

Fabrico aditivo por extrusão de filamento metálico: Parâmetros de impressão e propriedades mecânicas

Bernardo Miguel Teixeira de Sousa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Bárbara Perry Pereira Alves Gouveia Almeida

Prof. João Pedro Grosa Magrinho

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Bárbara Perry Pereira Alves Gouveia Almeida

Vogais: Eng. Luís Filipe Figueiredo Dias

Eng. Pedro Afonso Ferreira Nogueira

Julho 2025

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

*Strive for perfection in everything you do. Take the best that exists
and make it better. When it does not exist, design it.*

Sir Henry Royce

Agradecimentos

É impossível estar mais grato por todo o apoio, conhecimento e companheirismo provindo de ambos os meus supervisores, Prof. Bárbara Almeida e Prof. João Magrinho, os quais acompanharam todo o desenvolvimento deste projeto, mostrando-se constantemente disponíveis para discutir, desenvolver e, consecutivamente, progredir todo o trabalho aqui apresentado. Foi indispensável todo o rigor, espírito crítico, positividade e sensibilidade teórica e experimental para se atingir a excelência num projeto desta dimensão e importância. Agradeço novamente, por toda a disponibilidade, apoio e ajuda ao longo de todo o trabalho. Expresso, aqui, a minha admiração pelo trabalho de ambos e por me terem proporcionado a oportunidade de trabalhar num projeto deveras agregador à comunidade científica.

Agradeço à área científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico (IST) por ter disponibilizado livre acesso aos seus laboratórios e equipamentos, indispensáveis à realização desta tese, e a todos os membros pela dedicação nas várias discussões produtivas sobre os resultados experimentais obtidos.

Agradeço ao CENTIMFE (Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos), por proporcionar os provetes, que nos foram fornecidos, para realizar os testes comparativos entre tecnologias.

A toda a minha família, amigos e colegas, eu agradeço por todo o apoio, motivação, paciência, perseverança e companhia ao longo de toda a minha jornada académica. Em especial, à minha namorada, Sofia, agradeço por todos os empurrões e puxões de orelhas que me permitiram manter de pé e seguir em frente, ultrapassando qualquer barreira física e psicológica com que me deparei.

Por fim, torna-se indispensável formular um agradecimento especial à minha mãe, agradecendo por todo amor, apoio e educação ao longo de toda a minha vida. Proporcionaste-me prosperar e construir um futuro, obrigado.

Este trabalho foi suportado pela União Europeia no âmbito do Next Generation EU, através do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) da República Portuguesa, no âmbito do projeto PRODUTECH R3 – "Agenda Mobilizadora da Fileira das Tecnologias de Produção para a Reindustrialização".

Resumo

A produção de peças metálicas por fabrico aditivo enfrenta atualmente um desafio importante: conciliar a viabilidade técnica, o desempenho mecânico e a competitividade econômica. Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo principal avaliar as propriedades mecânicas e dimensionais de provetes fabricados por Extrusão de Filamento Fundido (FFF), utilizando o material Ultrafuse 316L, em diferentes condições de impressão, incluindo orientação, direção de deposição e número de camadas externas. A análise comparativa com provetes produzidos por Fusão Seletiva por Laser (SLM) permite aferir o grau de desenvolvimento do FFF metálico face a um processo já consolidado.

A metodologia adotada combina ensaios mecânicos (tração, compressão e flexão), medições de densidade, rugosidade, dureza, bem como uma avaliação da repetibilidade, contração e exatidão dimensional. É ainda realizada uma análise de custos de produção entre as duas tecnologias. Os resultados mostram que o FFF apresenta maior ductilidade e resposta mais isotrópica em determinadas configurações, embora com menor rigor dimensional e acabamento superficial. Contudo, os custos reduzidos tornam o FFF uma alternativa economicamente promissora, especialmente em cenários de produção limitada ou prototipagem funcional.

O estudo evidencia que o FFF metálico, embora ainda em desenvolvimento, apresente características promissoras para aplicações industriais. A simplicidade, o baixo custo e a adaptabilidade justificam o contínuo investimento na investigação e desenvolvimento da tecnologia.

