia de rotura das juntas em degrau quantifica o trabalho acumulado pela ligação até ao instante da falha. O valor resulta da integração da curva $P-\delta$ e reflete em simultâneo a resistência máxima atingida e a capacidade de deformação do sistema. Este parâmetro constitui uma métrica essencial para a caracterização da tenacidade da união adesiva, estabelecendo uma relação direta entre o desempenho do adesivo e o comportamento estrutural dos aderentes.

Nas juntas em degrau, a geometria escalonada promove uma transferência de carga mais distribuída ao longo da interface e reduz as tensões de arrancamento nas extremidades. Por essa razão, quando o comprimento do degrau aumenta, é habitual observar-se um acréscimo da energia de rotura, pois o dano tende a propagar-se de forma mais progressiva, com um pós-pico menos abrupto nas curvas $P-\delta$. A espessura e a rigidez do adesivo, tem também um papel determinante.

A Tabela 22 apresenta a energia de rotura (em J) de juntas em degrau para $L_o=5, 10$ e 20 mm, em PA s/FC e PA c/FC.

Tabela 22 - Energia de rotura de juntas adesivas em degrau

Provete	PA s/FC			PA c/FC		
L_o	5	10	20	5	10	20
1	1,01	1,08	0,93	0,64	0,59	0,55
2	1,08	1,09	1,21	0,48	0,47	0,59
3	1,04	0,98	1,13	0,56	0,50	0,52
4	1,11	1,09	-	0,64	0,62	0,65
Média	1,06	1,06	1,09	0,58	0,55	0,58
Desvio Pad	0,05	0,05	0,15	0,08	0,07	0,06
CoV	4,27	4,91	13,35	13,45	12,84	9,99

Nas juntas de PA s/FC os valores médios de energia são 1,06, 1,06 e 1,09 J para $L_o=5, 10$ e 20 mm, respetivamente. De notar que, para o L_o de 20 mm, o desvio-padrão e o CoV (13,35%) são mais elevados. Este efeito está associado ao facto de ter sido possível testar apenas três provetes nessa condição devido à limitação de material.

Nas juntas de PA c/FC a energia média é 0,58, 0,55 e 0,58 J para o $L_o=5$, 10 e 20 mm, o que demonstra pouca sensibilidade do comportamento da junta à variação do L_o . Os CoV estão na ordem dos 10-13% o que reflete que a energia por depender simultaneamente da força e do deslocamento é mais sensível a pequenas variações do $\delta_{máx}$ em juntas mais rígidas, como acontece com os aderentes reforçados.

A comparação entre materiais evidencia um padrão claro para todos os L_o . As juntas em PA s/FC apresentam energias de rotura superiores às de PA c/FC. A explicação é mecânica, ou seja, o reforço com fibra aumenta a rigidez dos aderentes, o que limita os deslocamentos globais à rotura. Pese embora as cargas máximas serem semelhantes, a área sob a curva $P-\delta$ é menor e, por isso, a energia dissipada até à rotura reduz. Em contrapartida, as juntas com PA c/FC beneficiam de declives iniciais mais íngremes (maior rigidez) e de menor rotação da junta na zona de ligação. No entanto, tal não se traduz em maior energia, porque a deformabilidade disponível até à rotura é mais baixa.

Em síntese, para as juntas em degrau estudadas:

- Valor de L_o no intervalo de 5 a 20 mm não altera significativamente a energia de rotura;
- O reforço com fibra conduz a menores energias dissipadas, apesar de vantagens noutros indicadores.

3.4.5. Juntas de chanfro interior

As juntas de chanfro interior (*scarf joints*) são caracterizadas por uma ligação adesiva realizada ao longo de superfícies inclinadas dos aderentes, criando uma interface oblíqua que promove uma transição mais suave de tensões na zona da ligação e, consequentemente, uma melhor eficiência estrutural da junta adesiva. Esta configuração permite distribuir de forma mais uniforme os esforços aplicados ao longo da zona adesiva e minimiza concentrações de tensão (Figura 15).

No âmbito deste trabalho, foram desenvolvidas juntas com três valores de $L_o=5$, 10 e 20 mm. Importa referir que, no caso específico de $L_o=5$ mm, este valor corresponde à espessura total do provete, o que resulta numa junta topo a topo, pelo que a ligação adesiva ocorre apenas entre as extremidades verticais dos aderentes, sem qualquer inclinação efetiva.

Antes da realização dos ensaios de tração, foi efetuada a medição do comprimento do chanfro em ambos os lados de cada provete, com o objetivo de confirmar a conformidade dimensional das juntas fabricadas. Na Tabela A. 3 do Apêndice A são apresentados os valores de comprimento de chanfro obtidos experimentalmente.

3.4.5.1. Modos de rotura

Nesta secção introduz-se a classificação dos modos de rotura observados nas juntas de chanfro interior (*scarf*). A geometria em chanfro tem como objetivo reduzir os gradientes de tensão na extremidade adesivada e distribuir a transferência de carga ao longo de uma área maior, o que reduz as tensões de arrancamento (*peel*) típicas das juntas de sobreposição simples. Em

consequência, o mecanismo de rotura tende a deslocar-se de roturas com preponderância de arrancamento para roturas dominadas por corte quando L_o aumenta.

Os modos de rotura observados nos provetes das juntas de chanfro interior com $L_o=5, 10$ e 20 mm são apresentados nesta secção. A Figura 34 ilustra os diferentes casos: em (a) provetes em PA s/FC com $L_o=5$ mm; em (b) provetes em PA c/FC com $L_o=5$ mm; em (c) provetes em PA s/FC com $L_o=10$ mm; em (d) provetes em PA c/FC com $L_o=10$ mm; em (e) provetes em PA s/FC com $L_o=20$ mm; e em (f) provetes em PA c/FC com $L_o=20$ mm. A Tabela 23 apresenta os modos de falha registados em cada provete, possibilitando uma comparação direta entre materiais e comprimentos de chanfro

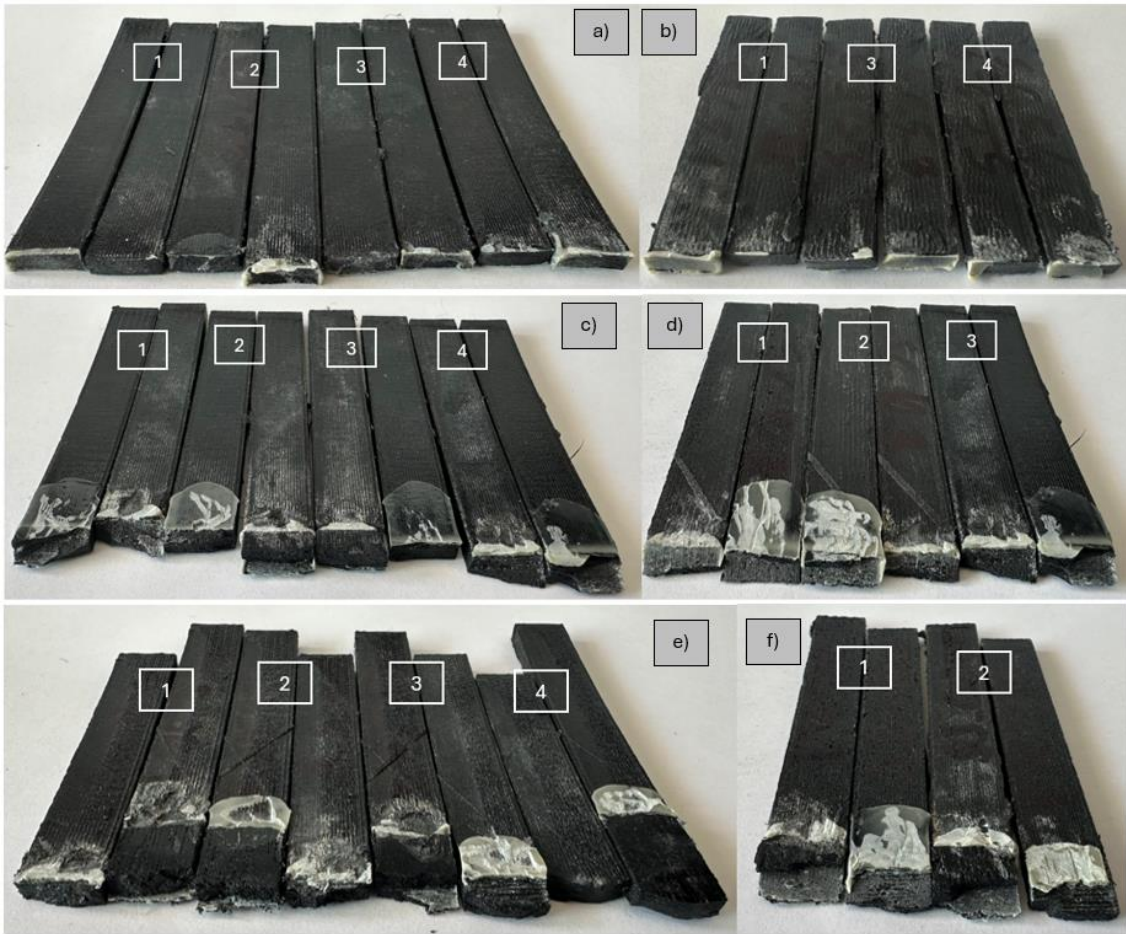


Figura 34 - Modo de rotura para provetes com comprimento de chanfro

Tabela 23 - Modo de rotura para provetes com comprimento de chanfro

L_o [mm]	5		10		20	
Proвете	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC
1	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
2	Coesiva	-	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
3	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	-
4	Coesiva	Coesiva	Aderente	-	Aderente	-

3.4.5.2. Curvas $P-\delta$

A partir dos ensaios de tração realizados nos provetes, foi possível obter as curvas força-deslocamento, que traduzem a evolução da resposta estrutural da junta até ao ponto de falha. A análise destas curvas fornece informação essencial para a caracterização do comportamento mecânico, o que permite identificar quatro parâmetros de maior relevância: rigidez inicial; força máxima; deslocamento à rotura e energia de rotura. A análise comparativa das curvas permite avaliar o efeito do comprimento do chanfro e/ou da geometria da ligação, bem como a influência do material dos aderentes e das condições de fabrico. As curvas $P-\delta$ obtidas para as juntas de chanfro interior estão representadas na Figura 35. Foram considerados três $L_o=5, 10$ e 20 mm com o intuito de analisar a influência deste parâmetro no desempenho estrutural da ligação.

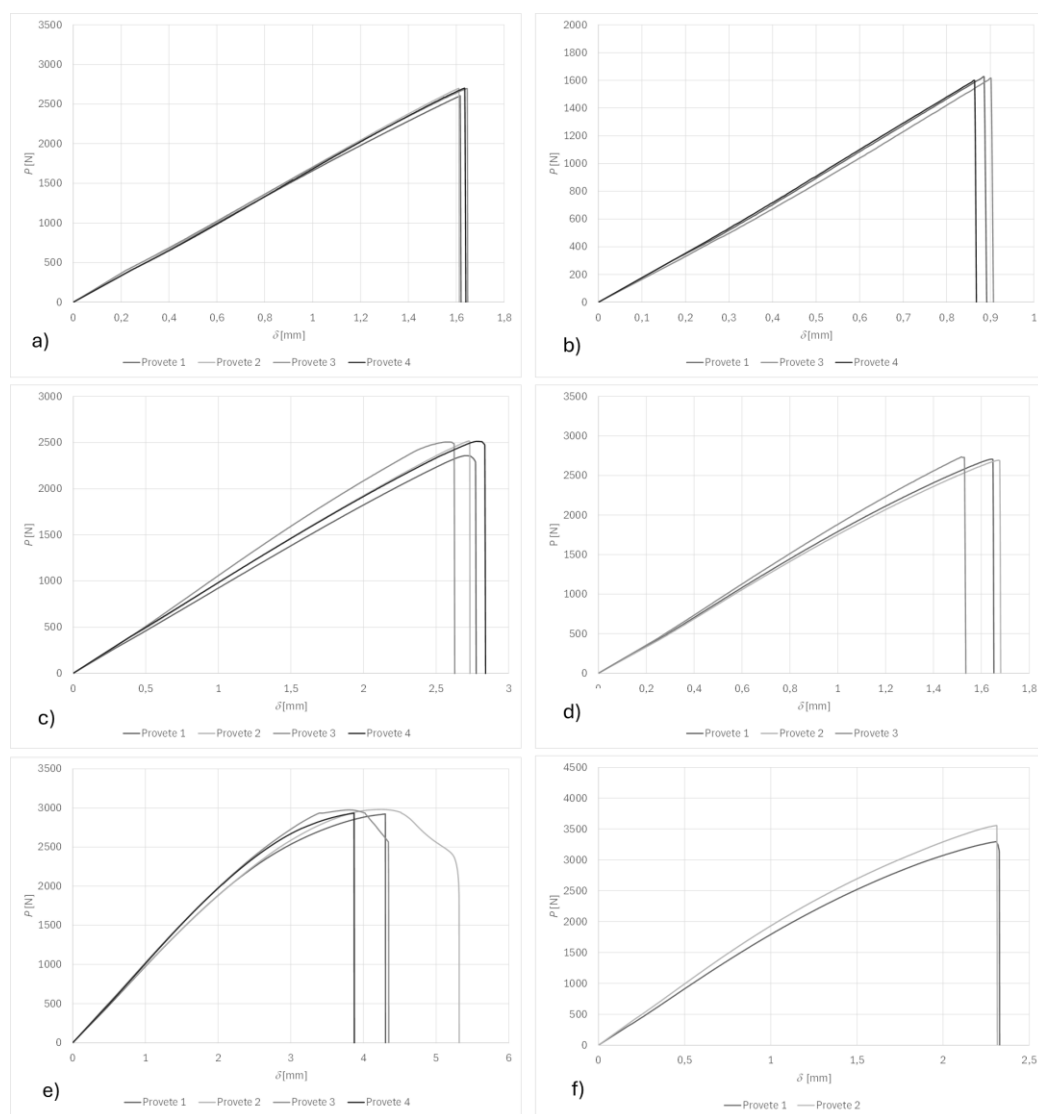


Figura 35 - Curvas $P-\delta$ para juntas de chanfro interior: em (a) encontram-se os provetes em PA s/FC e em (b) os provetes em PA c/FC com $L_o=5$ mm; em (c) e (d) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) ilustram-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.

Nos provetes em PA s/FC, as curvas revelam uma evolução consistente da resposta mecânica com o aumento de L_o . A resistência média variou de 2,67 kN, para 2,95 kN entre $L_o=5$ e 20 mm, o que corresponde a um acréscimo de aproximadamente 11%. Além disso, o aumento de L_o trouxe também maior deslocamento à rotura, sobretudo visível em $L_o=20$ mm, em que se observaram extensões próximas de 4-5 mm.

No caso do PA c/FC, a tendência é semelhante em termos de crescimento da força máxima, mas com valores absolutos superiores. Para $L_o=5$ mm, a resistência média foi de 2,71 kN, enquanto para $L_o=20$ mm esta atingiu 3,43 kN, o que representa um aumento de cerca de 26%. A diferença face ao PA s/FC torna-se evidente: para $L_o=20$ mm, a resistência das juntas reforçadas superou em cerca de 16% a das não reforçadas. Contudo, os deslocamentos à rotura registaram-se mais baixos no PA c/FC.

A comparação entre os dois materiais confirma a dualidade habitual: o PA s/FC apresenta maior capacidade de deformação e absorção de energia, enquanto o PA c/FC garante maiores níveis de rigidez e resistência máxima. O impacto do L_o mostra-se mais marcado no material reforçado, para o qual os ganhos de resistência são significativos, mas à custa de uma redução clara da deformabilidade.

3.4.5.3. Rigidez das juntas

A rigidez das juntas de chanfro interior traduz-se num parâmetro que quantifica a capacidade da ligação em resistir à deformação sob carga. Nesta geometria, a rigidez depende de forma marcada de L_o , do ângulo/declive do chanfro e da espessura útil na zona inclinada, bem como da espessura da camada de adesivo e do módulo de elasticidade e espessura dos aderentes. Importa referir que quando o L_o é igual à espessura do provete, a ligação é equivalente a uma junta topo a topo.

Os resultados são apresentados e discutidos em função do L_o e do material dos aderentes (PA s/FC e PA c/FC) na Tabela 24 (em N/mm), o que permite avaliar o efeito da geometria e do reforço na resposta elástica global das juntas de chanfro interior.

Tabela 24 - Rigidez das juntas adesivas de chanfro interior

Provete	PA s/FC				PA c/FC	
<i>L</i> _o	5	10	20	5	10	20
1	1732,68	955,06	1024,17	1942,27	1921,12	1917,66
2	1781,82	1018,50	1000,65	-	1880,19	2032,72
3	1828,17	1004,66	1058,00	1943,68	1991,49	-
4	1818,93	1009,62	1012,07	1947,24	-	-
Média	1790,40	996,96	1023,72	1944,40	1930,93	1975,19
Desvio Pad	43,38	28,51	24,79	2,56	56,29	81,36
CoV	2,42	2,86	2,42	0,13	2,92	4,12

Nas juntas de PA s/FC observa-se um valor médio muito elevado para o $L_o=5$ mm (aproximadamente 1790 N/mm) e uma descida acentuada para 997 N/mm para o L_o de 10 mm,

com ligeira recuperação para 1024 N/mm para o $L_o=20$ mm. Este comportamento explica-se pela própria geometria resultante das juntas: $L_o=5$ mm equivale, na prática, a uma junta topo-a-topo, com distribuição da carga predominantemente axial e, por isso, rigidez elevada. Nas juntas de PA c/FC a rigidez média mantém-se muito alta e praticamente constante para os três L_o .

A comparação entre materiais evidencia um padrão claro. Para $L_o=10$ e 20 mm o PA c/FC apresenta praticamente o dobro da rigidez observada no PA s/FC (diferenças de aproximadamente 90 a 95%), enquanto para $L_o=5$ mm a vantagem reduz-se para cerca de 9%. Em $L_o=10$ e 20 mm a rigidez dos aderentes passa a dominar a resposta elástica, caso no qual o reforço com fibra se mostra particularmente eficaz.

Em síntese:

- $L_o=5$ mm (equivalente a junta topo-a-topo) conduz a rigidez muito elevada no PA s/FC;
- Juntas com $L_o=10$ e 20 mm a rigidez estabiliza e é significativamente superior quando se utilizam aderentes reforçados.

3.4.5.4. Resistência das juntas

Segue-se a apresentação da resistência das juntas de chanfro interior, entendida como a força máxima que a ligação suporta antes da rotura. Este valor é obtido diretamente das curvas $P-\delta$ e traduz a capacidade do conjunto aderentes-adesivo para transferir carga ao longo da ligação até ao início do dano instável.

No âmbito deste trabalho, a resistência é discutida para $L_o=5$, 10 e 20 mm e os dois materiais de aderente considerados (PA s/FC e PA c/FC) na Tabela 25, de forma a quantificar o efeito da geometria e do reforço na capacidade última das juntas de chanfro interior.

Tabela 25 - Resistência das juntas adesivas de chanfro interior

Provete	PA s/FC			PA c/FC		
L _o	5	10	20	5	10	20
1	2604,30	2357,49	2922,61	1624,79	2705,72	3295,29
2	2698,24	2517,52	2979,58	-	2692,20	3556,58
3	2695,49	2506,00	2974,71	1614,09	2735,58	-
4	2699,10	2514,03	2933,89	1597,35	-	-
Média	2674,28	2473,76	2952,70	1612,08	2711,17	3425,94
Desvio Pad	46,68	77,66	28,67	13,83	22,20	184,76
CoV	1,75	3,14	0,97	0,86	0,82	5,39

Nas juntas de PA s/FC a média é 2674 N para $L_o=5$ mm, 2474 N para $L_o=10$ mm e 2953 N para $L_o=20$ mm. Verifica-se uma quebra de cerca de 7,5% de dos provetes com $L_o=5$ para 10 mm e um acréscimo de 19,4% dos provetes com $L_o=10$ para 20 mm, com ganho global de 10,4% entre os comprimentos de $L_o=5$ e 20 mm. A descida aos 10 mm indica que, com chanfro intermédio, a ligação ainda apresenta alguma rotação local e conformidade na zona inclinada. No que toca

aos provetes de $L_o=20$ mm a transferência de carga torna-se mais distribuída e a capacidade de carga aumenta. A dispersão é baixa, o que reforça a consistência dos ensaios.

Nas juntas de PA c/FC observa-se um aumento significativo com o L_o . Existe um aumento de 112% dos provetes com $L_o=5$ para 20 mm.

A comparação entre materiais mostra um comportamento bastante dependente do L_o . Para $L_o=5$ mm o PA s/FC supera claramente o PA c/FC. Para $L_o=10$ mm o cenário inverte-se, ou seja, o PA c/FC passa a apresentar uma resistência mais elevada face ao PA s/FC.

Em síntese:

- O aumento de L_o beneficia claramente a resistência, sobretudo no PA c/FC;
- O PA s/FC apresenta desempenho muito competitivo em chanfro curto devido à sua ductilidade, mas perde vantagem à medida que comprimento do chanfro cresce.

3.4.5.5. Energias de rotura

Nas juntas de chanfro interior, a energia de rotura define-se como o trabalho total absorvido pela ligação desde a aplicação inicial da carga até à falha. Este parâmetro corresponde, em termos experimentais, à área delimitada pela curva $P-\delta$.

A Tabela 26 apresenta a energia de rotura (em J) de juntas de chanfro interior para três $L_o=5$, 10 e 20 mm, em PA s/FC e PA c/FC.

Tabela 26 - Energia de rotura de juntas adesivas de chanfro interior

Provete	PA s/FC			PA c/FC		
L _o	5	10	20	5	10	20
1	2,11	3,45	7,68	0,686325	2,361161	4,415166
2	2,15	3,53	10,54	-	2,350992	4,681152
3	2,25	3,49	8,15	0,680541	2,127265	-
4	2,19	3,77	6,74	0,62626	-	-
Média	2,17	3,56	8,28	0,66	2,28	4,55
Desvio Pad	0,06	0,14	1,62	0,03	0,13	0,19
CoV	2,75	3,98	19,53	4,99	5,80	4,14

Nas juntas de PA s/FC verifica-se uma subida pronunciada da energia com L_o : a média passa de 2,17 ($L_o=5$ mm) para 3,56 ($L_o=10$ mm) e 8,28 J ($L_o=20$ mm). Quanto maior o L_o , mais uniforme é a transferência de carga. Os CoV revelam boa consistência para $L_o=5$ mm (2,75%) e $L_o=10$ mm (3,98%), mas aumentam de forma acentuada em $L_o=20$ mm (19,53%), o que indica uma maior variabilidade dos resultados neste comprimento de chanfro.

Nas juntas de PA c/FC a energia média também aumenta de forma clara com o comprimento do chanfro: 0,66 ($L_o=5$ mm), 2,28 ($L_o=10$ mm). Apesar do crescimento, os valores absolutos mantêm-se significativamente inferiores aos do PA s/FC para todos os chanfros. A explicação é

estrutural: os aderentes com fibra de carbono são mais rígidos. Os CoV situam-se entre 4 e 6%, o que evidencia uma boa consistência.

A comparação entre materiais é inequívoca: para todos os L_o , as juntas em PA s/FC apresentam energias de rotura mais elevadas do que as em PA c/FC. Este resultado encontra-se alinhado com as observações de modo de falha pelo aderente para L_o superiores: o PA s/FC é mais dúctil e suporta maiores deslocamentos antes do colapso, enquanto o PA c/FC, sendo mais rígido, atinge a rotura com menor deformação, o que reduz a energia dissipada.

Em síntese:

- O aumento de L_o eleva significativamente a energia de rotura em ambos os materiais;
- As juntas com PA s/FC apresentam maior energia de rotura para todos os L_o , devido à deformabilidade superior dos aderentes.

3.5. Trabalho numérico

O trabalho numérico realizado ao longo do presente estudo pretende reproduzir os ensaios experimentais e validar a utilização dos MDC de modo a prever a resistência de juntas adesivas com aderentes impressos em 3D. O estudo numérico efetuado, foi realizado através do *software* Abaqus®, versão 2021. Este *software* baseia-se no MEF e permite a utilização de um módulo integrado de MDC triangular.

3.5.1. Preparação dos modelos numéricos

A preparação dos modelos numéricos consiste na aplicação de condições em estudo tais como:

- Geometria;
- Propriedade dos materiais;
- Malhas;
- Cargas.

A construção das juntas adesivas com aderentes produzidos por impressão 3D segue um procedimento apresentado de forma sequencial, cuja explicação é detalhada de seguida.

1º Passo: Part

O processo é iniciado pela definição do tipo de peça desejada, do tipo de comportamento e do tipo de elemento. A Figura 36 mostra as escolhas realizadas: peça 2D do tipo deformável com elemento *shell*.

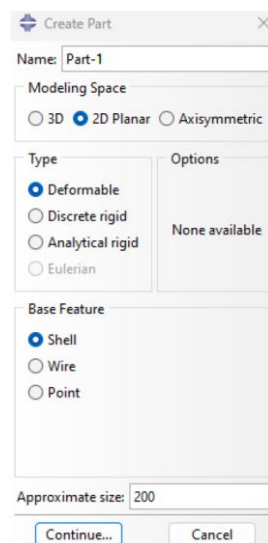


Figura 36 - Processo de criação do modelo

Posteriormente, é necessário desenhar a junta. Neste caso, os aderentes e o adesivo foram desenhados num só corpo, como demonstrado na Figura 37. Desta forma reduz-se a complexidade do sistema, sem influenciar os resultados. Assim sendo, foram desenhados três tipos de juntas distintas, sendo que a que apresentou maior dificuldade foi a junta *scarf*, visto que foi necessário desenhar todas as fronteiras entre elemento individualmente na zona junto do adesivo para assegurar a correta alocação dos elementos, incluindo quadriláteros e triângulos, sem incorrer em distorção de malha.

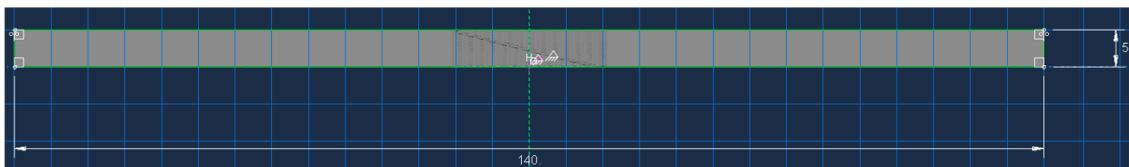


Figura 37 - Provete desenhado num só corpo

As geometrias desenhadas respeitam as dimensões dos provetes da componente experimental. Nestas circunstâncias, é possível garantir que os resultados numéricos sejam o mais próximo possível dos resultados experimentais. Em seguida, procede-se à divisão em partições para ser possível atribuir as propriedades e tipo de comportamento a cada secção, distinguindo entre a zona do aderente e do adesivo (Figura 38).

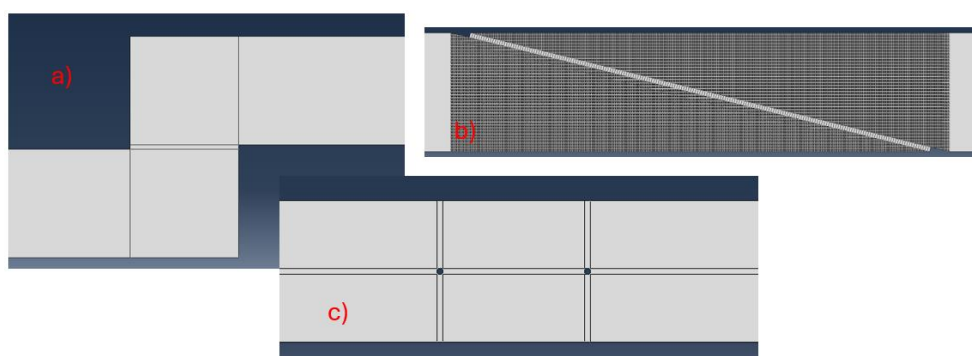


Figura 38 - Geometria utilizada no estudo: a) Junta de sobreposição simples; b) Junta *scarf*; c) Junta *step*

2º Passo: *Property*

Nesta etapa são atribuídas as propriedades mecânicas a cada *part* realizada anteriormente. O adesivo é estruturado com elementos coesivos triangulares, as propriedades elásticas são do tipo tração e deve ser considerado o módulo de Young, E [MPa] e o módulo de corte, G [MPa].

Aos adesivos, é aplicado um critério de iniciação de dano em modo misto designado por “*Quads Damage*” e a estes são ainda inseridas tensões limite ao corte τ_n [MPa] e à tração σ_r [MPa]. A rotura em modo misto caracteriza-se por um critério linear energético e, por conseguinte, são inseridas as tenacidades de fratura ao corte G_{IIc} [N/mm] e à tração G_{Ic} [N/mm]. Na Figura 39 é possível observar a introdução das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo 2015.

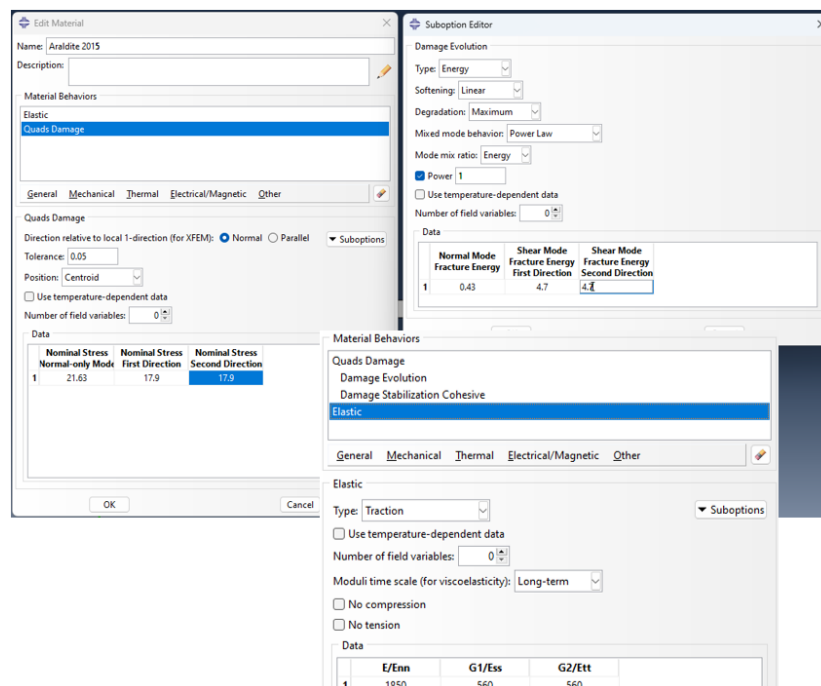


Figura 39 - Propriedades do adesivo utilizado

No que refere às propriedades dos aderentes é possível fazer uma divisão entre propriedades elásticas e propriedades plásticas. As propriedades elásticas, consideram o aderente como sendo um elemento isotrópico, e consistem no coeficiente de Poisson e o módulo de Young E [MPa]. Já nas propriedades plásticas, deve ser disponibilizada a relação entre a tensão e a deformação plástica equivalente na zona plástica de carregamento (Figura 40 e Figura 41).

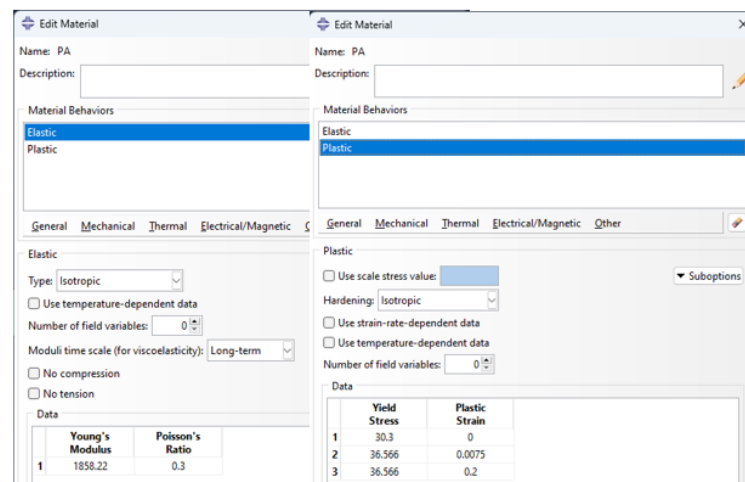


Figura 40 - Propriedades do PA

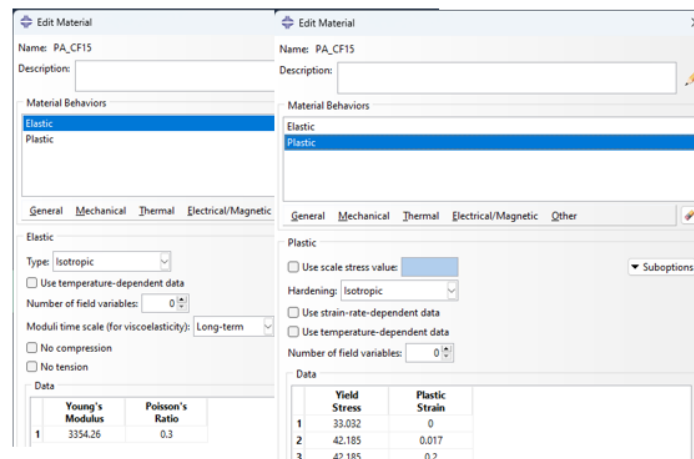


Figura 41 - Propriedades do PA c/FC

No presente trabalho numérico, foi tido em conta o comportamento perfeitamente plástico subsequente à tensão de cedência, o que se considera representar com precisão necessária o comportamento do material.

3º Passo: Assembly

Uma vez criado um modelo como sendo um só elemento, neste passo, não existe uma obrigatoriedade de trabalho pelo que, é apenas criada a instância da *part*.

4º Passo- STEP

Nesta etapa são inseridos os parâmetros de computação da simulação. O STEP é da tipologia “*STATIC, GENERAL*”, uma vez que a análise é do tipo estática linear. Na Figura 42 é apresentada a descrição do tamanho e dos incrementos a implementar durante a análise, sendo certo que estes tiveram um valor máximo de 10000 de forma a evitar a interrupção da simulação devido ao alcance do limite permitido pelo *software*.



Figura 42 - Tamanho do incremento utilizado

Para além do referido, são ainda acrescentados os “sets” de deslocamento e de reações com o objetivo de, no final das simulações, existir a possibilidade de retirar os dados necessários à construção das curvas $P-\delta$ e os “outputs” SDEG e STATUS, de modo que, no final de cada simulação seja exequível a análise detalhada dos deslocamentos e das forças. Os parâmetros SDEG e STATUS descrevem o comportamento dos elementos coesivos. O SDEG traduz a degradação progressiva da rigidez, variando de zero, quando o elemento está intacto, até um, quando ocorre a perda total de rigidez. O STATUS indica o estado do elemento, assume o valor um enquanto permanece ativo e passa a zero quando é eliminado devido à rotura. Estes dois parâmetros permitem acompanhar a evolução do dano e identificar o momento exato da falha da junta adesiva.

5º Passo: Interaction

Na preparação do modelo numérico do presente trabalho não há aplicabilidade deste passo, visto que a junta é tratada como uma única peça e, portanto, não há necessidade de estabelecimento de contactos entre componentes.

6º Passo: Load

De forma a alcançar uma reprodução de forma numérica dos ensaios experimentais, a simulação de carregamento de tração precisa que todas as condições fronteira sejam aplicadas no modelo. Para este efeito, foram aplicadas as condições visíveis na Figura 43, designadamente um deslocamento axial de 5 mm na extremidade direita e um encastramento na extremidade esquerda.

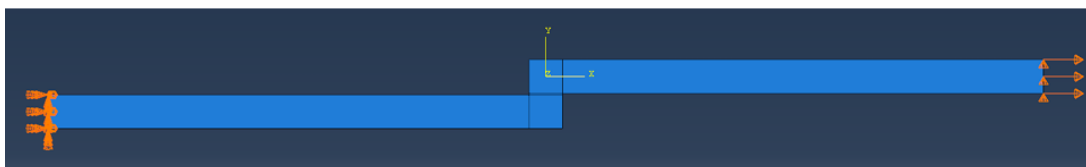


Figura 43 - Força aplicada

7º Passo: Mesh

Nesta etapa são trabalhados os parâmetros de malha que se pretende aplicar a cada segmento anteriormente criado. 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 44 demonstra que é junto das extremidades da ligação adesiva que se encontra, as zonas sujeitas a maiores tensões, visto que estão mais refinadas do que no

centro da junta. De salientar que a zona representativa do adesivo manifesta somente um elemento de malha ao longo da espessura. Por exemplo, a junta de sobreposição simples apenas possui 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. Conforme se aumenta o L_o , também se aumentou o número de elementos na junta para preservar a uniformidade nas zonas críticas. Por exemplo, na junta de sobreposição simples 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.

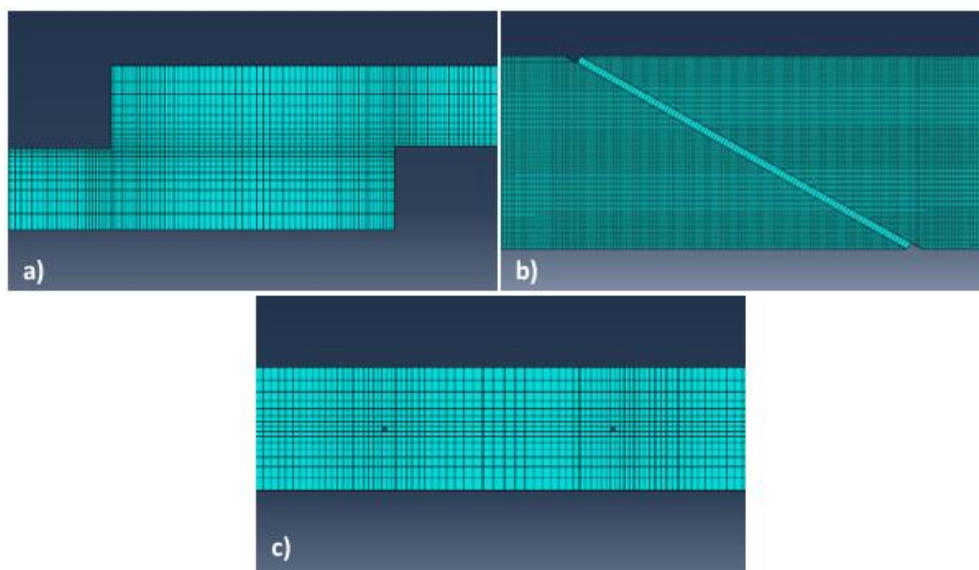


Figura 44 - Malhas aplicadas a cada geometria no ABAQUS®: a) sobreposição simples com $L_o=20$ mm; b) *step* com $L_o=10$ mm; c) *scarf* com $L_o=20$ mm

8º Passo: Job

Neste módulo, é efetuada a instrução para ser realizada a simulação, sendo ainda admissível a seleção da capacidade do computador que se pretende aplicar à simulação.

9º Passo: Results

Finalmente, depois de terminados e efetuados todos os passos anteriores importa proceder ao tratamento dos dados para a reprodução das curvas $P-\delta$. Quando combinado o conjunto de valores é possível gerar as curvas $P-\delta$, elaborar um Excel com a mesma informação para poder ser feita uma análise detalhada de todos os dados. Posto isto, através da aplicação de um critério de Von Mises é possível observar as zonas onde as tensões se encontram concentradas e o dano nas camadas adesivas com o parâmetro SDEG.

3.5.2. Modelo coesivo triangular

Tal como discutido no subcapítulo 2.3.3, existem diversas abordagens relativas aos MDC que podem ser utilizados em circunstâncias distintas, de acordo com o comportamento do material

objeto de análise de destacar os modelos linear parabólico [102], triangular [103], exponencial [104], polinomial [105] e trapezoidal [106].

De entre as leis supramencionadas, a lei triangular é aquela que é mais frequentemente utilizada devido à sua simplicidade, simplicidade essa que se deve ao número reduzido de parâmetros necessários para a sua definição, para além de proporcionar resultados precisos na maioria das condições reais [107]. O modelo coesivo triangular é aquele que pode ser implementado tanto em duas dimensões, assim como em três dimensões. Na Figura 45, está representado o modelo coesivo triangular bidimensional que se estabelece em duas versões distintas: o modo puro e o modo misto [108].

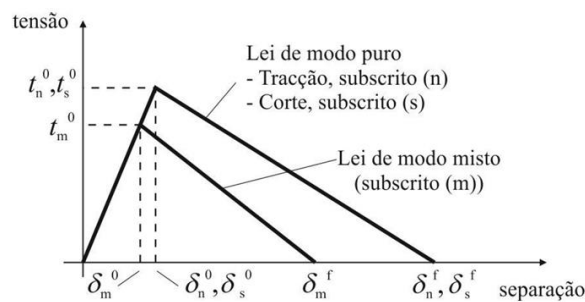


Figura 45 - Modelo coesivo triangular [108]

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 [108].

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 (t) e deformações (ε) em tração e corte nos elementos coesivos.

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = K_{COH} \times \varepsilon \quad (6)$$

As tensões coesivas à tração e ao corte são representadas pelos parâmetros coesivos t_n e t_s , respetivamente e as deformações de tração e ao corte são representadas por ε_n e ε_s pela mesma ordem. Os parâmetros de rigidez na ligação adesiva estão contidos na matriz, em que a definição dependerá da formulação utilizada. Segundo uma formulação local, empregada na simulação de fraturas com espessura nula, os parâmetros da matriz K_{COH} são definidos com valores muito altos, com o objetivo de evitar a criação de deformações artificiais pelos elementos coesivos [109]. Para as formulações contínuas de camadas finas, especialmente no que diz respeito às ligações adesivas, é viável obter uma aproximação dos parâmetros de rigidez, assumindo que [110]:

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

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

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

Onde:

- E representa o módulo de elasticidade longitudinal;
- G refere-se ao módulo de elasticidade transversal.

À luz desses parâmetros, o modelo é capaz de reproduzir com precisão a deformação da camada adesiva [110]. No modo misto, o início do dano pode ser caracterizado por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, descrito pela equação:

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

onde, $\langle \rangle$ representam os parênteses de *Macaulay*, que indicam que uma tensão de compressão não causa dano. Quando a resistência coesiva em modo misto, t_m^0 é alcançada conforme a igualdade da equação anterior, a rigidez do material começa a passar por um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós equivalentes é prevista por um critério linear energético, que depende dos valores de G_I e G_{II} , conforme expressado na seguinte equação:

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

3.5.3. Determinação dos parâmetros coesivos

Os parâmetros coesivos t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{II} têm sido alvo de inúmeras investigações uma vez que, de forma a simular com maior precisão a rotura de uma ligação, os parâmetros coesivos devem ser calibrados experimentalmente. Todavia, segundo uma investigação realizada por Jung Lee et al. [111], a obtenção de parâmetros como t_n^0 e t_s^0 não está devidamente normalizada. Posto isto, são propostas técnicas distintas de estimativa destes parâmetros nomeadamente, o método direto, o método inverso, o método de definição individual de parâmetros, cada um com um grau de complexidade e precisão diferentes. Foram realizados para validar ensaios em modo misto, com a estimativa dos MDC em *double cantilever beam* (DCB), *end-notched flexure* (ENF) e JSS [106, 112]. 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 [113]. O método direto calcula com precisão a norma das leis coesiva e prevê o comportamento dos MDC da ligação a partir dos dados obtidos em ensaios de fratura [113], por derivação das as curvas $G_{I-\delta_n}$ e $G_{II-\delta_s}$, onde δ_n , representa o deslocamento à tração e o δ_s o deslocamento ao corte. Os parâmetros principais a serem determinados no que diz respeito aos MDC são G_{IC} e G_{IIC} , dado o papel predominante que desempenham nos resultados gerais. Para avaliar esses parâmetros, métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, apesar de apenas serem adequados para adesivos com baixa ductilidade. 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[58].

Para avaliar os parâmetros coesivos, independentemente do método utilizado, os ensaios mais comumente empregados para determinar os valores de G_{IC} e G_{IIC} são os ensaios DCB e ENF, respetivamente [106, 112]. O ensaio DCB possui uma geometria simples e o processo de fabricação dos provetes é relativamente fácil. Este ensaio segue as diretrizes da norma ASTM D3433-99 e consiste em dois substratos colados por uma fina camada de adesivo, como mostra a Figura 46 a). No decorrer do fabrico do provete, é criada uma fenda inicial numa das extremidades. Ao longo do teste, é essencial a medição contínua do comprimento da fenda, representado por a . Entretanto, a determinação do parâmetro G_{IC} pode enfrentar alguns desafios visto que, em certos casos, a propagação da fenda pode ser instável, o que dificulta a medição precisa do seu comprimento durante o ensaio [114]. Existem diferentes abordagens para a obtenção desse parâmetro, incluindo métodos baseados na teoria de vigas, no comprimento equivalente ou no integral-J [115]. Pesquisas realizadas por Rice [116] resultaram numa fórmula para o cálculo de G_{IC} em provetes DCB, o que também permitiu obter a relação entre tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda [117].

O ensaio ENF, por outro lado, é caracterizado por uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e submetida a uma carga central, com um comprimento inicial de fenda (a_0), uma carga P é aplicada no centro do provete, como mostra a Figura 46 b), que provoca a propagação da fenda sem causar a separação entre os substratos. Para garantir a estabilidade da junta, o comprimento inicial da fenda (a_0) deve ser no mínimo 70% do comprimento total L [118]. Assim como no ensaio DCB, no ensaio ENF a medição contínua do comprimento da fenda a é fundamental para determinar o valor de G_{IIC} . No entanto, a medição pode ser mais complexa, pois a fenda propaga-se sem a abertura visível entre as faces, o que dificulta a sua medida em tempo real.

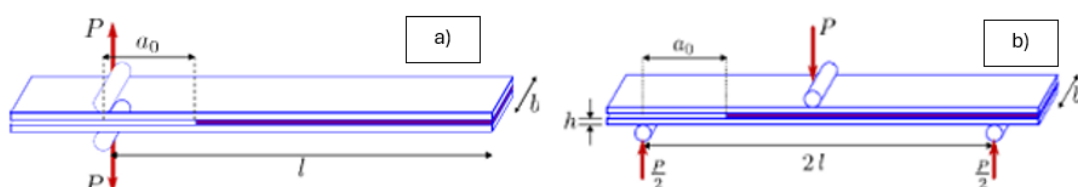


Figura 46 - Geometria do provete DCB (a); Geometria do provete ENF (b)

3.5.4. Juntas de sobreposição simples

3.5.4.1. Modos de rotura

Uma das principais mais-valias das análises numéricas por MEF no Abaqus® é a possibilidade de acompanhar, em pós-processamento, a evolução do dano desde os primeiros incrementos de carga até à rotura, com recurso à variável SDEG (*stiffness degradation*). Neste subcapítulo, a análise incide exclusivamente sobre as juntas de sobreposição simples, com a descrição da propagação do dano ao longo da sobreposição e dos modos de rotura observados.

A Tabela 27 apresenta de forma organizada os modos de rotura obtidos numericamente. Nesta são discriminados os L_o analisados, o material PA s/FC e PA c/FC e ainda o tipo de falha identificado, o que permite estabelecer uma comparação direta com os resultados experimentais. De seguida analisam-se as figuras (Figura 47, Figura 48 e Figura 49) correspondentes à evolução dos modos de rotura, organizadas em três instantes distintos:

- Durante carregamento (próximo do pico);
- Após a rotura.

Tabela 27 - Modo de rotura numérico para provetes de sobreposição simples

L_o [mm]	5		10		20	
Proвете	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC
Númérico	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente

Para $L_o=5$ e 10 mm (Figura 47 e Figura 48)

Durante o carregamento

Com o aumento da carga, as tensões propagam-se para o interior da zona adesiva. A flexão dos aderentes intensifica as componentes de tensões de arrancamento nas extremidades da ligação, o que é corresponde com o início e crescimento do dano na camada adesiva.

Rotura

No estado final verifica-se a separação dos aderentes e o correspondente alívio de tensões na maior parte do modelo, permanecendo apenas regiões residuais com níveis moderados. A morfologia das tensões é indicativa de rotura predominantemente coesiva no adesivo, podendo ocorrer contribuição local do aderente nas zonas de maior flexão.

Em suma, a leitura conjunta das três imagens confirma a sequência típica de dano em juntas de sobreposição: inicia-se nas extremidades, progride pela interface e culmina com a separação. Este padrão é essencialmente o mesmo para PA s/FC e PA c/FC. A presença de fibra altera sobretudo o nível das tensões e, por isso o modo de rotura previsto mantém-se.