Palavras-chave: Fabrico Aditivo, Extrusão de Filamento Fundido (FFF), Fusão Seletiva por Laser (SLM), Propriedades Mecânicas, Custos de produção.

Abstract

Additive manufacturing of metal components faces the critical challenge of reconciling technical feasibility, mechanical performance, and economic viability. This dissertation investigates the mechanical and dimensional behavior of specimens fabricated via Fused Filament Fabrication (FFF) using Ultrafuse 316L feedstock, exploring the effects of print orientation, deposition direction, and number of outer shells. A parallel study on specimens produced by Selective Laser Melting (SLM) provides a benchmark against this well-established process.

The methodology integrates tensile, compression, and three-point bending tests with measurements of density, surface roughness, hardness, repeatability, shrinkage, and dimensional accuracy. A comparative cost analysis further elucidates the economic appeal of each technology. Results demonstrate that FFF specimens exhibit enhanced ductility and a more isotropic mechanical response in certain build configurations, albeit with reduced dimensional precision and surface finish quality. However, the substantially lower unit costs position FFF as an economically compelling option for low-volume production and functional prototyping.

Although it is still maturing, metal FFF shows significant promise for industrial applications. Its straightforward operation, minimal capital investment, and design flexibility warrant continued research and development to address remaining challenges in accuracy, surface quality, and process reliability.

Keywords: Additive Manufacturing, Fused Filament Fabrication (FFF), Selective Laser Melting (SLM), Mechanical Properties, Production Costs.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Lista de Tabelas.....	vi
1. Introdução.....	1
2. Estado de arte	3
2.1 Fabrico aditivo	3
2.1.1 Categoria 4 - Extrusão de material (MEX/ME).....	4
2.1.2 Categoria 5 - Fusão em cama de pó (PBF)	5
2.2 Fabrico Aditivo de metais (MAM).....	5
2.2.1 Extrusão de Material Metálico (FFF metálico).....	7
2.2.1.1 Matéria-prima.....	8
2.2.1.2 Processo de impressão	8
2.2.1.3 Desvinculação e sinterização (D&S)	9
2.2.1.4 Restrições e desvantagens	11
2.2.2 Fusão Seletiva por Laser (SLM).....	12
2.3 Parâmetros de impressão e propriedades mecânicas do FFF	13
2.3.1 Parâmetros de impressão.....	13
2.3.2 Propriedades mecânicas	18
2.3.2.1 Precisão dimensional, exatidão dimensional e contração.....	18
2.3.2.2 Densidade/porosidade.....	20
2.3.2.3 Rugosidade superficial.....	22
2.3.2.4 Dureza.....	23
2.3.2.5 Propriedades à tração	23
2.3.2.6 Propriedades à compressão.....	25
2.3.2.7 Propriedades à flexão	26
3. Metodologia.....	27
3.1 Provetes	27
3.2 Propriedades de impressão	28
3.3 Processos e equipamentos de análise.....	33
3.4 Custos de produção	40
3.4.1 Modelo de custos	40

3.4.2 Caso de estudo e suposições	44
4. Análise de resultados	46
4.1 Precisão dimensional, exatidão dimensional e contração	46
4.1.1 Provetes cúbicos	46
4.1.2 Provetes cilíndricos	48
4.1.3 Provetes de flexão.....	52
4.1.4 Provetes de tração.....	53
4.1.5 Conclusão.....	55
4.2 Densidade.....	55
4.3 Rugosidade superficial.....	57
4.4 Dureza	58
4.5 Propriedades à tração.....	59
4.5.1 Orientação de impressão	59
4.5.2 Número de camadas externas.....	61
4.5.3 Direção de impressão	63
4.5.4 Fratura antecipada nos provetes.....	63
4.5.5 Comparação entre tecnologias (SLM vs. FFF) e com outros estudos	64
4.6 Propriedades à compressão	65
4.6.1 Provetes cúbicos	65
4.6.2 Provetes cilíndricos.....	68
4