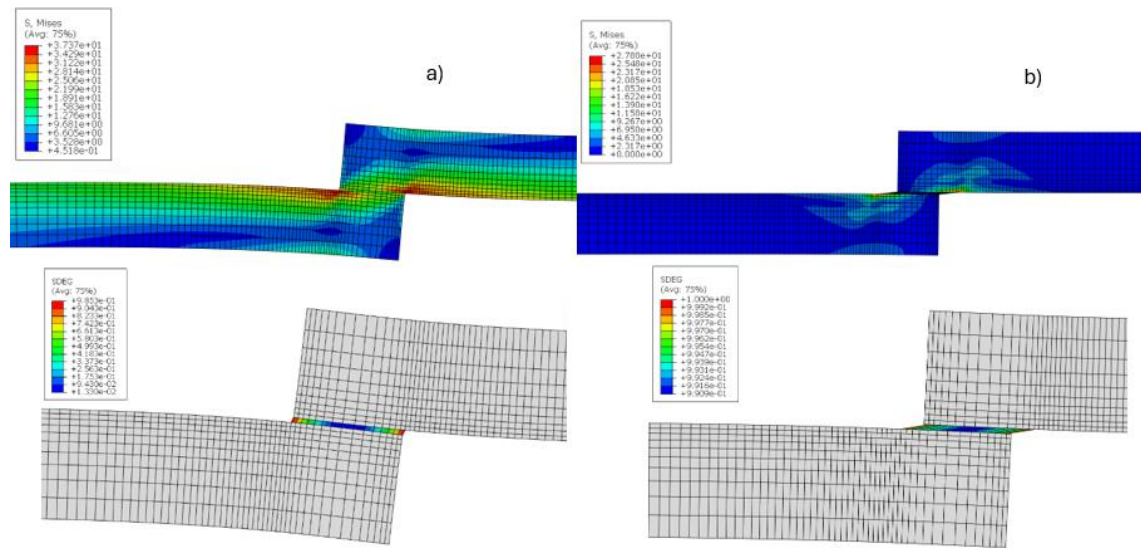


Figura 47 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de sobreposição simples ($L_0=5 \text{ mm}$) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

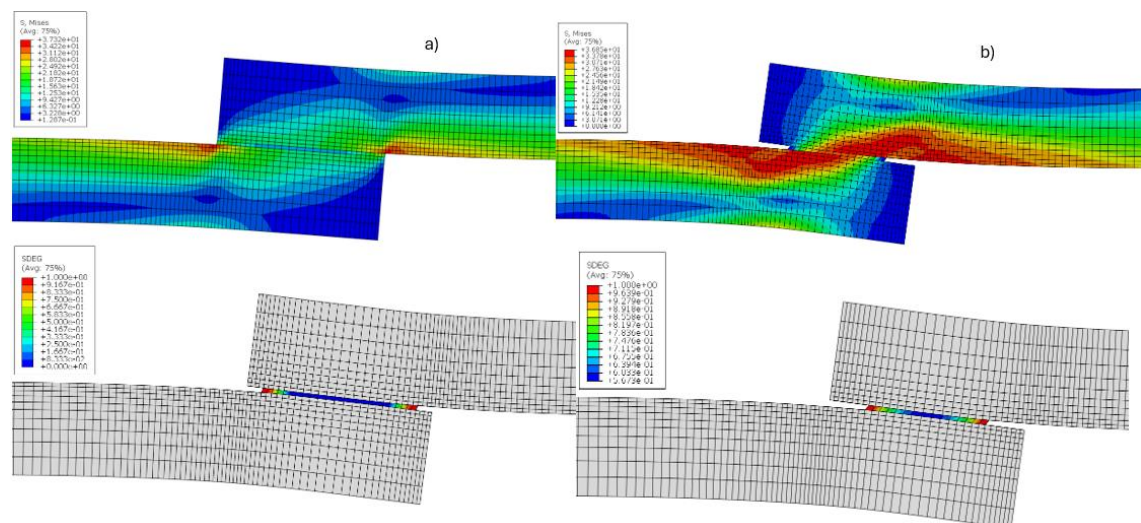


Figura 48 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de sobreposição simples ($L_0=10 \text{ mm}$) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

Para $L_0=20 \text{ mm}$

Durante o carregamento

O aumento de força origina uma banda de tensões elevadas que se estende para o interior da zona adesiva.

Rotura

No estado final verifica-se concentração máxima de von Mises nos aderentes e alívio generalizado na interface adesiva, sem evidência de colapso coesivo. A presença de deformação

plástica equivalente (PEEQ) elevada, aproximadamente 1,9% para PA s/FC e 4% para PA c/FC, confirma uma rotura pelo aderente, resultado de a ductilidade do material base ter sido ultrapassada, cerca de 3,8% para PA s/FC e 4,1% para PA c/FC.

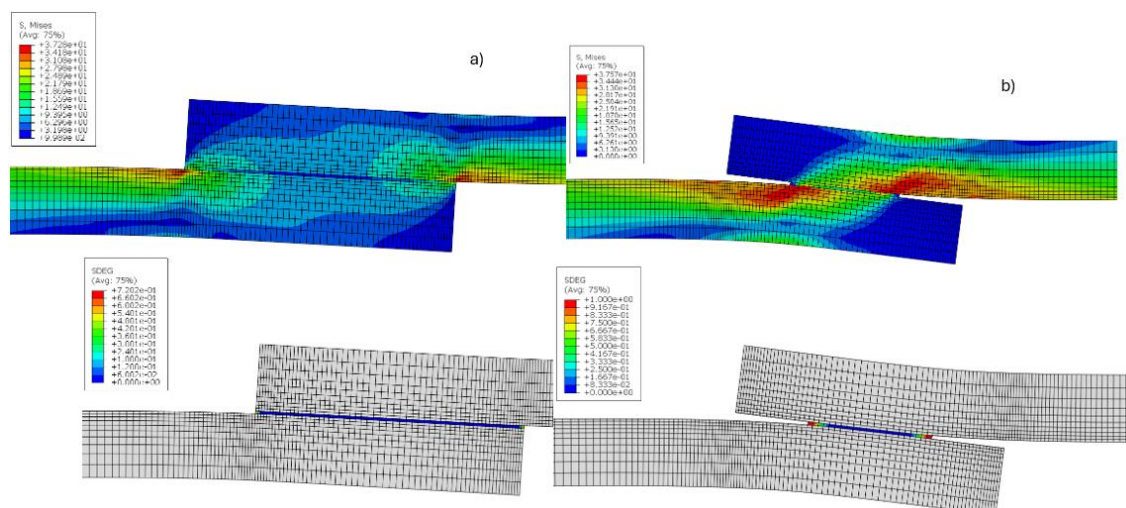


Figura 49 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de sobreposição simples ($L_o=20$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

3.5.4.2. Curvas $P-\delta$

No âmbito da modelação numérica efetuada no Abaqus®, foram extraídas as curvas $P-\delta$ das juntas adesivas foram obtidas a partir do histórico da força de reação registada na aresta encastrada e do deslocamento imposto durante o ensaio simulado. A leitura das curvas $P-\delta$ é essencial para compreender a resposta estrutural das diferentes configurações de junta e para quantificar o efeito do material dos aderentes.

De seguida, apresentam-se as curvas $P-\delta$ obtidas nas simulações numéricas das juntas de sobreposição simples. Foram analisadas três configurações geométricas, correspondentes a $L_o=5$ mm, 10 mm e 20 mm, com o objetivo de avaliar a influência deste parâmetro na resposta mecânica prevista pelo modelo coesivo. Os resultados encontram-se organizados por material e representados na Figura 50: em (a) e (b) surgem os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=5$ mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.

Desenvolvimento

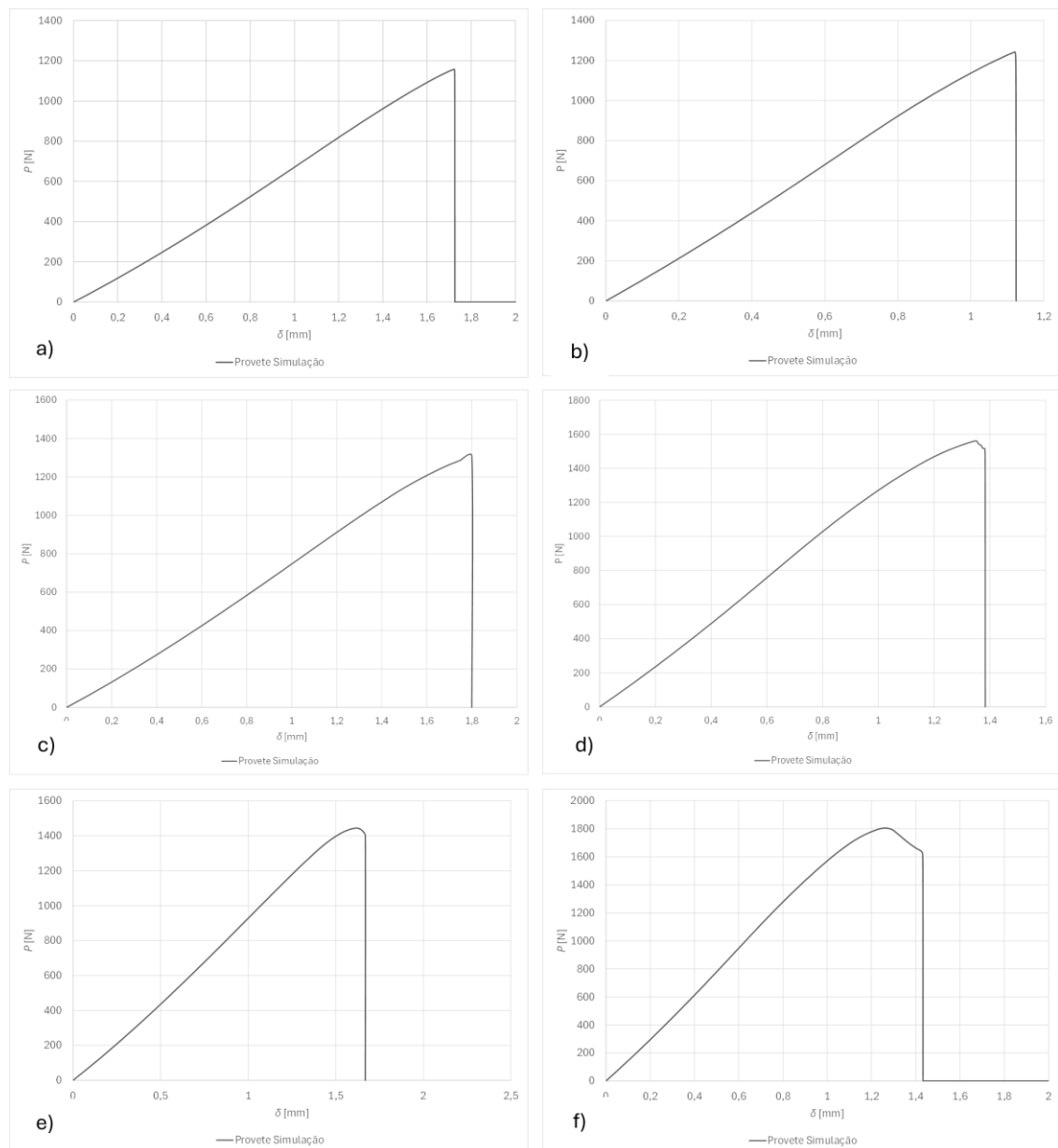


Figura 50 - Curvas P - δ numéricas para juntas de sobreposição simples: em (a) e (b) surgem os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=5$ mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.

3.5.4.3. Rigidez das juntas

Nesta secção analisa-se a rigidez das juntas de sobreposição simples obtida por modelação numérica no Abaqus®. A rigidez é determinada a partir das curvas P - δ geradas pelo modelo. Os valores numéricos de rigidez para as diferentes sobreposições estudadas são apresentados, com distinção do PA s/FC e PA c/FC, e será discutida a sua variação com a geometria.

A Tabela 28 apresenta um resumo com os valores de rigidez das juntas adesivas (em N/mm), determinados a partir dos ensaios de tração realizados das juntas de sobreposição simples para três $L_o=5, 10$ e 20 mm e para dois materiais de aderentes PA s/FC e PA c/FC.

Tabela 28 - Rigidez numérica das juntas adesivas de sobreposição simples

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Númérico	728,63	812,83	997,06	1180,52	1319,917	1631,623

Os resultados numéricos mostram que, para as juntas de PA s/FC, a rigidez prevista aumenta progressivamente com o L_o . O valor cresce de 728,63 N em $L_o=5$ mm até 997,06 N para $L_o=20$ mm, o que corresponde a um acréscimo de aproximadamente 37%. Entre $L_o=5$ mm e $L_o=10$ mm observa-se um aumento de 11,6%, enquanto de $L_o=10$ mm para $L_o=20$ mm o crescimento atinge 22,7%.

No PA c/FC, os valores são mais elevados e confirmam a rigidez superior devido ao reforço em fibra de carbono. A resistência numérica sofre um acréscimo de 1180,52 N para $L_o=5$ mm até 1631,62 N em $L_o=20$ mm, registrando-se um ganho de cerca de 38%. Entre $L_o=5$ mm e $L_o=10$ mm o incremento foi de 11,8%, enquanto de $L_o=10$ mm para $L_o=20$ mm verificou-se um acréscimo de 23,6%, em linha com o comportamento do PA s/FC.

A comparação entre os dois materiais evidencia que, para o mesmo L_o , o PA c/FC apresenta resistências 62% a 64% superiores às obtidas no PA s/FC. Esta diferença confirma a maior rigidez e capacidade de carga do material reforçado, mantendo a tendência de crescimento com o aumento de L_o .

3.5.4.4. Resistência das juntas

A determinação desta grandeza permite quantificar a capacidade de carga prevista pelo modelo para cada combinação de material dos aderentes (PA s/FC e PA c/FC) e $L_o=5$, 10 e 20 mm. De seguida apresenta-se a Tabela 29 com os valores numéricos de força máxima (em N).

Tabela 29 - Resistência numérica das juntas adesivas de sobreposição simples

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Númérico	1157,36	1308,79	1443,94	1241,36	1561,97	1803,77

Nas juntas de PA s/FC a força máxima cresce desde 1157 até 1444 N entre $L_o=5$ e 20 mm, o que representa um aumento de aproximadamente 25%.

No PA c/FC o aumento é mais significativo, de 1241 para 1562 e 1804 N, com um aumento de 26% desde $L_o=5$ para 10 mm e um aumento de 15% nos provetes com $L_o=10$ para 20 mm, o que corresponde a um aumento total entre L_o 's limite de aproximadamente 45%.

A análise comparativa confirma a relevância do reforço em fibra de carbono. Para $L_o=5$, 10 e 20 mm, as juntas com PA c/FC apresentam resistências superiores às obtidas com PA s/FC em cerca de 7%, 19% e 25%, respetivamente. O aumento do L_o intensifica o efeito positivo do reforço. Em suma, o modelo numérico prevê:

- O aumento da resistência com L_o ;
- Vantagem consistente do PA c/FC face ao PA s/FC.

3.5.4.5. Energias de rotura

A energia de rotura representa o trabalho total absorvido pela junta desde o início do carregamento até à rotura. Na Tabela 30 são apresentados e discutidos os resultados obtidos numericamente, relacionados com a energia dissipada, em função do L_o e do material utilizado.

Tabela 30 - Energia numérica de rotura das juntas adesivas de sobreposição simples

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Numérico	0,97	1,17	1,24	0,68	1,14	1,48

Nas juntas de PA s/FC a energia aumenta de 0,97 J para 1,24 J entre $L_o=5$ e 20 mm (aproximadamente 28%). Nas juntas PA c/FC o crescimento é bastante mais expressivo. Para $L_o=5$ mm, a energia de rotura é de 0,68 e para $L_o=20$ mm a energia de rotura é de 1,48 J, o que corresponde a um aumento de 118%.

A comparação entre materiais revela um comportamento dependente do L_o . Para $L_o=5$ mm, o PA c/FC apresenta energia inferior à do PA s/FC (0,68 J comparado com 0,97 J, cerca de menos 30%), o que é compatível com a maior rigidez dos aderentes reforçados. Para $L_o=10$ mm os valores tornam-se praticamente equivalentes (1,14 em comparação com 1,17), e para $L_o=20$ mm o PA c/FC supera claramente o PA s/FC (1,48 comparado com 1,24, um aumento de 19%), indica que, para L_o elevados, o reforço com fibra favorece uma distribuição de tensões mais uniforme e uma maior dissipação de energia até à rotura.

Em síntese, o modelo numérico prevê que aumentar L_o eleva a energia de rotura e que o benefício do reforço com fibra torna-se evidente sobretudo para L_o mais elevados, enquanto para L_o curtos a maior rigidez dos aderentes pode limitar a energia absorvida.

3.5.5. Juntas em degrau

3.5.5.1. Modos de rotura

Neste subcapítulo a análise incide exclusivamente sobre as juntas em degrau. A Tabela 31 sintetiza os modos de rotura obtidos nas simulações numéricas, distinguindo os L_o analisados, os materiais utilizados (PA s/FC e PA c/FC) e o tipo de falha previsto. Esta organização permite uma comparação direta com os resultados experimentais, o que facilita a validação do modelo numérico. Complementarmente, da Figura 51 à Figura 55 apresenta-se a evolução dos modos de rotura em três instantes representativos:

- Durante carregamento (próximo do pico);
- Após a rotura.

Tabela 31 - Modo de rotura numérico para juntas em degrau

L_o [mm]	5		10		20	
Provete	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC
Numérico	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	Aderente	Coesiva

Para $L_o=5$ mm (Figura 51)

Durante o carregamento

As tensões aumentam e formam-se picos de tensão de von Mises nas extremidades do degrau, com rotação moderada dos aderentes. Nascem núcleos de plastificação nos aderentes junto às arestas do degrau. A transferência de carga faz-se maioritariamente por corte ao longo do degrau, com *peel* residual e localizado.

Rotura

O mapa final evidencia um colapso no material dos aderentes, com PEEQ a ultrapassar os 1,9% para PA s/FC e 4% para PA c/FC, valor que excede o limite de ductilidade adotado. Para além disso, verifica-se separação do conjunto por rotura no aderente, sem eliminação generalizada dos elementos coesivos, o que confirma que a camada de adesivo não foi o elemento crítico nesta configuração.

Em suma, as três imagens descrevem a mesma sequência para PA s/FC e PA c/FC com $L_o=5$ mm

1. Concentrações iniciais nas transições do degrau;
2. Crescimento das tensões e da plastificação nos aderentes;
3. Rotura controlada pelo aderente.

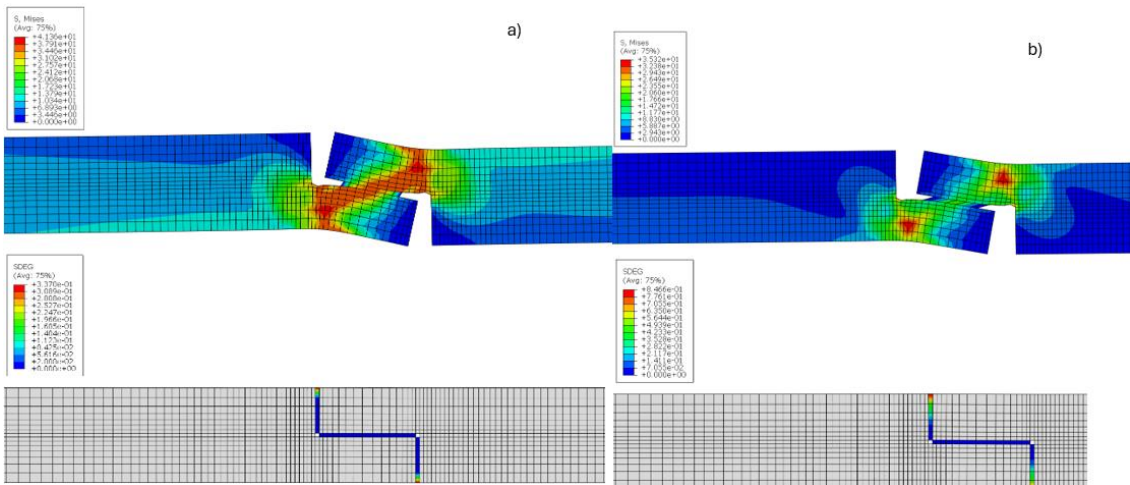


Figura 51 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=5$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

Para $L_o=10$ mm (PA s/FC, Figura 52)

Durante o carregamento

O aumento da força aplicada origina picos de tensão de von Mises nas extremidades do degrau e rotação visível dos aderentes. Surgem núcleos de plastificação no material base.

Rotura

No estado final verifica-se colapso no aderente. As regiões com tensão de von Mises superiores coincidem com áreas onde a deformação plástica equivalente que ultrapassa os 1,9%, cerca de 5%, o que confirma rotura pelo aderente por plastificação. A camada adesiva continua funcional, sem remoção generalizada de elementos coesivos.

Em suma, a sequência observada apresenta-se consistente, com uma fase inicial de distribuição elástica, seguida de uma intensificação localizada de tensões nas zonas de transição do degrau que marca o início da plastificação, e culmina na falha estrutural do aderente em PA s/FC.

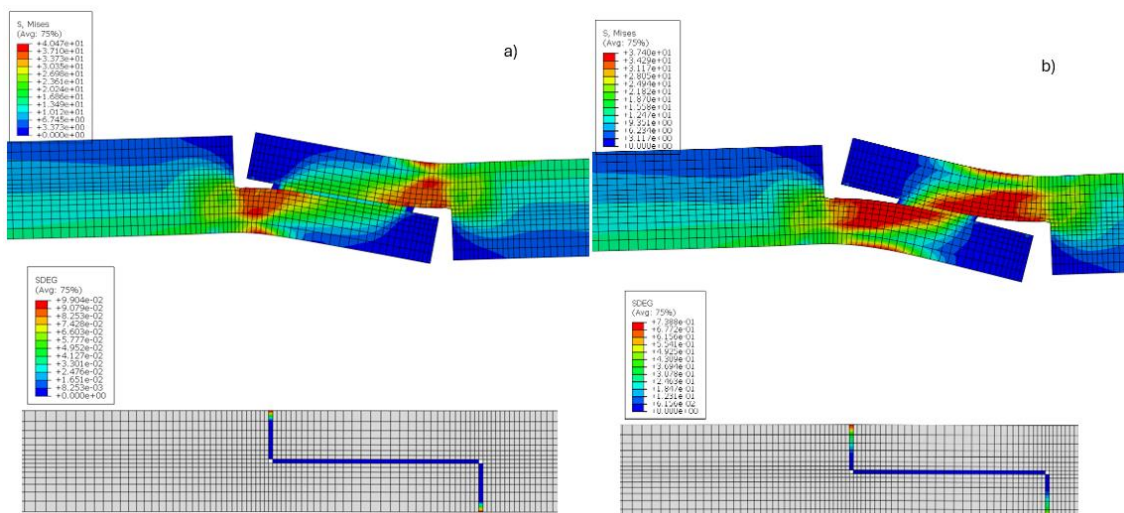


Figura 52 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=10$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

Para $L_o=10$ mm (PA c/FC, Figura 53)

Durante carregamento

O aumento da solicitação aplicada gera picos de tensão de von Mises nas transições do degrau. Observa-se crescimento do dano coesivo na interface, enquanto os aderentes permanecem abaixo do limiar plástico, pelo que se confirma que a camada de adesivo se aproxima do estado crítico.

Rotura

No estado final verifica-se separação ao longo da linha adesiva, o que demonstra uma rotura coesiva no adesivo.

Em suma, as três imagens da Figura 53 descrevem uma sequência consistente, que se inicia com a distribuição elástica inicial, prossegue com a intensificação das tensões de Von Mises e termina com a rotura coesiva do adesivo.

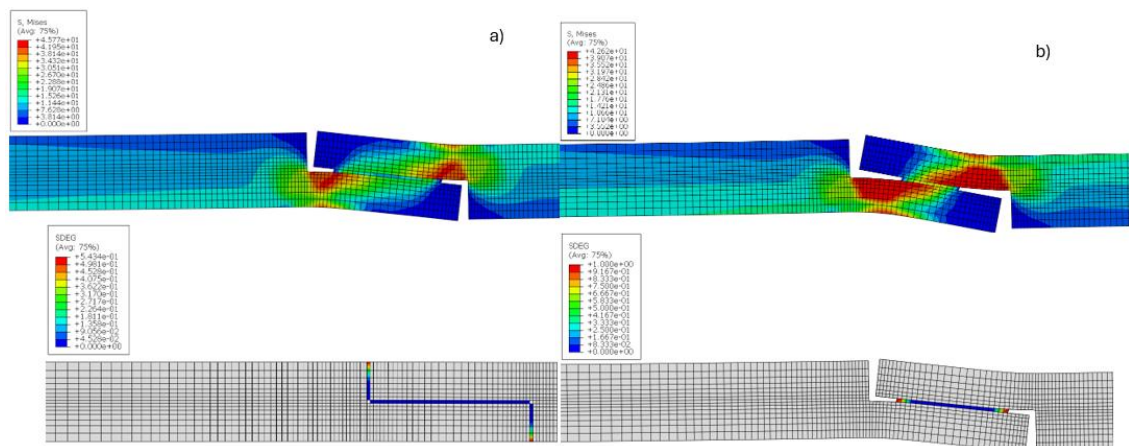


Figura 53 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=10$ mm) com fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

Para $L_o=20$ mm (PA s/FC, Figura 54)

Durante o carregamento

Os mapas revelam picos de tensão de von Mises nas extremidades do degrau e uma rotação mais visível dos aderentes. Esta evolução indica que a transferência de carga ao longo do degrau já se encontra bastante distribuída, o que afasta o adesivo do papel de elemento crítico.

Rotura

No estado final observa-se colapso localizado no aderente, com coalescência das zonas plásticas criadas nas fases anteriores. A deformação plástica equivalente ultrapassa o valor limite considerado para a ductilidade do PA s/FC, atinge a deformação de 7%, o que confirma rotura estrutural pelo aderente.

Em suma, a sequência típica para juntas sem fibra com L_o de 20 mm, iniciada por um regime elástico com picos moderados, seguida da intensificação das tensões e do início da plastificação no aderente junto às extremidades do degrau, e concluída com a falha controlada pelo aderente.

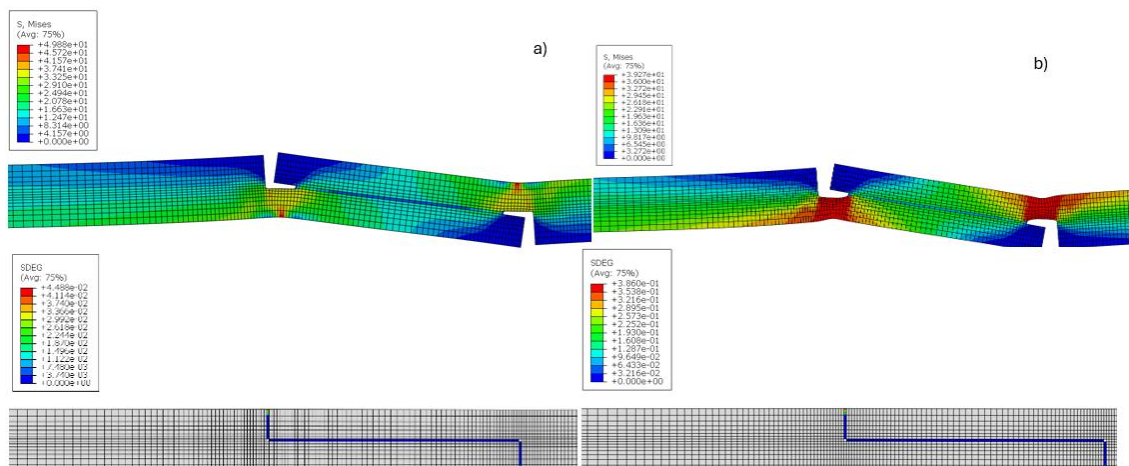


Figura 54 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=20$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

Para $L_o=20$ mm (PA c/FC, Figura 55)

Durante carregamento

O acréscimo da solicitação aplicada gera picos de tensão de von Mises nas transições do degrau e definem-se tensões de corte ao longo da camada do adesivo.

Rotura

O estado final mostra separação ao longo da camada de adesivo, com SDEG próximo da unidade e remoção de elementos coesivos. Os aderentes não evidenciam colapso plástico generalizado. Conclui-se que o modo de rotura é coesivo pelo adesivo.

Em suma, a sequência apresenta-se clara e consistente, com um regime elástico caracterizado por tensões moderadas e uma etapa final marcada pela rotura coesiva do adesivo.

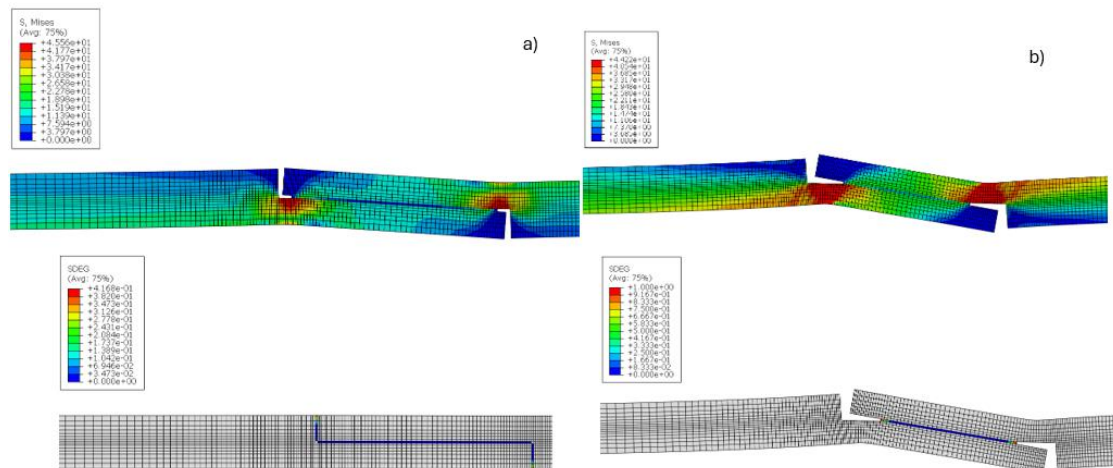


Figura 55 - Tensões de von Mises e SDEG para junta em degrau ($L_o=20$ mm) com fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

3.5.5.2. Curvas $P-\delta$

De seguida, apresentam-se as curvas $P-\delta$ obtidas nas simulações numéricas das juntas em degrau. Foram consideradas três geometrias distintas, correspondentes a $L_o=5$, 10 e 20 mm, de forma a avaliar a influência deste parâmetro na resposta mecânica prevista pelo modelo coesivo. Os resultados estão organizados por material e representados na Figura 56: em (a) e (b) encontram-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=5$ mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.

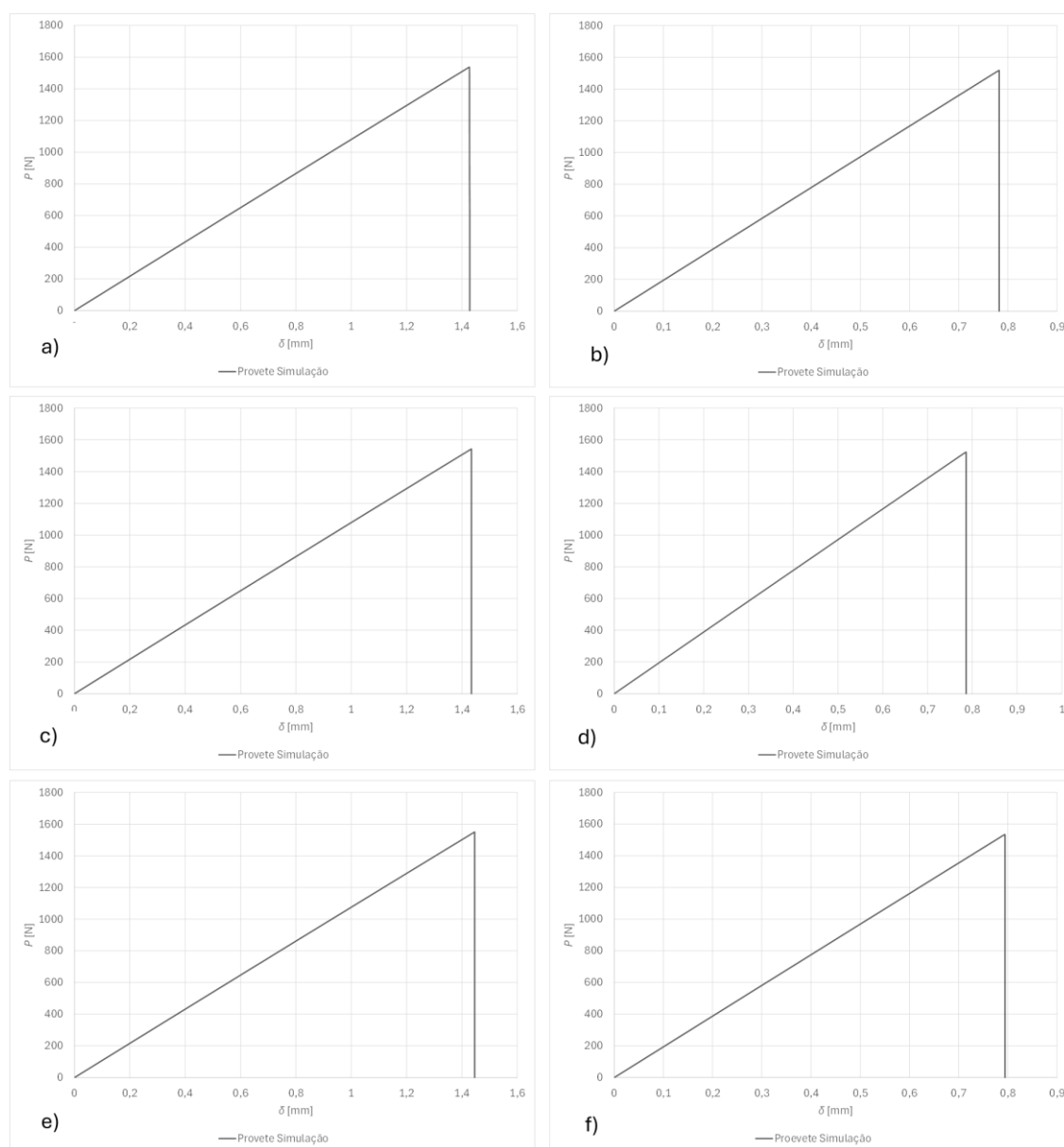


Figura 56 - Curvas P - δ numéricas para juntas em degrau: em (a) e (b) encontram-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_0=5$ mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_0=10$ mm; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_0=20$ mm.

3.5.5.3. Rigidez das juntas

Neste subcapítulo analisa-se a rigidez das juntas em degrau obtida por modelação numérica no Abaqus®. A rigidez é determinada a partir do declive inicial das curvas P - δ geradas pelo modelo. A Tabela 32 reúne os valores numéricos de rigidez das juntas em degrau (em N/mm) para os diferentes L_0 estudados, com distinção entre PA s/FC e PA c/FC. Nas juntas de PA s/FC, a rigidez assume valores de 1082,79 para 1081,21 e 1078,04 N/mm para $L_0=5$, 10 e 20 mm. No PA c/FC, registam-se valores de 1943,06, 1940,35 e 1934,80 N/mm para os mesmos L_0 . Em ambos os materiais, a alteração do L_0 não modifica de forma significativa o declive elástico inicial das curvas P - δ . A diferença entre materiais é marcante e consistente para todos os L_0 . As juntas com

PA c/FC exibem rigidez cerca de 80% superior à das juntas em PA s/FC. A leitura dos resultados permite concluir que, para a geometria em estudo, a rigidez da junta fica dominada pelas propriedades dos aderentes.

Tabela 32 - Rigidez numérica das juntas adesivas em degrau

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Númérico	1082,79	1081,21	1078,04	1943,06	1940,35	1934,80

3.5.5.4. Resistência das juntas

A Tabela 33 sintetiza a resistência numérica (em N) das juntas em degrau com $L_o=5$, 10 e 20 mm, em PA s/FC e PA c/FC.

Tabela 33 - Resistência numérica das juntas adesivas em degrau

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Númérico	1536,70	1542,33	1550,21	1517,29	1522,77	1533,43

Nos provetes de PA s/FC a força máxima evolui de 1536,70 para 1542,33 e 1550,21 N entre $L_o=5$, 10 e 20 mm. No PA c/FC obtêm-se valores entre 1517,29 e 1533,43 N, para $L_o=5$ e 20 mm, ou seja, o aumento do L_o não altera significativamente a capacidade última prevista pelo modelo. Os resultados evidenciam um patamar praticamente constante com o L_o .

A diferença entre materiais mantém-se pequena, mas consistente: o PA s/FC surge ligeiramente acima do PA c/FC para todos os L_o . Em termos de projeto, estes resultados sugerem que aumentar $L_o=5$ para 20 mm é pouco eficiente. A proximidade entre os resultados de PA s/FC e PA c/FC evidencia que o reforço dos aderentes atua principalmente ao nível da rigidez inicial, enquanto a capacidade última se mantém condicionada pelo modelo coesivo do adesivo e pela geometria da transição. No entanto, verifica-se uma diferença clara nos modos de rotura, nas juntas em PA s/FC a falha ocorre sempre no aderente, enquanto nas juntas em PA c/FC se observa uma transição, passando de rotura no aderente para rotura coesiva do adesivo à medida que o L_o aumenta.

3.5.5.5. Energias de rotura

Em complemento, a Tabela 34 reúne os valores numéricos de energia de rotura (em J) obtidos através da previsão numérica das juntas em degrau para $L_o=5, 10$ e 20 mm em dois materiais de aderentes distintos.

Tabela 34 - Energia numérica de rotura das juntas adesivas em degrau

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Numérico	1,06	1,07	1,09	0,56	0,56	0,57

No PA s/FC a energia aumenta de 1,06 para 1,09 J enquanto no PA c/FC passa de 0,56 para 0,57 J. Este patamar quase constante indica que, no intervalo de L_o analisados, os dois materiais em estudo (PA s/FC e PA c/FC) e a caracterização do tipo de falha identificado em cada caso. A organização dos resultados numa única tabela permite observar com clareza as tendências associadas a cada material e comparar a evolução do comportamento das juntas com L_o .

3.5.6. Juntas de chanfro interior

3.5.6.1. Modos de rotura

Neste subcapítulo apresenta-se a análise numérica dos modos de rotura de juntas de chanfro interior (*scarf*), obtida com o Abaqus®. A Tabela 35 apresenta os modos de rotura obtidos a partir das simulações numéricas, para os diferentes L_o analisados, os dois materiais em estudo (PA s/FC e PA c/FC) e a caracterização do tipo de falha identificado em cada caso. A organização dos resultados numa única tabela permite observar com clareza as tendências associadas a cada material e comparar a evolução do comportamento das juntas com L_o .

Para complementar a análise numérica, a Figura 57, Figura 58 e Figura 59 mostra a progressão dos modos de rotura ao longo do ensaio simulado. Cada figura encontra-se dividida em três momentos distintos que permitem acompanhar a evolução da falha:

- Durante carregamento (próximo do pico);
- Após a rotura.

Tabela 35 - Modo de rotura numérico para juntas de chanfro interior

L_o [mm]	5		10		20	
Provete	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC
Numérico	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente

Para $L_o=5$ mm (Figura 57)

Durante carregamento

Observa-se a intensificação das tensões na camada do adesivo.

Rotura

Verifica-se separação ao longo da interface adesivo/aderente, sem colapso do material dos aderentes. A rotura é coesiva.

Análise comparativa

Os mapas numéricos para PA s/FC e PA c/FC apresentam comportamento qualitativo muito semelhante: o adesivo é o elemento crítico e a rotura dá-se por rotura coesiva no adesivo. O reforço com fibra apenas altera a magnitude local das tensões e reduz ligeiramente as deformações globais, mas não muda o mecanismo de falha para $L_o=5$ mm.

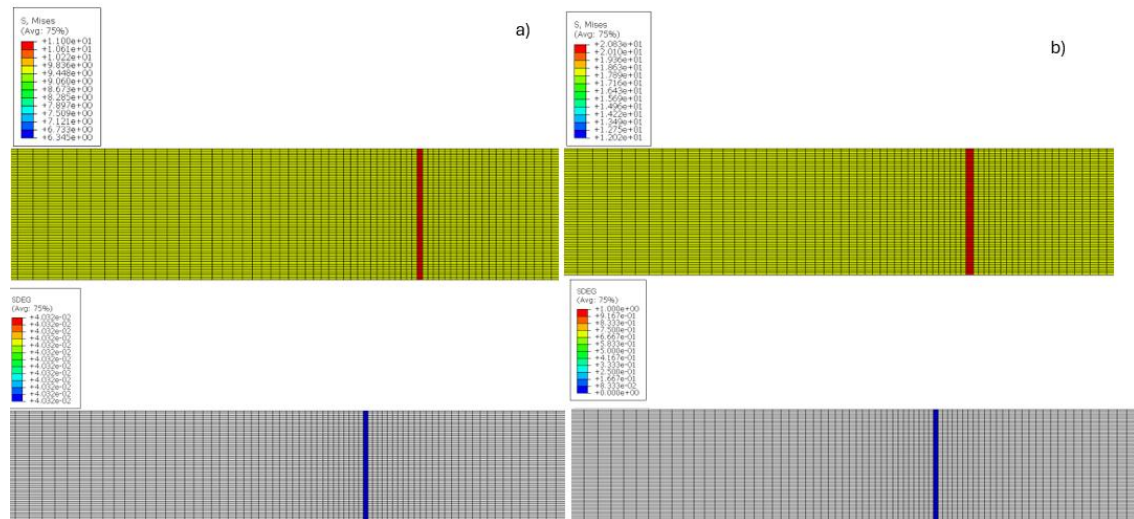


Figura 57 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de chanfro interior ($L_o=5$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

Para $L_o=10$ e 20 mm (Figura 58 e Figura 59)

Durante o carregamento

O carregamento progressivo da junta provoca incremento das tensões de von Mises nas extremidades de ligação. Tanto no PA s/FC como no PA c/FC surgem núcleos de plastificação nos aderentes junto às extremidades de ligação.

Rotura

No estado final confirma-se a rotura pelo aderente. As zonas de maior von Mises coalescem nas transições do chanfro, onde a deformação plástica equivalente (PEEQ) ultrapassa o limite de ductilidade definido para o material, o que conduz ao colapso do material base. A interface adesiva não apresenta eliminação generalizada de elementos, o que exclui um mecanismo de falha controlado pelo adesivo.

EM suma, o modo de rotura é igual em PA s/FC e PA c/FC. A principal diferença reside na extensão da zona plástica: no PA s/FC a plastificação é mais extensa, compatível com a maior deformabilidade; no PA c/FC a plastificação é mais concentrada junto às extremidades de ligação devido à rigidez superior dos aderentes.

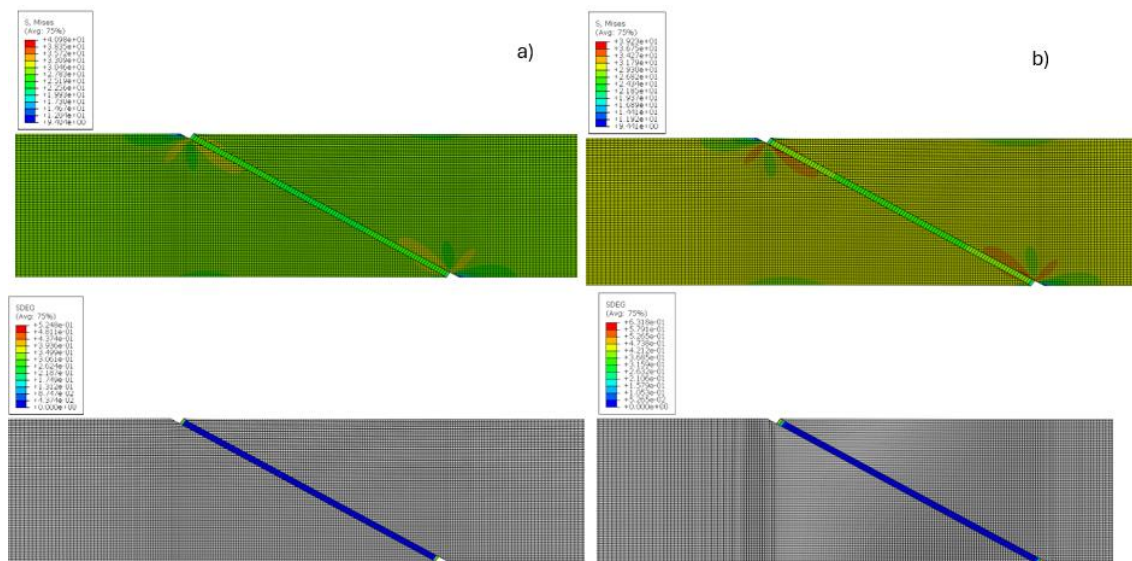


Figura 58 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de chanfro interior ($L_o=10$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

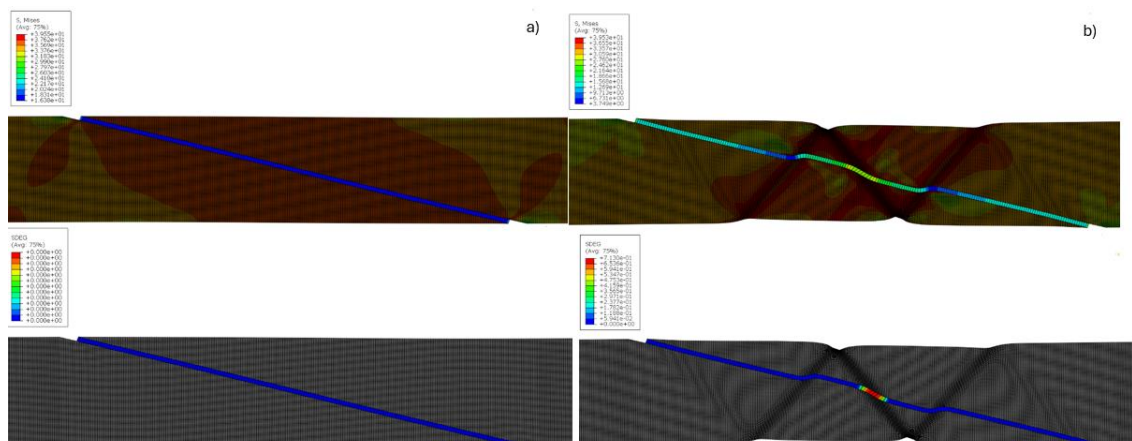


Figura 59 - Tensões de von Mises e SDEG para junta de chanfro interior ($L_o=20$ mm) sem fibra de carbono. a) Durante carregamento; b) Rotura

3.5.6.2. Curvas $P-\delta$

As curvas $P-\delta$ resultantes das simulações numéricas das juntas de chanfro interior encontram-se representadas na Figura 60. Foram avaliados $L_o=5$, 10 e 20 mm com o propósito de examinar a influência deste parâmetro na resposta estrutural prevista pelo modelo coesivo. A figura organiza os resultados por material: em (a) e (b) estão representados os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=5$ mm; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=10$ mm; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_o=20$ mm.

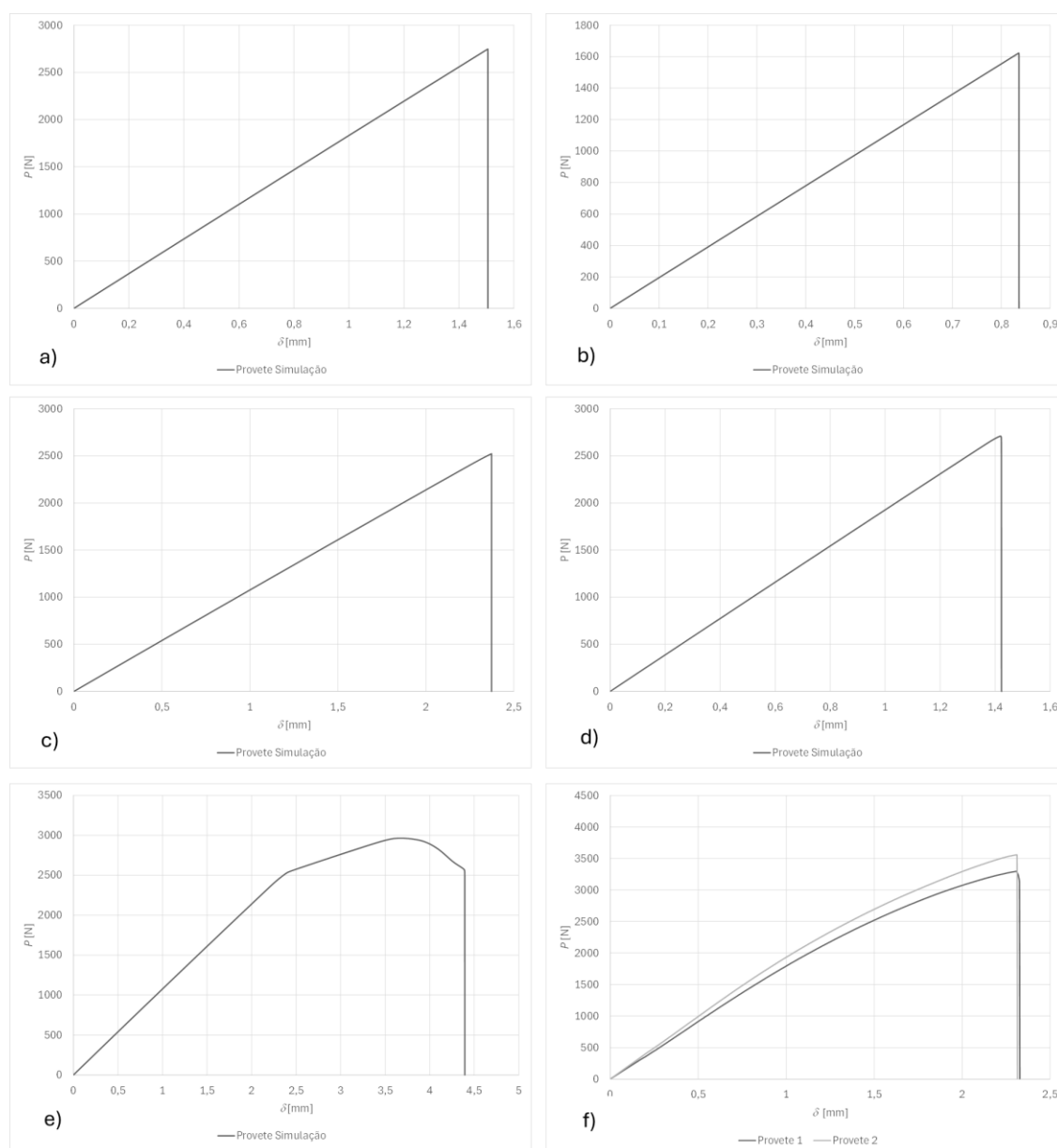


Figura 60 - Curvas P - δ numéricas para juntas de chanfro interior: em (a) e (b) estão representados os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_0=5$ mm; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_0=10$ mm; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com $L_0=20$ mm.

3.5.6.3. Rigidez das juntas

A Tabela 36 reúne os valores experimentais de rigidez das juntas de chanfro interior (N/mm) obtidos nos ensaios de tração, por forma a confrontar as previsões numéricas com os resultados laboratoriais e avaliar a adequação do modelo. Nas juntas em PA s/FC destaca-se um valor muito elevado para $L_0=5$ mm (1836,57 N/mm) e um patamar claramente inferior para $L_0=10$ e 20 mm (1078,99 e 1079,18 N/mm, respetivamente). A passagem de $L_0=5$ para $L_0=10$ mm implica uma quebra de 41%, sendo que, a rigidez se mantém praticamente invariável entre $L_0=10$ e 20 mm (variação de 0,02%). Esta mudança de nível explica-se pela própria geometria:

com L_o de 5 mm é uma junta topo-a-topo, a trajetória de carga se torna colinear e a contribuição de corte no adesivo é reduzida. O sistema apresenta, por isso, maior declive elástico. Quando o chanfro aumenta para $L_o=10$ ou $L_o=20$ mm, aumenta a parcela de deformação por corte no adesivo. Nas juntas em PA c/FC a rigidez mantém-se elevada e quase constante para todos os L_o : 1945,58, 1930,91 e 1938,40 N/mm, respetivamente, com variações inferiores a 1%. A comparação entre materiais é elucidativa. Para L_o de 5 mm o PA c/FC apresenta rigidez 6% superior à do PA s/FC. Para L_o de 10 e 20 mm a diferença torna-se muito expressiva, com ganhos na ordem de 79%.

Tabela 36 - Rigidez numérica das juntas adesivas de chanfro interior

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Numérico	1836,57	1078,99	1079,18	1945,58	1930,91	1938,40

3.5.6.4. Resistência das juntas

Neste subcapítulo avalia-se a resistência de juntas de chanfro interior (*scarf*) através de modelação numérica no Abaqus®.

A Tabela 37 reúne a resistência numérica (em N) das juntas de chanfro interior para $L_o=5$, 10 e 20 mm, tendo em conta aderentes em PA s/FC e PA c/FC. Os valores permitem identificar duas respostas distintas.

Tabela 37 - Resistência numérica das juntas adesivas de chanfro interior

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Numérico	2748,39	2523,08	2963,47	1623,89	2709,15	3446,25

Nos provetes de PA s/FC a resistência mantém-se relativamente estável, com valores entre 2523 e 2963 N, sem uma tendência clara de aumento com o acréscimo de L_o .

Nas juntas de PA c/FC revela um desempenho claramente superior para $L_o=10$ mm e, sobretudo, para $L_o=20$ mm. Estes resultados indicam que o reforço com fibra de carbono potencia a resistência das juntas quando o L_o é elevado, o que torna o PA c/FC mais eficiente em configurações de maior dimensão.

A comparação entre materiais evidencia uma mudança de valores resistência com o aumento de L_o . Para $L_o=5$ mm o PA s/FC supera o PA c/FC em cerca de 59%,. Nesta configuração, a falha observada é coesiva no adesivo, o que explica a maior dissipação de energia. Para $L_o=10$ mm os desempenhos tornam-se comparáveis, com vantagem do PA c/FC em aproximadamente 7%. Para $L_o=20$ mm o PA c/FC assume vantagem clara face ao PA s/FC, o que confirma que chanfros longos tiram partido de aderentes rígidos. Neste caso, o modo de falha mantém-se aderente, coerente com a maior concentração de tensões junto às extremidades.

3.5.6.5. Energias de rotura

A Tabela 38 reúne os valores experimentais de energia de rotura obtidos numericamente para juntas *scarf*. Esta tabela apresenta a energia de rotura numérica (em J) das juntas de chanfro interior para os três L_o , em PA s/FC e PA c/FC.

Tabela 38 - Energia numérica de rotura das juntas adesivas de chanfro interior

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Numérico	2,01	2,94	8,58	0,64	1,89	3,56

Em ambos os materiais, a energia aumenta com o aumento de L_o , embora com magnitudes diferentes. No PA s/FC os valores evoluem de 2,01 para 8,58 J para o L_o entre 5 e 20 mm. O que corresponde a um aumento de 327% entre os mesmos L_o . No PA c/FC a energia aumenta de 0,64 para 3,56 J, o que corresponde a um aumento de 456% de $L_o=5$ até 20 mm. Apesar desta subida, os níveis mantêm-se inferiores aos do PA s/FC. O módulo elevado dos aderentes reforçados limita os deslocamentos atingidos pelas juntas, o que se reflete em menores energias. A comparação direta entre PA s/FC e PA c/FC confirma energias mais altas no PA s/FC para todos comprimentos de chanfro.

3.6. Estudo comparativo

Esta secção estabelece a ponte entre os resultados experimentais e as previsões numéricas obtidas no Abaqus®. O objetivo principal é validar a capacidade preditiva do modelo e quantificar em que medida este reproduz o comportamento observado em ensaio para as três geometrias estudadas (sobreposição simples, degrau e chanfro interior) e para os dois materiais de aderentes (PA s/FC e PA c/FC). A comparação realiza-se com os mesmos indicadores:

- Modos de rotura;
- Curvas $P-\delta$;
- Rigidez das juntas;
- Resistência das juntas;
- Energia de rotura.

Para garantir comparabilidade, o modelo numérico usa propriedades medidas nos provetes de tração, espessura de adesivo controlada e condições fronteira que reproduzem o dispositivo de ensaio. A análise apresenta, para cada combinação geometria-material, uma tabela-resumo com médias, desvios-padrão e diferenças relativas entre ensaios numéricos e experimentais. A leitura privilegia dois critérios:

1. Reprodução de tendências;
2. Proximidade quantitativa.

Sempre que surjam discrepâncias relevantes, discute-se a sua origem provável: variabilidade de fabrico (espessura real da camada de adesivo, alinhamento dos aderentes e acabamento superficial das superfícies de ligação), anisotropia e porosidade associadas ao FFF, simplificações do modelo (lei coesiva, parâmetros do dano, malha) e incerteza das propriedades de material. Esta abordagem permite validar o modelo quando há concordância robusta e, quando necessário, identificar ajustamentos fundamentados para melhorar a sua fidelidade.

3.6.1. Modos de rotura

Esta secção confronta os modos de rotura obtidos em ensaio experimental com as previsões numéricas para as três geometrias estudadas (sobreposição simples, degrau e chanfro interior) e para os dois materiais de aderentes (PA s/FC e PA c/FC).

A Tabela 39 sintetiza, para as juntas de sobreposição simples, os modos de rotura experimentais e numéricos nas três sobreposições estudadas ($L_o=5,10,20$ mm) e para ambos os materiais de aderentes (PA s/FC e PA c/FC)

Tabela 39 - Comparação de modos de rotura experimentais e numéricos para junta de sobreposição simples

L_o [mm]	5		10		20	
Provete	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC
1	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
2	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
3	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
4	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente
Numérico	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente

Para $L_o=5$ e 10 mm, tanto no PA s/FC como no PA c/FC, a rotura é coesiva, o que confirma que nestas configurações a rotura é coesiva no adesivo, sem influência significativa do material dos aderentes. Para $L_o=20$ mm, verifica-se uma alteração do mecanismo de falha, passando a ser no aderente em ambos os materiais, tanto nos resultados experimentais como nos numéricos.

A Tabela 40 sintetiza, para as juntas em degrau, os modos de rotura experimentais e numéricos.

Tabela 40 - Comparação de modos de rotura experimentais e numéricos para junta em degrau

L_o [mm]	5		10		20	
Provete	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC
1	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	Aderente	Coesiva
2	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	Aderente	Coesiva
3	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	Aderente	Coesiva
4	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	-	Coesiva
Numérico	Aderente	Aderente	Aderente	Coesiva	Aderente	Coesiva

Para $L_o=5$ mm, tanto no PA s/FC como no PA c/FC, a falha ocorre sempre no aderente, mostrando que nestas condições a resistência do substrato é inferior à do adesivo. Para $L_o=10$ mm, mantém-se a rotura no aderente para o PA s/FC, enquanto no PA c/FC ocorre rotura coesiva no adesivo, o que indica que o reforço com fibra de carbono aumenta a resistência do substrato e transfere a falha para o adesivo. Para $L_o=20$ mm, observa-se a mesma tendência, ou seja, o PA s/FC mantém a falha no aderente, enquanto no PA c/FC a rotura continua a ser coesiva no adesivo.

A Tabela 41 sintetiza, para as juntas de chanfro interior, os modos de rotura experimentais e numéricos.

Tabela 41 - Comparação de modos de rotura experimentais e numéricos para junta de chanfro interior

L_o [mm]	5		10		20	
Provete	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC	PA s/FC	PA c/FC
1	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
2	Coesiva	-	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente
3	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	-
4	Coesiva	Coesiva	Aderente	-	Aderente	-
Numérico	Coesiva	Coesiva	Aderente	Aderente	Aderente	Aderente

Para $L_o=5$ mm, tanto no PA s/FC como no PA c/FC, a falha é coesiva no adesivo, o que indica que o adesivo controla o comportamento nesta configuração. Para $L_o=10$ mm, a rotura passa a ocorrer no aderente em ambos os materiais, assim sendo, o aumento do L_o desloca o ponto crítico da falha para o substrato. Para $L_o=20$ mm, a tendência mantém-se, com rotura no aderente para o PA s/FC e para o PA c/FC, reitera assim que o adesivo deixa de ser o elemento limitativo.

Em suma, para todos os tipos de junta, a concordância entre os resultados numéricos e os resultados experimentais validam a capacidade do modelo em prever a influência do L_o e do material no mecanismo de rotura.

3.6.2. Curvas $P-\delta$

Esta secção confronta as curvas $P-\delta$ obtidas em ensaio experimental com as previsões numéricas para as três geometrias estudadas (sobreposição simples, degrau e chanfro interior) e para os dois materiais de aderentes (PA s/FC e PA c/FC).

A Figura 61 sintetiza, para as juntas de sobreposição, as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas, sendo que em (a) e (b) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 5 mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 10 mm, respetivamente; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 20 mm, respetivamente.

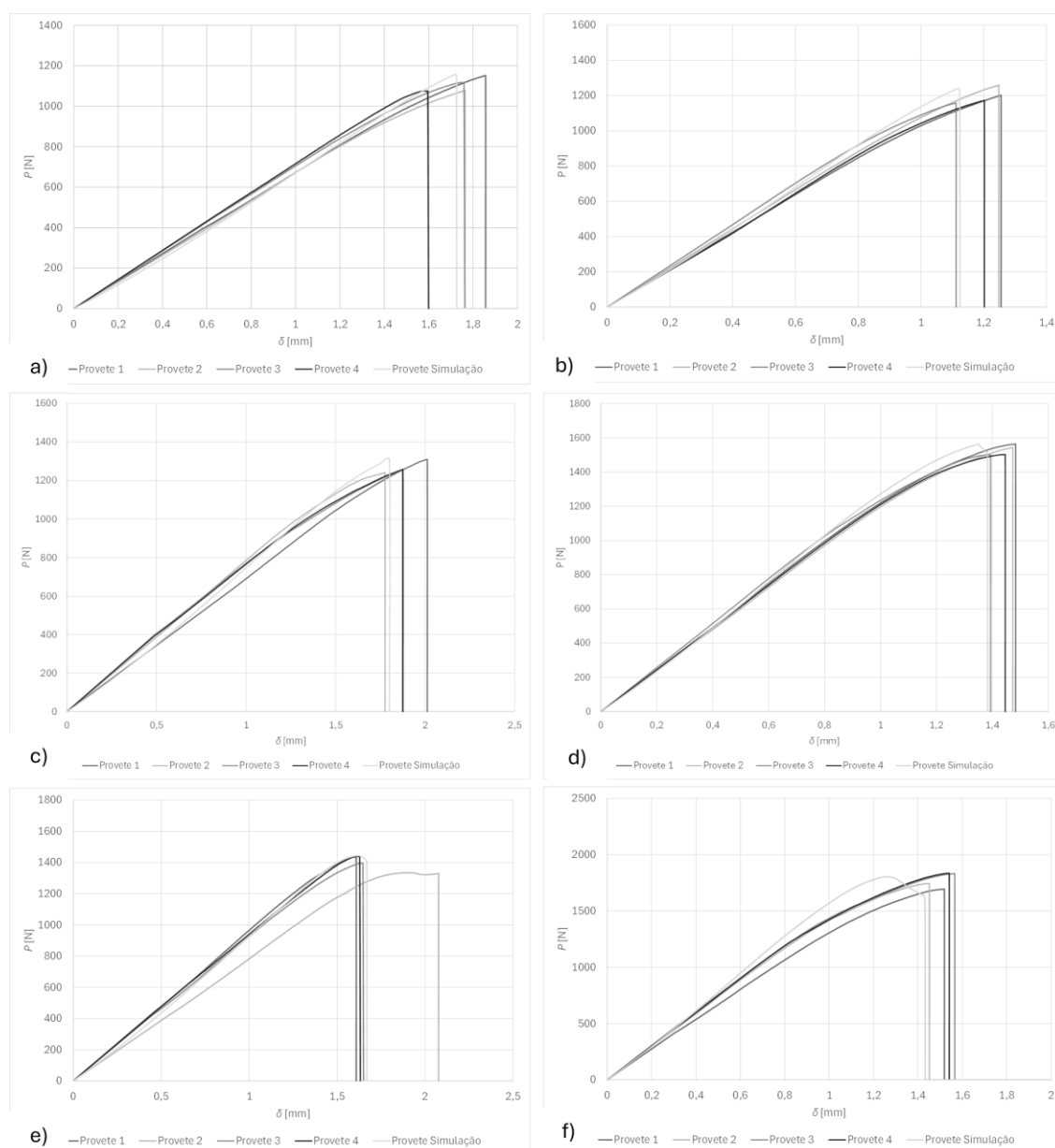


Figura 61 - Curvas P - δ numéricas e experimentais para juntas de sobreposição simples: em (a) e (b) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 5 mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 10 mm, respetivamente; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 20 mm, respetivamente.

As curvas numéricas apresentam boa concordância com os resultados experimentais em todas as configurações. Para $L_o=5$ e 10 mm, a simulação reproduz a rigidez inicial e a resistência máxima, com diferenças apenas no deslocamento de rotura, onde os provetes revelam maior dispersão. Em $L_o=20$ mm, a correspondência mantém-se, embora no PA s/FC se verifique maior variabilidade experimental, enquanto no PA c/FC a simulação reflete de forma próxima o comportamento médio. De forma global, o modelo numérico revela carácter conservador e fiabilidade, validando a sua aplicação na previsão do desempenho das juntas adesivas.

Desenvolvimento

A Figura 62 sintetiza, para as juntas em degrau, as curvas P - δ experimentais e numéricas, sendo que em (a) e (b) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 5 mm, respetivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 10 mm, respetivamente; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 20 mm, respetivamente.

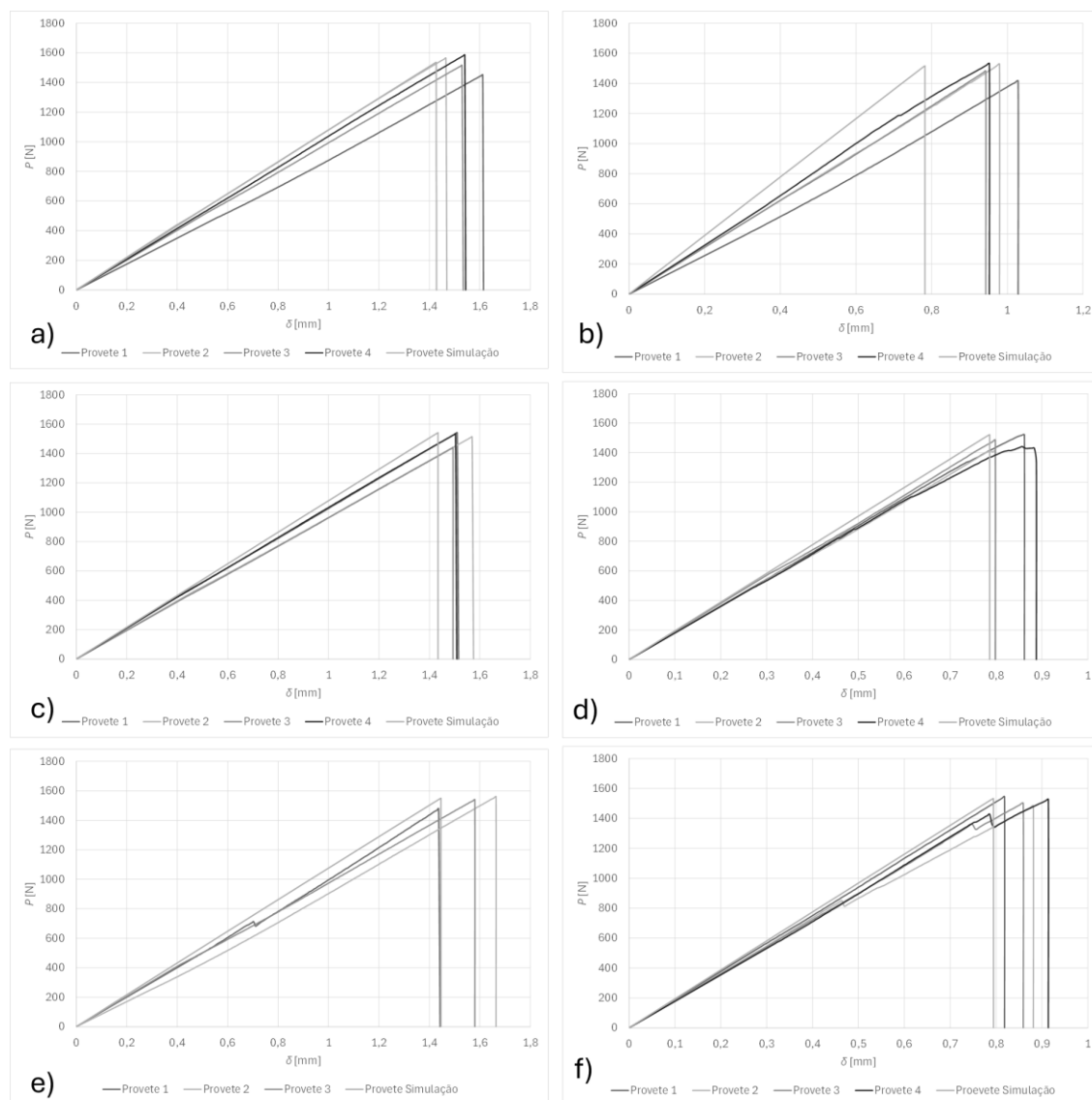


Figura 62 - Curvas P - δ numéricas e experimentais para juntas em degrau

As curvas numéricas apresentam boa concordância com os resultados experimentais em todas as configurações. Para $L_o=5$ mm, a simulação reproduz a rigidez inicial e a resistência máxima, embora no PA c/FC se verifique maior dispersão entre provetes. Para $L_o=10$ mm, a correspondência é elevada, com sobreposição quase total das curvas na fase elástica e pequenas diferenças no deslocamento de rotura. Para $L_o=20$ mm, mantém-se a boa aproximação, com valores próximos de resistência máxima, apesar de alguma variabilidade experimental. De forma global, o modelo numérico mostra carácter conservador e fiável, validando a sua aplicação na previsão do comportamento das juntas adesivas.

A Figura 63 sintetiza, para as juntas de chanfro interior, as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas, sendo que em (a) e (b) apresentam-se os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 5 mm, respectivamente; em (c) e (d) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 10 mm, respectivamente; e em (e) e (f) os provetes em PA s/FC e PA c/FC com L_o de 20 mm, respectivamente.

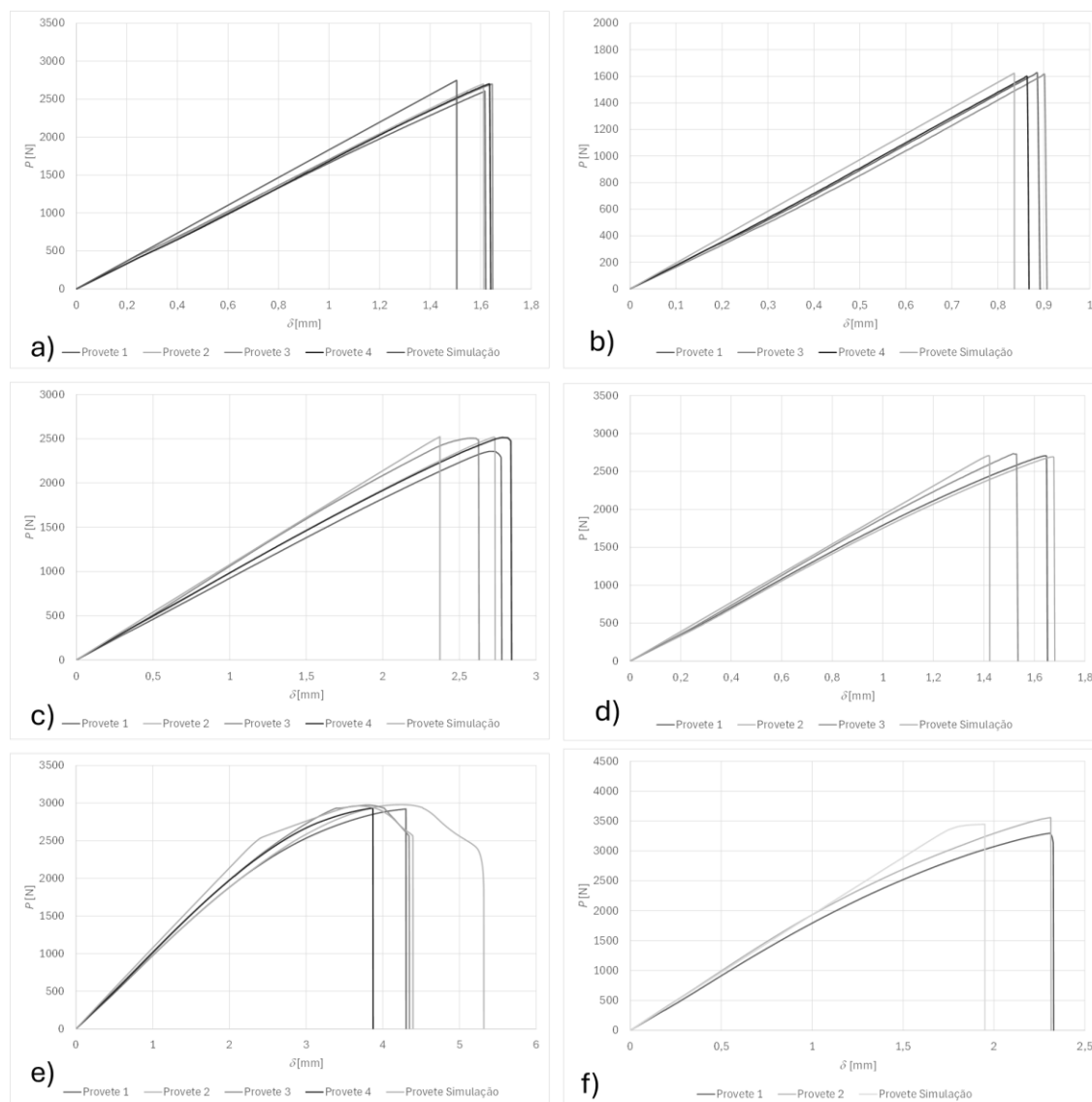


Figura 63 - Curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais para juntas de chanfro interior

As curvas numéricas revelam uma boa correlação com os ensaios experimentais em todas as configurações analisadas. Nos provetes com $L_o=5$ mm, os resultados simulados acompanham a evolução das curvas experimentais, apresentando valores próximos de carga máxima. Para $L_o=10$ mm, a concordância mantém-se elevada, com as simulações a reproduzirem o comportamento global, embora os provetes experimentais evidenciem maior variação no deslocamento de rotura. Em $L_o=20$ mm, o PA s/FC apresenta dispersão mais acentuada entre provetes, enquanto o PA c/FC regista resultados experimentais muito próximos da simulação.

3.6.3. Rigidez das juntas

Esta secção confronta os valores de rigidez obtidos em ensaio com as previsões numéricas para as três geometrias estudadas (sobreposição simples, degrau e chanfro interior) e para os dois materiais de aderentes (PA s/FC e PA c/FC). Em ambos os casos, a rigidez k (em N/mm) define-se como o declive inicial das curvas $P-\delta$, isto é, a resposta elástica do conjunto adesivo-aderentes. A Tabela 42 sintetiza, para as juntas de sobreposição simples, os principais resultados experimentais e numéricos para $L_o=5, 10$ e 20 mm e para ambos os materiais de aderentes (PA s/FC e PA c/FC). Para os dados experimentais apresentam-se média, desvio-padrão e coeficiente de variação e para as previsões numéricas indicam-se os valores calculados no Abaqus® e a diferença relativa face à média experimental.

Tabela 42 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Média (prático)	720,91	800,01	959,20	1158,72	1307,48	1532,73
Desvio Pad	15,41	41,67	75,64	47,91	25,52	72,47
CoV	2,14	5,21	7,89	4,14	1,95	4,73
Numérico	728,63	812,83	997,06	1180,52	1319,92	1631,62
Dif. relativa	1,07	1,60	3,95	1,88	0,95	6,45

A comparação direta entre os valores práticos e numéricos de rigidez das juntas de sobreposição simples revela uma concordância muito elevada em todas as condições. No PA s/FC, a rigidez experimental regista valores de 720,91 para 800,01 e 959,20 N/mm quando o L_o passa de 5 para 10 e 20 mm, enquanto o modelo prevê 728,63, 812,83 e 997,06 N/mm, respetivamente. As diferenças relativas são reduzidas, cerca de 1,07% para $L_o=5$ mm, 1,60% para $L_o=10$ mm e 3,95% para $L_o=20$ mm, o que confirma que o modelo reproduz a tendência de aumento com L_o e apresenta apenas uma ligeira sobre estimativa. No PA c/FC observa-se o mesmo padrão, ou seja, os ensaios fornecem 1158,72, 1307,48 e 1532,73 N/mm, por outro lado a simulação indica 1180,52, 1319,917 e 1631,623 N/mm, com diferenças de 1,88%, 0,95% e 6,45%. Em ambos os materiais, os coeficientes de variação experimentais mantêm-se baixos (2-8% no PA s/FC e 2-5% no PA c/FC), o que dá solidez às médias usadas na comparação.

Em síntese, as componentes práticas e numéricas coincidem quer na tendência (rigidez crescente com o L_o), quer no nível absoluto dos valores. O modelo capta ainda, com precisão, a influência do material, ou seja, o PA c/FC é sistematicamente mais rígido do que o PA s/FC (aumento de aproximadamente 60% para todos os L_o), em linha com o maior módulo dos aderentes reforçados e a consequente redução das rotações e das componentes de arrancamento nas extremidades da junta.

Com base nos valores da Tabela 42, construiu-se um gráfico para visualização dos valores experimentais (Figura 64) para cada combinação material- L_o . O objetivo foi evidenciar valores atípicos e avaliar a consistência das medições face às previsões numéricas. O gráfico permite

identificar rapidamente eventuais discrepâncias e suportar a validação do modelo, de modo a complementar a leitura da tabela.

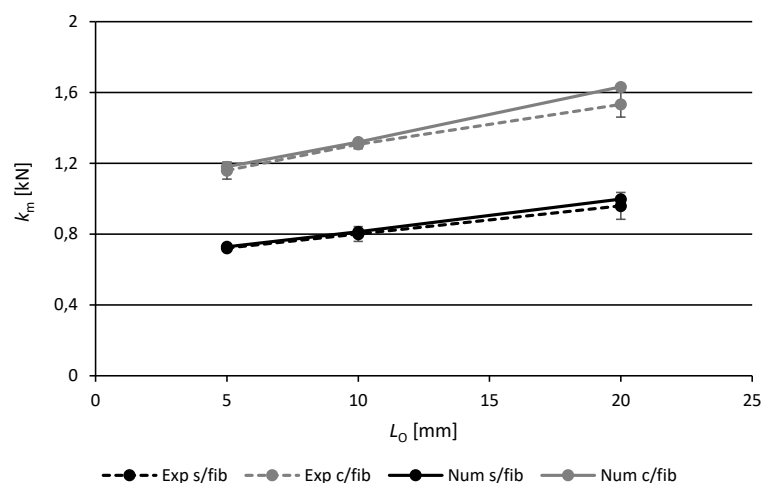


Figura 64 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples

A Tabela 43 (em N/mm), apresenta a comparação entre resultados experimentais e numéricos das juntas em degrau para três $L_o=5, 10$ e 20 mm e para os dois materiais de aderentes (PA s/FC e PA c/FC). Incluem-se médias, desvios-padrão e coeficientes de variação nos ensaios, bem como as previsões numéricas do Abaqus® e a respectiva diferença relativa, permitindo avaliar o efeito do L_o e do material.

Tabela 43 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Média (prático)	1044,83	1027,97	1063,04	1900,46	1904,37	1928,22
Desvio Pad	57,08	33,40	61,91	67,17	30,59	26,49
CoV	5,46	3,25	5,82	3,53	1,61	1,37
Numérico	1082,79	1081,21	1078,04	1943,06	1940,35	1934,80
Dif. relativa	3,63	5,18	1,41	2,24	1,89	0,34

A análise da Tabela 43 mostra que, em PA s/FC, a rigidez prática mantém-se praticamente constante para $L_o=5, 10$ e 20 mm, com valores de 1044,83, 1027,97 e 1063,04 N/mm respectivamente, tal como a previsão numérica, com valores 1082,79, 1081,21 e 1078,04 N/mm pela mesma ordem. As diferenças relativas aos modelos práticos e numéricos são reduzidas, cerca de 3,63%, 5,18% e 1,41% para $L_o=5, 10$ e 20 mm, respectivamente. Em PA c/FC repete-se a mesma tendência: 1900,46, 1904,37 e 1928,22 N/mm em ensaio e 1943,06, 1940,35 e 1934,80 N/mm no modelo numérico, com desvios de 2,24%, 1,89% e 0,34% (L_o crescentes entre 5 e 20 mm). Conclui-se que, no intervalo de L_o estudado, a rigidez das juntas em degrau depende sobretudo do módulo dos aderentes. O aumento do L_o tem efeito pouco expressivo. A dispersão é moderada no PA s/FC, com CoV entre 3,25% e 5,82%, e baixa no PA c/FC, com CoV entre 1,37% e 3,53%, o que confere solidez às médias utilizadas.

Quanto à influência do material, o PA c/FC revela-se sistematicamente mais rígido do que o PA s/FC. Em termos experimentais, o benefício ronda os 85% para todos os L_o . O modelo reproduz fielmente esta diferença, com vantagens próximas de 79% para todos os L_o . Em síntese, o modelo capta a tendência de L_o e o efeito do material com muito boa precisão.

A Figura 65 apresenta o gráfico para visualização dos valores experimentais das juntas em degrau para cada combinação material- L_o , o que permite identificar valores extremos e comparar a dispersão experimental com as previsões numéricas. Os resultados mostram uma consistência global satisfatória, com poucas divergências relevantes entre simulação e ensaio.

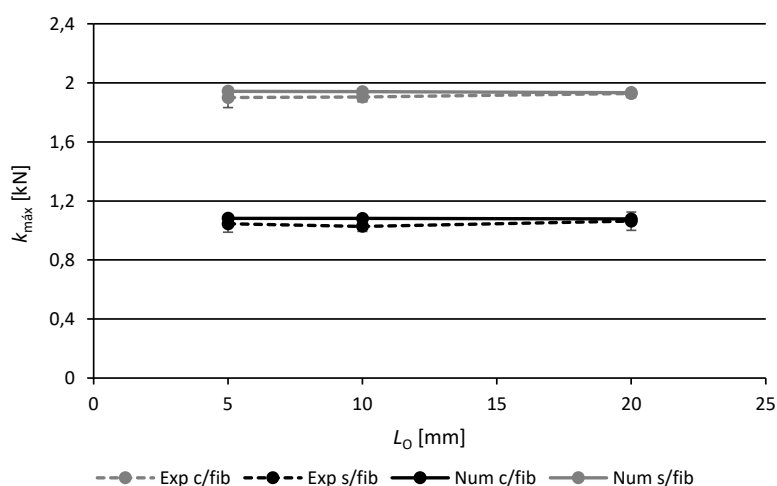


Figura 65 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau

A Tabela 44 apresenta os resultados experimentais e numéricos das juntas de chanfro interior (*scarf*), para $L_o=5, 10$ e 20 mm e para ambos os materiais de aderentes (PA s/FC e PA c/FC). Incluem-se médias, desvios-padrão e coeficientes de variação nos ensaios, bem como os valores previstos pelo modelo e a diferença relativa, o que permite avaliar a influência do L_o e validar a aproximação numérica.

Tabela 44 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Média (prático)	1790,40	996,96	1023,72	1944,40	1930,93	1975,19
Desvio Pad	43,38	28,51	24,79	2,56	56,29	81,36
CoV	2,42	2,86	2,42	0,13	2,92	4,12
Numérico	1836,57	1078,99	1079,18	1945,58	1930,91	1938,40
Dif. relativa	2,58	8,23	5,42	0,06	0,00	-1,86

A comparação prática-numérica da rigidez das juntas de chanfro interior mostra tendências muito claras. No caso do PA s/FC, a rigidez prática cai de 1790 N/mm para $L_o=5$ mm para 997 N/mm no provete com $L_o=10$ mm e estabiliza próximo de 1024 N/mm no provete com $L_o=20$ mm. O modelo acompanha esta evolução com 1837, 1079 e 1079 N/mm, respetivamente, e diferenças relativas de 2,6%, 8,2% e 5,4%. No PA c/FC, a rigidez mantém-se praticamente

constante ao longo do intervalo analisado, com valores experimentais de 1944, 1931 e 1975 N/mm e previsões de 1946, 1931 e 1938 N/mm, o que se traduz em desvios de 0,06%, 0,00% e -1,86%, pela mesma ordem. A dispersão experimental permanece baixa, o que sustenta a fiabilidade das médias. Em termos de material, o reforço com fibra evidencia-se decisivo para provetes com $L_o=10$ e 20 mm.

A Figura 66 mostra o gráfico para visualização dos valores experimentais das juntas de chanfro interior (*scarf*) para cada combinação material- L_o .

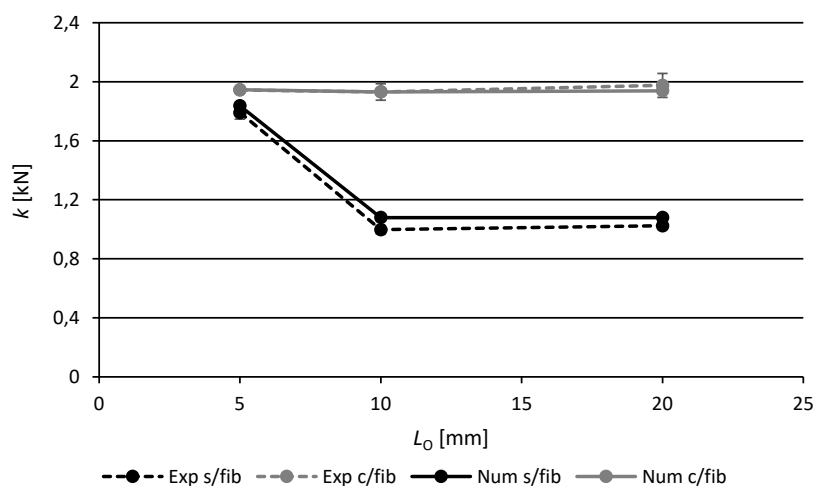


Figura 66 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior

3.6.4. Resistência das juntas

Esta secção compara a resistência experimental das juntas com as previsões numéricas para as três geometrias analisadas (sobreposição simples, degrau e chanfro interior) e para os dois materiais aderentes (PA s/FC e PA c/FC). Entende-se por resistência a força máxima obtida nas curvas $P-\delta$, isto é, a capacidade última do conjunto adesivo-aderentes imediatamente antes do início da rotura.

A Tabela 45 sintetiza os valores de resistência (em N), para as juntas de sobreposição simples para $L_o=5$, 10 e 20 mm e para ambos os materiais aderentes (PA s/FC e PA c/FC). Incluem-se valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação nos ensaios, bem como as previsões numéricas do Abaqus® e a diferença relativa, permitindo avaliar o efeito de L_o .

Tabela 45 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Média (prático)	1105,44	1265,09	1401,88	1197,59	1527,02	1776,37
Desvio Pad	36,06	30,26	48,97	44,64	31,00	69,22
CoV	3,26	2,39	3,49	3,73	2,03	3,90
Numérico	1157,36	1308,79	1443,94	1241,36	1561,97	1803,77
Dif. relativa	4,70	3,45	3,00	3,65	2,29	1,54

A leitura da Tabela 45 mostra que a resistência das juntas de sobreposição simples aumenta com o L_o e que o modelo numérico reproduz essa tendência com boa fidelidade.

No PA s/FC, a média experimental assume valores de 1105,44 para 1265,09 e 1401,88 N para $L_o=5, 10$ e 20 mm, o que representa um acréscimo total de 26,9% de $L_o=5$ para provetes com $L_o=20$ mm. As previsões numéricas são 1157,36, 1308,79 e 1443,94 N, respetivamente, com variações muito próximas, relativamente aos valores experimentais.

No PA c/FC, os ensaios assumem valores de 1197,59 para 1527,02 e 1776,37 N para $L_o=5, 10$ e 20 mm, enquanto o modelo indica 1241,36, 1561,97 e 1803,77 N, para os mesmos L_o . As diferenças relativas entre o comportamento numérico e prático permanecem contidas e tendem a diminuir com o L_o . Quanto ao impacto dos diferentes materiais, o PA c/FC demonstra sempre maior capacidade de carga do que o PA s/FC, com ganhos que aumentam com o L_o .

A Figura 67 mostra o gráfico para visualização dos valores experimentais das juntas de sobreposição simples, organizado por material e L_o .

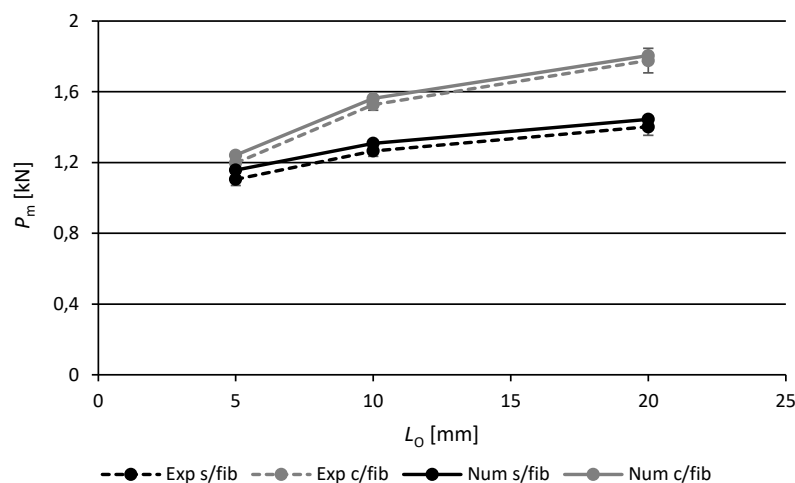


Figura 67 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples

A Tabela 46 sintetiza os resultados de resistência das juntas em degrau (em N), tendo em conta $L_o=5, 10$ e 20 mm e para ambos os materiais aderentes (PA s/FC e PA c/FC). Apresentam-se as médias experimentais com os respetivos desvios-padrão e coeficientes de variação, bem como as previsões do Abaqus®, incluindo a diferença relativamente aos valores medidos.

Tabela 46 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Média (prático)	1530,41	1507,43	1526,57	1489,52	1465,36	1514,35
Desvio Pad	59,41	46,49	42,67	54,18	47,77	27,20
CoV	3,88	3,08	2,80	3,64	3,26	1,80
Numérico	1536,70	1542,33	1550,21	1517,29	1522,77	1533,43
Dif. relativa	0,41	2,32	1,55	1,86	3,92	1,26

No PA s/FC, as médias experimentais mantêm-se próximas (1530,41, 1507,43 e 1526,57 N para $L_o=5$, 10 e 20 mm, respetivamente) e as previsões numéricas acompanham-nas com grande precisão (1536,70, 1542,33 e 1550,21 N, pela mesma ordem), o que se traduz em diferenças relativas muito baixas, cerca de 0,41%, 2,32% e 1,55%, respetivamente.

No PA c/FC repete-se o mesmo padrão, ou seja, 1489,52, 1465,36 e 1514,35 N para $L_o=5$, 10 e 20 mm em ensaio face a 1517,29; 1522,77; 1533,43 N, no mesmo intervalo de L_o no modelo, com desvios de 1,86%, 3,92% e 1,26%. Os coeficientes de variação situam-se entre 2% e 4%, o que confirma a boa repetibilidade dos ensaios.

Quanto ao material dos aderentes, o efeito é discreto. O PA s/FC apresenta forças máximas ligeiramente superiores às do PA c/FC para os três L_o , valores comparáveis à própria dispersão experimental. Em conjunto, estes resultados indicam que, nesta geometria, a força máxima é pouco sensível ao aumento de L_o dentro do intervalo estudado e que o reforço com fibra de carbono não altera de forma marcada a capacidade última das juntas.

A Figura 68 apresenta o gráfico para visualização dos valores experimentais das juntas em degrau por material e L_o .

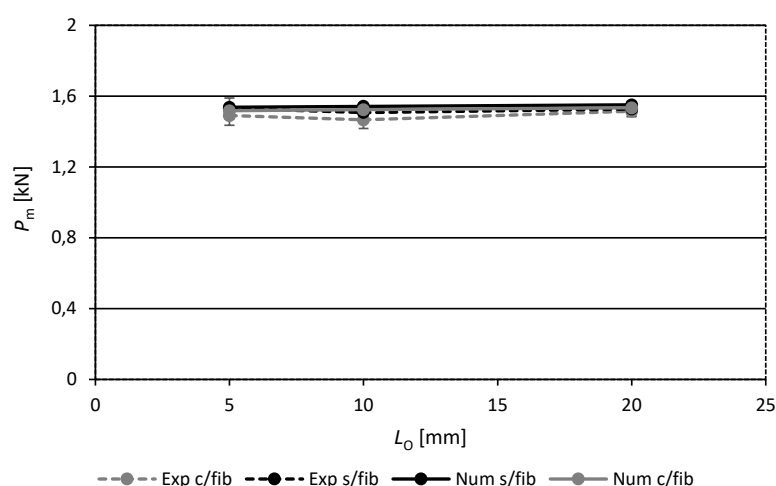


Figura 68 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau

A Tabela 47 sintetiza os resultados de resistência (em N) para as juntas de chanfro interior (*scarf*), tendo para $L_o=5$, 10 e 20 mm e para ambos os materiais aderentes (PA s/FC e PA c/FC).

Tabela 47 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Média (prático)	2674,28	2473,76	2952,70	1612,08	2711,17	3425,94
Desvio Pad	46,68	77,66	28,67	13,83	22,20	184,76
CoV	1,75	3,14	0,97	0,86	0,82	5,39
Numérico	2748,39	2523,08	2963,47	1623,89	2709,15	3446,25
Dif. relativa	2,77	1,99	0,36	0,73	-0,07	0,59

A análise da Tabela 47 mostra que, nas juntas de chanfro interior, a resistência evolui de forma distinta com o L_o consoante o material dos aderentes e que o modelo numérico acompanha bem a referida evolução.

No PA s/FC a força máxima regista variações reduzidas com L_o . Existe um decréscimo de cerca de 7,5% do $L_o=5$ para 10 mm e uma recuperação quando o $L_o=20$ mm que representa um aumento de 19% face ao provete com $L_o=10$ mm.

No PA c/FC o L_o exerce um efeito marcado, ou seja, a resistência aumenta cerca de 68% de $L_o=5$ mm para $L_o=10$ mm e volta a aumentar 26% de $L_o=10$ para $L_o=20$ mm, o que corresponde a um aumento total de 113% entre $L_o=5$ e 20mm.

Quando comparados os materiais dos aderentes, verifica-se uma inversão clara, ou seja, com $L_o=5$ mm o PA s/FC supera o PA c/FC em cerca de 66% nos ensaios, enquanto $L_o=10$ e 20 mm o PA c/FC passa a apresentar forças máximas superiores, diferença essa que o cálculo também antecipa.

Em síntese, L_o curtos beneficiam de aderentes mais flexíveis (PA s/FC), enquanto L_o longos tiram partido do maior módulo do PA c/FC. O modelo numérico replica estas tendências e os níveis absolutos de resistência, o que sustenta a sua utilização no dimensionamento deste tipo de junta.

A Figura 69 apresenta o gráfico para visualização dos valores experimentais das juntas de chanfro interior por material e L_o .

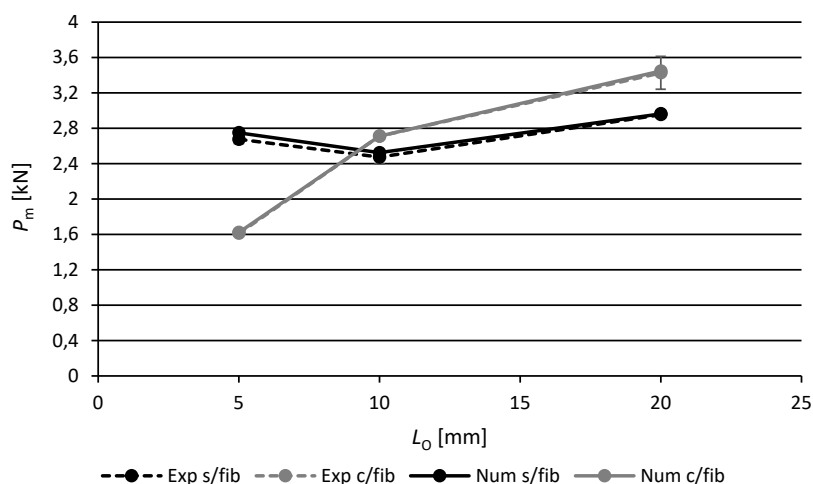


Figura 69 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior

3.6.5. Energias de rotura

Esta secção compara a energia de rotura das juntas obtida em ensaio com as previsões numéricas para as três geometrias estudadas (sobreposição simples, degrau e chanfro interior) e para os dois materiais aderentes (PA s/FC e PA c/FC). A Tabela 48 sintetiza, para as juntas de sobreposição simples, os principais resultados de energia de rotura (em J) obtidos experimentalmente e previstos numericamente para $L_o=5$, 10 e 20 mm e para ambos os materiais aderentes (PA s/FC e PA c/FC).

Tabela 48 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples

	PA s/FC			PA c/FC		
L_o	5	10	20	5	10	20
Média (prático)	0,89	1,14	1,21	0,70	1,17	1,49
Desvio Pad	0,13	0,07	0,21	0,05	0,06	0,11
CoV	14,35	6,17	17,39	7,29	4,77	7,57
Numérico	0,97	1,17	1,24	0,68	1,14	1,48
Dif. relativa	8,65	2,26	2,79	-2,77	-1,90	-0,61

A análise da Tabela 48 evidencia boa concordância entre os valores experimentais e os previstos numericamente para a energia de rotura das juntas de sobreposição simples. Em função do L_o , a energia aumenta em ambos os materiais.

No PA s/FC a energia regista valores de 0,89, 1,14 e 1,21 J para $L_o=5$, 10 e 20 mm, respetivamente, enquanto o modelo fornece 0,97, 1,17 e 1,24 J, pela mesma ordem. Para este intervalo os desvios relativos mantêm-se contidos (8,65%, 2,26% e 2,79%).

No PA c/FC o aumento é ainda mais pronunciado, com médias de 0,70, 1,17 e 1,49 J em ensaio e 0,68, 1,14 e 1,48 J em cálculo, para $L_o=5$, 10 e 20 mm. A diferença relativa é moderada, com o modelo numérico a revelar um comportamento conservador face aos valores experimentais. As discrepâncias registam-se em -2,77, -1,90 e -0,61 % para $L_o=5$, 10 e 20 mm.

Quanto ao impacto dos diferentes materiais dos aderentes, o PA s/FC apresenta energia superior para o $L_o=5$ mm, o que se explica pela maior deformabilidade dos aderentes sem reforço, que favorece deslocamentos mais elevados e, por conseguinte, maior área sob a curva $P-\delta$. No que toca ao $L_o=10$ mm as energias aproximam-se. Para $L_o=20$ mm o PA c/FC possui uma energia de rotura mais elevada.

A Figura 70 apresenta o gráfico para visualização dos valores experimentais das juntas de sobreposição simples por material e L_o .

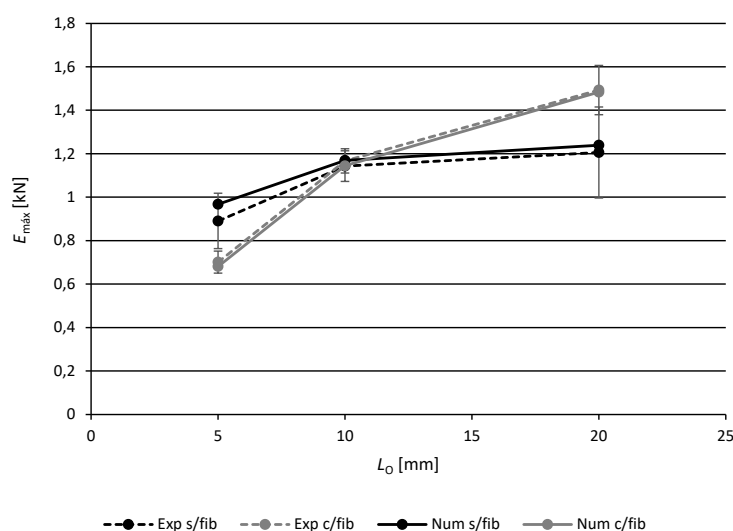


Figura 70 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de sobreposição simples

A Tabela 49 sintetiza, para as juntas em degrau, os principais resultados de energia de rotura (em J) obtidos experimentalmente e previstos numericamente para $L_o=5, 10$ e 20 mm e PA s/FC e PA c/FC.

Tabela 49 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Média (prático)	1,06	1,06	1,09	0,58	0,55	0,58
Desvio Pad	0,05	0,05	0,15	0,08	0,07	0,06
CoV	4,27	4,91	13,35	13,45	12,84	9,99
Numérico	1,06	1,07	1,09	0,56	0,56	0,57
Dif. relativa	0,38	1,10	-0,54	-3,36	3,14	-0,39

A Tabela 49 evidencia que, nas juntas em degrau, a energia de rotura praticamente não varia com o L_o .

No PA s/FC, as médias experimentais situam-se em 1,06; 1,06 e 1,09 J para $L_o=5, 10$ e 20 mm, respetivamente, e o modelo prevê 1,06; 1,07 e 1,09 J, para os mesmos L_o , com diferenças relativas muito reduzidas (0,38%, 1,10% e -0,54%).

No PA c/FC, os valores experimentais mantêm-se entre 0,55 e 0,58 J para $L_o=5, 10$ e 20 mm e as previsões entre 0,56 e 0,57 J, para os mesmos L_o , também com desvios residuais (-3,36%, 3,14% e -0,39%).

A comparação entre materiais mostra um nível de energia sistematicamente superior no PA s/FC, resultado coerente com a maior deformabilidade dos aderentes sem reforço, que permite deslocamentos mais elevados.

Em termos de repetibilidade, os desvios-padrão são modestos (0,05-0,15 J no PA s/FC e 0,06-0,08 J no PA c/FC). Os coeficientes de variação confirmam uma dispersão globalmente baixa.

A Figura 71 apresenta o gráfico para visualização dos valores experimentais das juntas em degrau por material e L_o .

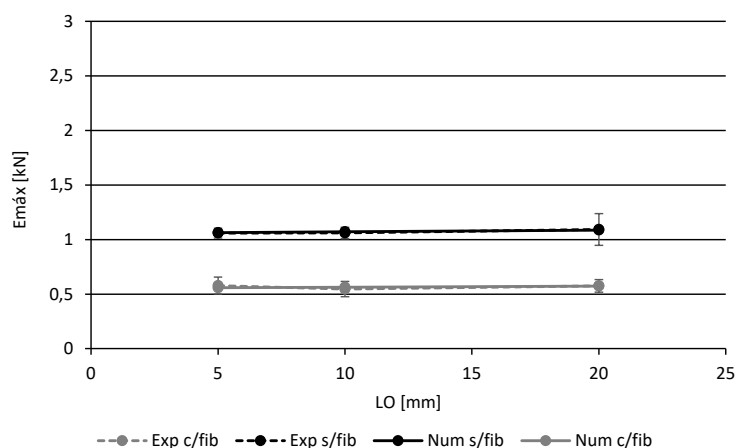


Figura 71 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas em degrau

A Tabela 50 sintetiza, para as juntas de chanfro interior (*scarf*), os resultados da energia de rotura (em J) obtidos em ensaio e previstos numericamente para $L_o=5$, 10 e 20 mm e para ambos os materiais aderentes (PA s/FC e PA c/FC).

Tabela 50 - Comparação de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior

L_o	PA s/FC			PA c/FC		
	5	10	20	5	10	20
Média (prático)	2,17	3,56	8,28	0,66	2,28	4,55
Desvio Pad	0,06	0,14	1,62	0,03	0,13	0,19
CoV	2,75	3,98	19,53	4,99	5,80	4,14
Numérico	2,01	2,94	8,58	0,64	1,89	3,56
Dif. relativa	-7,65	-17,26	3,65	-3,50	-17,19	-21,83

A Tabela 50 mostra que a energia de rotura aumenta com o L_o em ambos os materiais.

No PA s/FC a média experimental varia de 2,17 J ($L_o=5$ mm) para 3,56 J ($L_o=10$ mm) e 8,28 J ($L_o=20$ mm). O modelo numérico acompanha esta tendência, ou seja 2,01, 2,94 e 8,58 J, pela mesma ordem.

O PA c/FC aumenta a energia de rotura de 0,66 para 2,28 e 4,55 J, para $L_o=5$, 10 e 20 mm. O modelo numérico acompanha esta tendência e regista valores de 0,64, 1,89 e 3,56 J pela mesma ordem. As diferenças relativas mantêm-se reduzidas para $L_o=5$ mm (-7,65% no PA s/FC e -3,50% no PA c/FC), sendo que aumentam a diferença para juntas com $L_o=10$ mm (cerca de -17% em ambos) e, para juntas com $L_o=20$ mm, aproximam-se no PA s/FC (+3,65%) mas ficam aquém no PA c/FC (-21,83%).

A comparação entre materiais mostra que o PA s/FC apresenta energias sistematicamente superiores para todos os valores de L_o . No que respeita à repetibilidade, a dispersão mantém-se reduzida para $L_o=5$ e 10 mm, com coeficientes de variação de 2,75% e 3,98%, respetivamente, mas aumenta de forma significativa para 19,53% em $L_o=20$ mm. Já no PA c/FC, os coeficientes de variação oscilam entre 4,14% e 5,80%, para todos os L_o , valores que refletem um comportamento mais estável e controlado dos aderentes reforçados.

A Figura 72 apresenta o gráfico para visualização dos valores experimentais das juntas de chanfro interior por material e L_o .

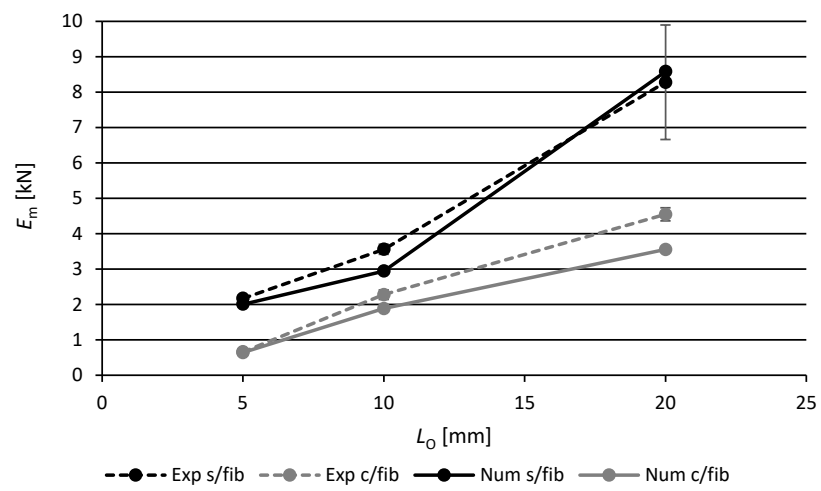


Figura 72 - Gráfico de valores experimentais e numéricos de juntas de chanfro interior

4. Conclusão

A presente dissertação teve como propósito a análise experimental e numérica do comportamento de juntas adesivas aplicadas a materiais compósitos fabricados por impressão 3D. O estudo abrangeu dois tipos de aderentes, PA s/FC e PA c/FC, e permitiu obter uma visão abrangente sobre a influência do material, da geometria e do modelo de previsão numérica no desempenho destas uniões. Nesta fase final, apresentam-se as principais conclusões retiradas da investigação realizada, bem como as limitações identificadas e as perspectivas de desenvolvimento futuro.

4.1. Conclusões finais

Os resultados evidenciaram que o fabrico aditivo de compósitos oferece vantagens relevantes como versatilidade geométrica, otimização de materiais e redução de custos, contudo apresenta limitações no fabrico de peças de grandes dimensões e na obtenção de propriedades mecânicas uniformes. Neste contexto, o recurso a juntas adesivas revelou-se uma solução eficaz para colmatar essas limitações e permitiu a união de componentes estruturais sem comprometer a integridade global das peças.

As propriedades mecânicas dos aderentes assumiram um papel determinante no desempenho das juntas. Os provetes fabricados PA s/FC demonstraram maior ductilidade e capacidade de dissipação de energia, o que originou um comportamento mais tenaz. Por outro lado, os provetes PA c/FC apresentaram maior rigidez e resistência, mas a sua fratura ocorreu de forma mais abrupta e frágil, evidenciando a redução da deformabilidade proporcionada pelo reforço.

A geometria das juntas exerceu também uma influência significativa no desempenho estrutural. As juntas de sobreposição simples revelaram um comportamento consistente, mas a sua resistência ficou limitada pela presença de tensões de arrancamento. As juntas em degrau mostraram uma melhoria na distribuição das tensões e um aumento da resistência relativamente às juntas de sobreposição, embora a sua produção seja mais exigente. Já as juntas de chanfro interior evidenciaram o melhor desempenho, uma vez que apresentaram uma maior energia de rotura e valores superiores de resistência, sobretudo para comprimentos de chanfro mais elevados, o que faz com que estas se posicionem como a solução mais promissora entre as três tipologias analisadas.

Do ponto de vista numérico, o modelo desenvolvido com recurso ao MEF, apoiado num modelo de dano coesivo com lei triangular, reproduziu com boa precisão os resultados experimentais. As simulações permitiram acompanhar ao detalhe as curvas $P-\delta$, os modos de rotura e os

valores de resistência observados em laboratório, o que realçou o modelo como ferramenta de previsão do comportamento mecânico destas uniões adesivas.

Em síntese, o trabalho desenvolvido demonstrou a aplicabilidade das juntas adesivas como solução viável e eficiente para a união de materiais compósitos fabricados por impressão 3D. Os resultados reforçaram a importância de integrar abordagens experimentais e numéricas, não apenas para compreender de forma mais aprofundada o comportamento mecânico destas ligações, mas também para apoiar a otimização e o desenvolvimento de soluções de engenharia com maior potencial de aplicação industrial.

4.2. Limitações e trabalhos futuros

Apesar dos resultados alcançados, a investigação desenvolvida apresenta um conjunto de limitações que importa destacar, estas limitações suscitam algumas possibilidades para trabalhos futuros.

No que concerne aos materiais, o estudo concentrou-se exclusivamente em PA s/FC e PA c/FC. Esta escolha permitiu avaliar dois cenários contrastantes um material mais dúctil e outro mais rígido e resistente, no entanto limita a generalização das conclusões a outros polímeros e reforços utilizados no fabrico aditivo.

Relativamente ao processo de fabrico, a impressão de PA s/FC e PA c/FC revelou-se particularmente exigente, devido à elevada contração térmica e à tendência para empeno durante o arrefecimento o que afetou consistência dimensional dos provetes. Esta tendência poderá ser evitada com, por exemplo, a otimização de alguns parâmetros de impressão como a temperatura de extrusão.

No que diz respeito aos adesivos, a investigação baseou-se na aplicação de um único adesivo estrutural, Araldite 2015. Embora esta opção tenha permitido simplificar a análise e centrar o estudo no efeito dos materiais dos aderentes e da geometria das juntas, limitou a avaliação do impacto do tipo de adesivo nos diferentes tipos de juntas.

As condições de carregamento representaram outra limitação do trabalho. Todos os ensaios experimentais foram realizados sob tração monotónica até à rotura, o que permitiu caracterizar a resistência estática das juntas, mas não reflete plenamente as solicitações reais em ambiente industrial. A introdução de ensaios adicionais, como testes sob carregamento cíclico ou de fadiga seria relevante para as aplicações.

Por fim, no campo da modelação numérica, o modelo coesivo implementado com recurso ao MEF apresentou resultados consistentes e boa correlação com os ensaios experimentais. Ainda assim, a adoção de metodologias mais avançadas, como o XFEM ou técnicas sem malha, poderia aumentar a capacidade de previsão do modelo, e reduzir limitações associadas à discretização.

Os trabalhos futuros devem explorar a utilização de diferentes materiais aderentes e adesivos e realizar ensaios em condições cada vez mais próximas àquela que existem na realidade. Deste modo, caminhar-se-á para a consolidação da aplicação industrial de juntas adesivas em compósitos fabricados por impressão 3D.

Referências

1. Gibson, I., D.W. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani, D. Rosen, B. Stucker, e M. Khorasani, *Additive manufacturing technologies*. Vol. 17. 2021: Springer.
2. ISO, A., *ISO/ASTM 52900: 2015 additive manufacturing—general principles—terminology*. ASTM F2792-10e1, 2015. **1**: p. 1-19.
3. Horn, T.J. e O.L. Harrysson, *Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications*. Science progress, 2012. **95**(3): p. 255-282.
4. Pereira, T., J.V. Kennedy, e J. Potgieter, *A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job*. Procedia Manufacturing, 2019. **30**: p. 11-18.
5. Attaran, M., *The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. Business Horizons, 2017. **60**(5): p. 677-688.
6. Ngo, T.D., A. Kashani, G. Imbalzano, K.T. Nguyen, e D. Hui, *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composites Part B: Engineering, 2018. **143**: p. 172-196.
7. Tay, Y.W.D., B. Panda, S.C. Paul, N.A. Noor Mohamed, M.J. Tan, e K.F. Leong, *3D printing trends in building and construction industry: a review*. Virtual and Physical Prototyping, 2017. **12**(3): p. 261-276.
8. Ng, W.L., J.M. Lee, M. Zhou, Y.-W. Chen, K.-X.A. Lee, W.Y. Yeong, e Y.-F. Shen, *Vat polymerization-based bioprinting—process, materials, applications and regulatory challenges*. Biofabrication, 2020. **12**(2): p. 022001.
9. Godoi, F.C., S. Prakash, e B.R. Bhandari, *3d printing technologies applied for food design: Status and prospects*. Journal of Food Engineering, 2016. **179**: p. 44-54.
10. Gülcan, O., K. Günaydın, e A. Tamer, *The state of the art of material jetting—a critical review*. Polymers, 2021. **13**(16): p. 2829.
11. Blok, L.G., M.L. Longana, H. Yu, e B.K.S. Woods, *An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites*. Additive Manufacturing, 2018. **22**: p. 176-186.
12. Kaur, G., R.M. Singari, e H. Kumar, *A review of fused filament fabrication (FFF): Process parameters and their impact on the tribological behavior of polymers (ABS)*. Materials Today: Proceedings, 2022. **51**: p. 854-860.
13. Sachs, E.M., J.S. Haggerty, M.J. Cima, e P.A. Williams, *Three-dimensional printing techniques*. 2011.
14. Nematollahi, B., M. Xia, e J. Sanjayan. *Current progress of 3D concrete printing technologies*. in *ISARC. Proceedings of the international symposium on automation and robotics in construction*. 2017. IAARC Publications.
15. Chen, A.-N., J.-M. Wu, K. Liu, J.-Y. Chen, H. Xiao, P. Chen, C.-H. Li, e Y.-S. Shi, *High-performance ceramic parts with complex shape prepared by selective laser sintering: a review*. Advances in Applied Ceramics, 2018. **117**(2): p. 100-117.
16. Beal, V., C. Ahrens, e P. Wendhausen, *The use of stereolithography rapid tools in the manufacturing of metal powder injection molding parts*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2004. **26**: p. 40-46.
17. Gembird. [citado em 2023 19 de Novembro]; Disponível em: <https://gembird.com/item.aspx?id=11353>.
18. Expo, M. [citado em 2023 19 de Novembro]; Disponível em: <https://www.medicalexpo.com/pt/prod/sprinray/product-114271-1013793.html>.

Referências

19. Swartz, R. [citado em 2023 19 de Novembro]; Disponível em: <https://www.engineering.com/story/impossible-objects-brings-impossible-speed-and-flexibility-to-carbon-fiber-3d-printing>.
20. objects, I. [citado em 2023 19 de Novembro]; Disponível em: <https://www.impossible-objects.com/>.
21. Swartz, R., Marshman, *Methods and apparatus for 3D fabrication*. 2013.
22. Yasa, E. e K. Ersoy, *Additive manufacturing of polymer matrix composites*. Aircr. Technol, 2018. **7**: p. 147-169.
23. Award, J.d. Atropos. 2023 [citado em 2023 5 de Novembro]; Disponível em: <https://www.jamesdysonaward.org/en-US/2017/project/atropos/>.
24. Milano, P. *Dipartimento di Meccanica*. Additive manufacturing 2023 [citado; Disponível em: <https://www.mecc.polimi.it/ricerca/laboratori-dipartimentali/additive-manufacturing>.
25. Dickson, A.N., H.M. Abourayana, e D.P. Dowling, *3D printing of fibre-reinforced thermoplastic composites using fused filament fabrication—A review*. Polymers, 2020. **12**(10): p. 2188.
26. Tyler, K., *Method and apparatus for continuous composite three-dimensional printing*. 2016, Google Patents.
27. Banea, M.D. e L.F.M. da Silva, *Adhesively bonded joints in composite materials: An overview*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2009. **223**(1): p. 1-18.
28. Pizzi, A. e K.L. Mittal, *Handbook of adhesive technology*. 2017: CRC press.
29. Marques, E.A.S., A.S.Q.F. Barbosa, R.J.C. Carbas, A. Akhavan-Safar, e L.F.M. da Silva, *Introduction to adhesive bonding*. 2021: John Wiley & Sons.
30. Dillard, D.A., *Advances in structural adhesive bonding*. 2010: Elsevier.
31. Turner, M., *Adhesives: a selection guide*. Medical device technology, 1999. **10**(8): p. 29-33.
32. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
33. De Moura, M., J. Gonçalves, J. Chousal, e R. Campilho, *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 419-426.
34. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindústria Portugal.
35. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2nd Edition ed. 2007, New York: McGraw-Hill Education.
36. Saini, D.S., D. Karmakar, e S. Ray-Chaudhuri, *A review of stress concentration factors in tubular and non-tubular joints for design of offshore installations*. Journal of Ocean Engineering and Science, 2016. **1**(3): p. 186-202.
37. Da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012: John Wiley & Sons.
38. Fernandes, P.H., G.C. Silva, D.B. Pitz, M. Schnelle, K. Koschek, C. Nagel, e V.C. Beber *Data-Driven, Physics-Based, or Both: Fatigue Prediction of Structural Adhesive Joints by Artificial Intelligence*. Applied Mechanics, 2023. **4**, 334-355 DOI: 10.3390/applmech4010019.
39. Gollins, K., N. Elvin, e F. Delale, *Characterization of adhesive joints under high-speed normal impact: Part II – Numerical studies*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **98**: p. 102530.

40. Pizzorni, M., E. Lertora, e A. Parmiggiani, *Adhesive bonding of 3D-printed short- and continuous-carbon-fiber composites: An experimental analysis of design methods to improve joint strength*. Composites Part B: Engineering, 2022. **230**: p. 109539.
41. Pereira, J., R. Campilho, P. Nóvoa, F.J. Silva, e D. Gonçalves, *Adherend effect on the peel strength of a brittle adhesive*. Procedia Structural Integrity, 2022. **37**: p. 722-729.
42. Kaiser, I. e K. Tan, *Damage and strength analysis of Carbon Fiber Reinforced Polymer and Titanium tubular-lap joint using hybrid adhesive design*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **103**: p. 102710.
43. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonguerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
44. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
45. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
46. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
47. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
48. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
49. Ramalho, L.D.C., R.D.S.G. Campilho, J. Belinha, e L.F.M. da Silva, *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **96**: p. 102451.
50. Quispe Rodríguez, R., W.P. de Paiva, P. Sollero, M.R. Bertoni Rodrigues, e É.L. de Albuquerque, *Failure criteria for adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 26-36.
51. da Silva, L.F.M., P.J.C. das Neves, R.D. Adams, A. Wang, e J.K. Spelt, *Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(3): p. 331-341.
52. Goland, M. e E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. 1944.
53. Hart-Smith, L., *Stress analysis- A continuum mechanics approach(in adhesive bonded joints)*. Developments in adhesives- 2.(A 82-28576 13-39) London, Applied Science Publishers, 1981, 1981: p. 1-44.
54. Bigwood, D. e A.D. Crocombe, *Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints*. International journal of Adhesion and Adhesives, 1989. **9**(4): p. 229-242.
55. Frostig, Y., O.T. Thomsen, e F. Mortensen, *Analysis of adhesive-bonded joints, square-end, and spew-fillet—high-order theory approach*. Journal of Engineering Mechanics, 1999. **125**(11): p. 1298-1307.
56. Adams, R. e V. Mallick, *A method for the stress analysis of lap joints*. The Journal of Adhesion, 1992. **38**(3-4): p. 199-217.
57. Wang, R., J. Cui, A. Sinclair, e J. Spelt, *Strength of adhesive joints with adherend yielding: I. analytical model*. The Journal of Adhesion, 2003. **79**(1): p. 23-48.
58. Campilho, R.D., *Strength prediction of adhesively-bonded joints*. 2017: CRC Press.
59. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
60. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.

Referências

61. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
62. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
63. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
64. Barros, R.B., R.D. Campilho, I.J. Sánchez-Arce, J.M. Dionísio, e K. Madani, *Evaluation of the cracked lap shear test for mixed-mode fracture toughness estimation of adhesive joints*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2023. **237**(12): p. 2537-2550.
65. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
66. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
67. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
68. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
69. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18–19): p. 2445-2458.
70. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
71. Carvalho, U.T.F. e R.D.S.G. Campilho, *Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**(Supplement C): p. 41-50.
72. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
73. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
74. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1–4): p. 547-555.
75. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
76. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
77. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
78. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.

79. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
80. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
81. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
82. Chen, Z., R.D. Adams, e L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
83. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
84. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
85. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
86. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
87. Patel, V.G. e N.V. Rachchh, *Meshless method – Review on recent developments*. Materials Today: Proceedings, 2020. **26**: p. 1598-1603.
88. De Sousa, C., R. Campilho, E. Marques, M. Costa, e L.F. da Silva, *Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2017. **231**(1-2): p. 210-223.
89. Fernandes, R. e R. Campilho, *Accuracy of cohesive laws with different shape for the shear behaviour prediction of bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(4): p. 325-347.
90. Machado, R., R. Campilho, e R. Rocha, *Numerical modelling and experimental validation of step bonded joints*. Procedia Structural Integrity, 2020. **25**: p. 71-78.
91. Resende, R., B. Resende, I. Sanchez Arce, L. Ramalho, R. Campilho, e J. Belinha, *Elasto-plastic adhesive joint design approach by a radial point interpolation meshless method*. The Journal of Adhesion, 2022. **98**(15): p. 2396-2422.
92. Pérez, M., G. Medina-Sánchez, A. García-Collado, M. Gupta, e D. Carou, *Surface quality enhancement of fused deposition modeling (FDM) printed samples based on the selection of critical printing parameters*. Materials, 2018. **11**(8): p. 1382.
93. Lokesh, N., B. Praveena, J.S. Reddy, V.K. Vasu, e 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, 2022. **52**: p. 1288-1293.
94. FormFutura, *Styx PA6*. FormFutura.
95. FormFutura, *STYX PA6-CF15*. FormFutura.
96. Huntsman. *Araldite 2015*. [citado em 2024; Disponível em: <https://www.huntsman.com/products/araldite2000/araldite-2015-1>].
97. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, e L.F.M. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
98. ASTM, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. 2022.

Referências

99. Anekar, N., S. Shaikh, P. Kanase, A. Patil, e S. Tarate, *Single Lap Adhesive Joint (SLAJ): A Study*. International Journal of Current Engineering and Technology, 2017.
100. Akkasali, N.K., S. Biswas, S. Sen, e S. Anitha, *A state-of-the-art review on adhesively bonded joints of similar and dissimilar materials*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2024. **38**(24): p. 4317-4371.
101. Ajdani, A., A. Akhavan-Safar, S. Jalali, L. da Silva, e M. Ayatollahi, *Fracture energy and cohesive law analysis of adhesives using a recently developed SCB joint: the influence of joint geometry and mode mixity*. International Journal of Solids and Structures, 2024. **286**: p. 112581.
102. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
103. Alfano, G. e M. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International journal for numerical methods in engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
104. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
105. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
106. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
107. Pinto, A.M.G., A. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M. De Moura, e A. Baptista, *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
108. Rocha, R. e R. Campilho, *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(7): p. 562-582.
109. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
110. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
111. Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, e J. Ju Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
112. Zhu, Y., K.M. Liechti, e K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
113. Pandya, K. e J. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
114. Constante, C., R. Campilho, e D. Moura, *Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques*. Engineering Fracture Mechanics, 2015. **136**: p. 292-304.
115. Campilho, R., D. Moura, M. Banea, e L. Da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.

116. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. 1968.
117. Stigh, U., S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e K. Salomonsson, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**: p. 149-162.
118. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.

Referências

Declaração de Integridade

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

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

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

NOME: João André Carvalho Vilarés

ISEP, Porto, 10 de setembro de 2025

Declaração de Integridade

Apêndice A - Dimensões provetes

Tabela A. 1 - L_o obtidos experimentalmente para provetes de sobreposição simples

Material	Aderente	L (teórico)	Provete	L (medido)		Média L	Área
PA sem fibra	2015	5	1	5,58	5,6	5,59	83,85
			2	5,96	5,95	5,96	89,33
			3	6,51	6,52	6,52	97,73
			4	5,6	5,62	5,61	84,15
		10	1	13,91	13,92	13,92	208,73
			2	13,06	13,02	13,04	195,60
			3	10,94	10,95	10,95	164,18
			4	11,07	11,1	11,09	166,28
		20	1	19,65	19,62	19,64	294,53
			2	20,19	20,18	20,19	302,78
			3	19,25	19,25	19,25	288,75
			4	19,67	19,66	19,67	294,98
PA com fibra	2015	5	1	6,66	6,65	6,66	99,83
			2	8,22	8,21	8,22	123,23
			3	7,28	7,30	7,29	109,35
			4	7,05	7,02	7,04	105,53
		10	1	12,41	12,38	12,40	185,93
			2	10,13	10,15	10,14	152,10
			3	13,73	13,73	13,73	205,95
			4	9,43	9,45	9,44	141,60
		20	1	17,72	17,73	17,73	265,88
			2	19,38	19,38	19,38	290,70
			3	20,15	20,13	20,14	302,10
			4	21,05	21,08	21,07	315,98

Tabela A. 2 - L_o obtidos experimentalmente para provetes em degrau

Material	Aderente	L (teórico)	Provete	L (medido)		Média	Área
PA sem fibra	2015	5	1	5,20	5,40	5,30	151,50
			2	5,33	5,52	5,43	153,38
			3	5,47	5,55	5,51	154,65
			4	5,62	5,63	5,63	156,38
		10	1	11,05	11,02	11,04	237,53
			2	10,50	10,52	10,51	229,65
			3	10,83	10,81	10,82	234,30
			4	10,43	10,40	10,42	228,23
		20	1	19,55	19,52	19,54	365,03
			2	20,33	2,35	11,34	242,10
			3	21,03	21,00	21,02	387,23
			4	20,21	20,20	20,21	375,08
PA com fibra	2015	5	1	5,10	5,12	5,11	148,65
			2	5,65	5,62	5,64	156,53
			3	5,41	5,40	5,41	153,08
			4	5,05	5,08	5,07	147,98
		10	1	10,20	10,23	10,22	225,23
			2	10,13	10,15	10,14	224,10
			3	12,20	12,21	12,21	255,08
			4	10,32	10,29	10,31	226,58
		20	1	20,12	20,13	20,13	373,88
			2	20,08	20,05	20,07	372,98
			3	20,12	20,10	20,11	373,65
			4	21,02	21,03	21,03	387,38

Tabela A. 3 - Lo obtidos experimentalmente para provetes de chanfro interior

Material	Aderente	L (teórico)	Provete	L (prático)		Média	Área
PA sem fibra	2015	5	1	5,3	5,5	5,40	81,00
			2	5,25	5,35	5,30	79,50
			3	5,86	5,85	5,86	87,83
			4	5,2	5,25	5,23	78,38
		10	1	10,23	10,25	10,24	153,60
			2	10,26	10,22	10,24	153,60
			3	10,52	10,55	10,54	158,03
			4	10,35	10,32	10,34	155,03
		20	1	20,36	20,35	20,36	305,33
			2	20,13	20,15	20,14	302,10
			3	20,63	20,6	20,62	309,23
			4	20,13	20,13	20,13	301,95
PA com fibra	2015	5	1	5,55	5,53	5,54	83,10
			2	5,32	5,3	5,31	79,65
			3	5,55	5,53	5,54	83,10
			4	5,1	5,13	5,12	76,73
		10	1	10,23	10,23	10,23	153,45
			2	10,12	10,1	10,11	151,65
			3	10,36	10,32	10,34	155,10
		20	1	20,23	20,25	20,24	303,60
			2	20,35	20,34	20,35	305,18

Tabela A. 4 - Dimensões dos provetes bulk em PA s/FC

Número Provete	Largura (mm)			Média Largura	Espessura (mm)			Média Espessura	Área (mm ²)
1	13,60	13,30	13,70	14	3,18	3,19	3,21	3	42
2	13,15	13,00	13,40	13	3,16	3,21	3,27	3	39
3	13,40	13,11	13,55	13	3,17	3,27	3,25	3	39
4	13,55	13,28	13,43	13	3,23	3,23	3,30	3	39

Tabela A. 5 - Dimensões dos provetes bulk em PA c/FC

Número Provete	Largura (mm)			Média Largura	Espessura (mm)			Média Espessura	Área (mm ²)
5	13,56	13,37	13,60	14	3,17	3,26	3,27	3	42
6	13,54	13,37	13,88	14	3,25	3,17	3,16	3	42
7	13,69	13,54	13,8	14	3,18	3,19	3,23	3	42
8	13,65	13,55	13,87	14	3,08	3,22	3,18	3	42

Anexo A- Ficha técnica STYX PA6



Technical Data Sheet

STYX PA6



Print date: 28-02-2023

Version: 1.0

Product specifications

STYX PA6 is an easier to 3D print nylon filament compared to other PA6 filaments. It has much lower warping and improved layer adhesion. This makes STYX PA6 a versatile nylon filament for 3D printing end-use parts.

FormFutura's STYX PA6 exhibits a good resistance to oils, fuels, and lubricants. It has a high impact strength and good mechanical properties. 3D printed parts are strong, durable and show good resistance to wear and abrasion. This makes STYX PA6 a great filament for 3D printing functional engineering parts.

Important key features

- Low warping PA6 filament.
- Easy to print with a very good layer adhesion.
- High strength and resistance to abrasion.
- High chemical resistance.
- Good electrical insulating properties.

Suitable applications

- Making electrical insulating parts.
- End-use parts that require a high wear resistance.
- Parts that are resistant to oils, lubricants and fuels.
- Making jigs and fixtures.

Material properties

	Typical value	Test Method
Density	1.15 g/cm ³	ISO 1183
Moisture absorption, 23°C/ 50% r.h.	3,00%	ISO 62
Water absorption, 23°C/ saturation in water	9.5%	ISO 62
Melt Volume Rate, 275°C/5kg	120 cm ³ /10 min	ISO 1133

Mechanical properties

Tensile modulus (23°C, 1mm/min)	2900 MPa	ISO 527-1/-2
Tensile strength (23°C, 50mm/min)	50 MPa	ISO 527-1/-2
Elongation at break (23°C, 50mm/min)	1,9%	ISO 527-1/-2
Flexural modulus (23°C, 2mm/min)	2800 MPa	ISO 178
Flexural strength (23°C, 2mm/min)	112 MPa	ISO 178
Charpy unnotched impact strength, 23°C	139 NB kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength, 23°C	6,8 kJ/m ²	ISO 179/1eU

Thermal properties

Melting temperature (DSC), 10°C/min	185°C	ISO 3146
Heat Deflection Temperature (HDT)	60°C	ISO 75-1/-2
Flammability, 1.5mm	V2	UL-94

Drying recommended

PA6 is a hygroscopic thermoplastic material and will attract and hold water molecules from the surrounding environment. For optimal printing results it is recommended to dry the filament before usage and even 3D print from a dry box for larger prints. This will ensure optimal material properties.

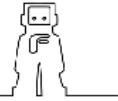


FormFutura B.V. - Tanneweg 3 - 6534 AM - Nijmegen - The Netherlands - Phone: +31 (0)85 743 4000 - Email: info@formfutura.com - www.formfutura.com
Dutch Business Registration Number: 69095502 - VAT/BTW Number: NL857733709B01 - EORI Number: NL857733709 - D-U-N-S Number: 490546732



Technical Data Sheet

STYX PA6



Storage and handling

Filament should be stored at room temperature in a dry and dark place with humidity below 15%. Recommended storage temperature is ca. 18-25°C (64.4 -77.0°F). Keep out of moisture, sunlight and direct heat. When stored properly, product has a shelf life of 24 months. To obtain the best parameters of the printed object, it is recommended to dry the material prior to usage and to 3D print it directly from a dry box.

Product export information

HS Code	Description	Origin
39169090	Monofilament for 3D printing	European Union

Disclaimer

The product- and technical data provided in this datasheet is correct to the best of FormFutura BV's knowledge and are intended for reference and comparison purposes only. Actual values may vary according to printing conditions, model complexity, environmental conditions, etcetera. Typical values are indicative only and are not to be construed as being binding specifications. All other information supplied, including that herein, is considered accurate but is furnished upon the express condition that the customer shall make its own assessment to determine a product's suitability for a particular purpose. We make no warranty, express or implied, including regarding any information supplied or the data upon which it is based or the results to be obtained from the use of such products or information, or concerning product, whether of satisfactory quality, merchantability, fitness for any particular purpose or otherwise, or with respect to intellectual property infringement as a result of use of information or products, and none shall be implied.



FormFutura B.V. - Tarweweg 3 - 6534 AM - Nijmegen - The Netherlands - Phone: +31 (0)85 743 4000 - Email: info@formfutura.com - www.formfutura.com
 Dutch Business Registration Number: 69095502 - VAT/BTW Number: NL857733709B01 - EORI Number: NL857733709 - D-U-N-S Number: 490546732

Anexo B- Ficha técnica STYX PA6-CF15



Technical Data Sheet STYX PA6-CF15



Print date: 18-09-2023

Version: 1.0

Product specifications

Our STYX PA6-CF15 combines all benefits of STYX PA6 filament plus 15% carbon fibers.

STYX PA6-CF15 is a high-performance carbon fiber reinforced PA6 filament. The use of high modulus carbon fibers result in an unmatched strength and stiffness. This engineering filament is very easy to 3D print on open desktop machines. No enclosure, or heated chamber needed. Its low shrinkage factor and perfect layer adhesion make STYX PA6-CF15 a breeze to print with.

Important key features

- 200% stiffer than standard PA6
- Heat resistant up to 180°C
- High strength and resistance to abrasion.
- High chemical and corrosion resistance
- Easy to print on open desktop 3D printers

Suitable applications

- Creating parts for automotive
- High performance functional components
- Gear wheels, bearings, and sliding elements
- 3D printing machinery parts
- Dynamically stressed parts

Carbon fiber reinforcement explained

Reinforcing filaments with carbon results in great benefits. It combines the unique properties of both materials. The properties of the thermoplastic improve with everything carbon fibers offer. Carbon fibers offer lots of benefits, such as:

- Increasing stiffness
- Reducing weight
- Increasing tensile strength
- Increasing dimensional stability
- Reducing shrinkage / warping
- Increasing heat resistance
- Increasing chemical resistance
- Masking layer lines with a matt surface finish in 3D printed objects

This makes carbon fiber reinforced filaments perfect for 3D printing applications that require stiffness and lightweight properties.

Material properties	Typical value	Test Method
Density	1.18 g/cm ³	ISO 1183
Moisture Absorption (23 °C / 50% r.h.)	2,5%	ISO 62
Water Absorption (23 °C / saturation in water)	8%	ISO 62

Mechanical properties

Tensile strength (23°C, 50mm/min)	120 MPa	ISO 527-1
Tensile modulus (23 °C, 50 mm/min)	9000 MPa	ISO 527-1
Elongation at break (23°C, 50mm/min)	4%	ISO 527-1
Flexural Modulus (23 °C, 2 mm/min)	8000 MPa	ISO 178
Flexural Strength (23 °C, 2 mm/min)	180 MPa	ISO 178
Charpy unnotched impact strength, 23°C	60 KJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength, 23°C	4 KJ/m ²	ISO 179/1eU





Technical Data Sheet

STYX PA6-CF15



Thermal properties

Heat deflection temperature (HDT) @ 1.8MPa	65°C	ISO 75
Heat deflection temperature (HDT) @ 0.45MPa	180°C	ISO 75

Drying recommended

PA6 is a hygroscopic thermoplastic material and will attract and hold water molecules from the surrounding environment. For optimal printing results it is recommended to dry the filament before usage and even 3D print from a dry box for larger prints. This will ensure optimal material properties.

Abrasiveness

Please be aware that carbon fiber reinforced filaments contain a relatively high concentration of extremely hard carbon fibers, which have an abrasive nature. In general these carbon fibers will accelerate the nozzle-wear of brass nozzles, much faster than unfilled filaments. We recommend to use ruby nozzles or hardened steel nozzles.

Storage and handling

Filament should be stored at room temperature in a dry and dark place with humidity below 15%. Recommended storage temperature is ca. 18-25°C (64.4 - 77.0°F). Keep out of moisture, sunlight and direct heat. When stored properly, product has a shelf life of 24 months. To obtain the best parameters of the printed object, it is recommended to dry the material prior to usage and to 3D print it directly from a dry box.

Product export information

HS Code	Description	Origin
39169090	Monofilament for 3D printing	European Union

Disclaimer

The product- and technical data provided in this datasheet is correct to the best of FormFutura BV's knowledge and are intended for reference and comparison purposes only. Actual values may vary according to printing conditions, model complexity, environmental conditions, etcetera. Typical values are indicative only and are not to be construed as being binding specifications. All other information supplied, including that herein, is considered accurate but is furnished upon the express condition that the customer shall make its own assessment to determine a product's suitability for a particular purpose. We make no warranty, express or implied, including regarding any information supplied or the data upon which it is based or the results to be obtained from the use of such products or information, or concerning product, whether of satisfactory quality, merchantability, fitness for any particular purpose or otherwise, or with respect to intellectual property infringement as a result of use of information or products, and none shall be implied.



FormFutura B.V. - Tanneweg 3 - 6534 AM - Nijmegen - The Netherlands - Phone: +31 (0)85 743 4000 - Email: info@formfutura.com - www.formfutura.com
Dutch Business Registration Number: 69095502 - VAT/BTW Number: NL857733709B01 - EORI Number: NL857733709 - D-U-N-S Number: 490546732

Anexo C- Ficha técnica Araldite 2015



Advanced Materials

Araldite® 2015-1

Structural Adhesives

TECHNICAL DATASHEET

Araldite® 2015-1

Two component epoxy paste adhesive

Key properties

- Toughened paste
- Ideal for bonding GRP, SMC and dissimilar substrates
- Gap filling, non-sagging up to 10mm thickness
- Good resistance to weathering

Description

Araldite® 2015-1 is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It is thixotropic and non-sagging up to 10mm thickness. It is particularly suitable for SMC and GRP bonding.

Product data

Property	Araldite® 2015-1 Resin	Araldite® 2015-1 Hardener	Mixed Adhesive
Colour - visual (A112)*	beige paste	beige paste	beige paste
Specific gravity	1.4	1.4	1.4
Viscosity at 25 °C (Pa.s)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Lap shear strength at 25 °C (A501)*	-	-	> 15 MPa
Pot Life (100 g at 25 °C)	-	-	45 - 55 minutes

* Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

Processing

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, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) 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.

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® 2015-1 Resin	100	100
Araldite® 2015-1 Hardener	100	100

Araldite® 2015-1 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 0.05 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.arditeadhesives.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.

Typical times to minimum shear strength

Temperature	°C	10	15	23	40	60	100
Cure time to reach	hours	10	6	4	1	-	-
LSS > 1MPa	minutes	-	-	-	-	20	3
Cure time to reach	hours	20	15	8	3	-	-
LSS > 10MPa	minutes	-	-	-	-	40	5

LSS = Lap shear strength.

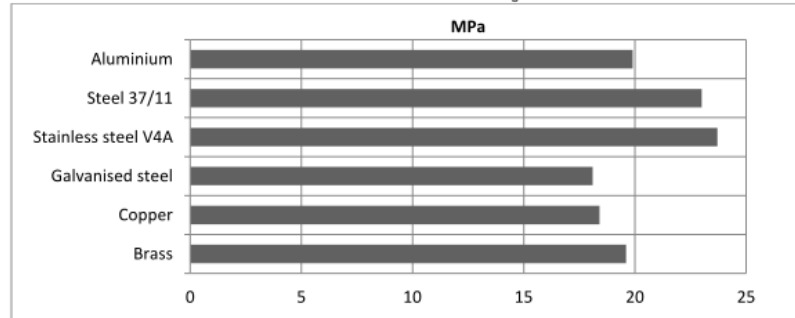
Typical cured properties

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

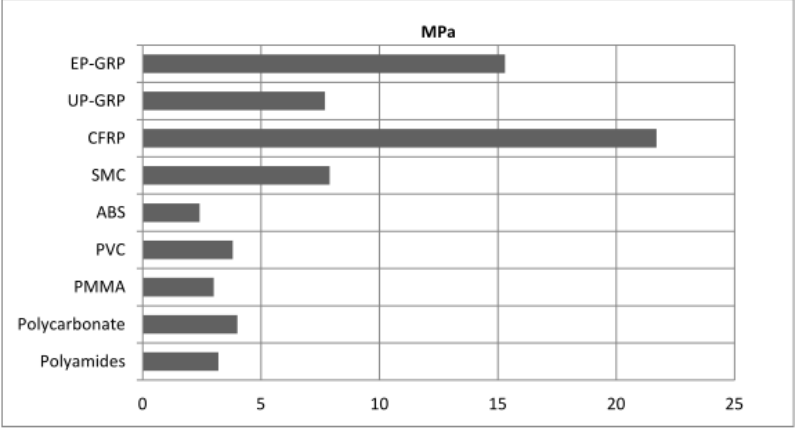
Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587) (typical average values)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting



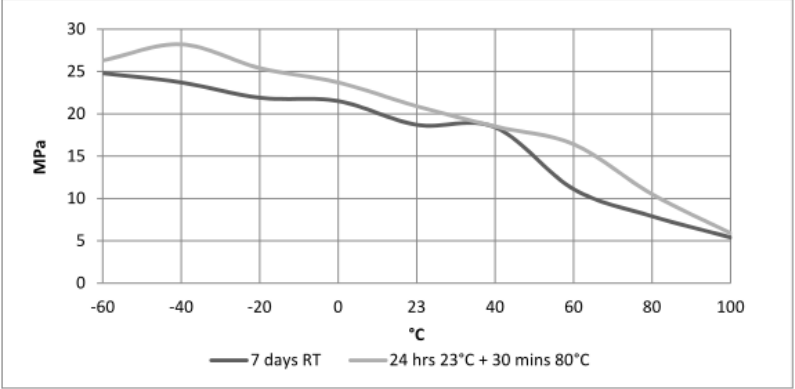


Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587) (typical average values)
Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment – Lightly abrade and alcohol degrease



Tensile properties (ISO 527) (typical average values) Cure 16 hours at 40°C - tested at 23°C
Tensile strength 31 MPa
Tensile modulus 1600 MPa
Elongation at break 4.2 %

Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)
On aluminium. Pretreatment - Sand blasting. Cure 7 days at RT or 24 hours at 23°C + 30 min at 80°C



Glass transition temperature (typical average value)

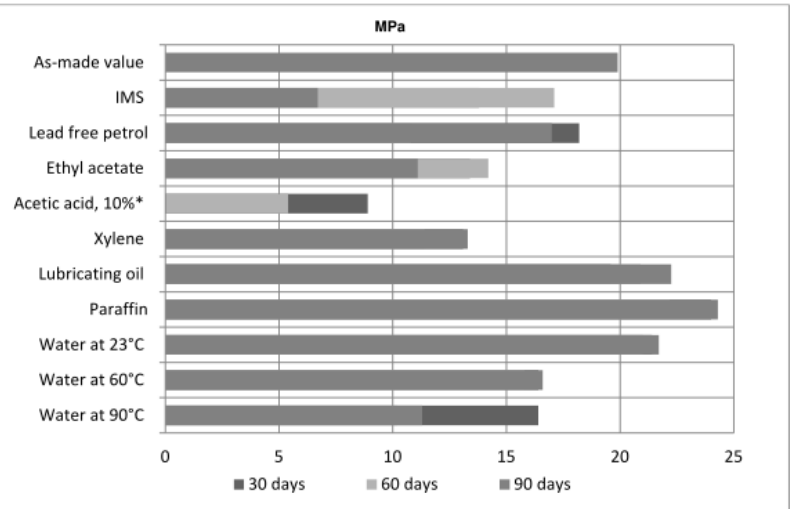
Cure: 1 hour at 80 °C

78 °C by DMA

Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)

On aluminium, cured for 16 hours at 40 °C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting

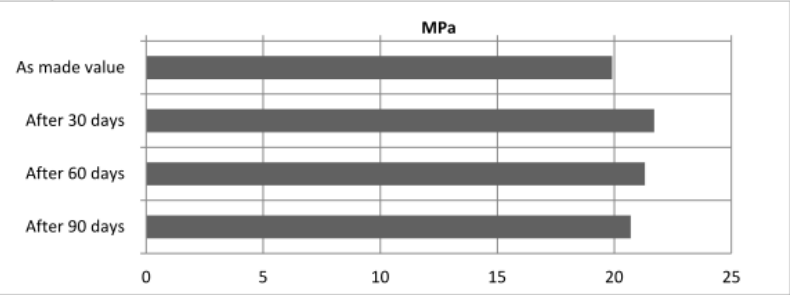
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 30, 60 and 90 days at 23°C



*: degraded in acetic acid after 90 days

Lap shear strength versus tropical weathering (typical average values)

(40 °C/92% Relative Humidity) On aluminium, cured for 16 hours at 40 °C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting





DMA Shear modulus G' (ISO 6721) (typical average values).

Cure: 1 hour at 80°C

Temperature	G'
-50°C	1.8 GPa
0°C	1 GPa
20°C	900 MPa
50°C	540 MPa
75°C	61 MPa
100°C	12 MPa

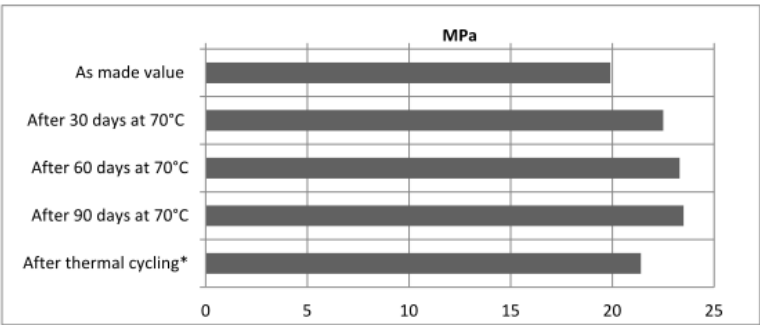
Flexural Properties (ISO 178) (typical average values).

Cure 16 hours at 40°C , tested at 23°C

Flexural Strength	43 MPa
Flexural Modulus	1800 MPa

Lap shear strength versus heat aging (typical average values)

On aluminium, cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting



* Thermal cycling: 25 cycles of 6 hours duration from -30°C to 70°C

Storage	Araldite® 2015-1 must be stored at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.
Handling precautions	Caution Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.



Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Specified data are analysed on a regular basis. Data which is described in this document as 'typical' or 'guideline' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Material's knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, **nothing herein is to be construed as a warranty, whether express or implied, including but without limitation, as to merchantability or fitness for a particular purpose. In all cases, it is the responsibility of the user to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any product for its own particular purpose.**

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product for actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Some products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and comply with all applicable safety and environmental standards.

Toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing processes or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to processors and end users.

Unless explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., Huntsman Advanced Materials (UAE) FZE, Huntsman Advanced Materials (Guangdong) Company Limited, and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

All trademarks mentioned are either property of or licensed to Huntsman Corporation or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

Copyright © 2018 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved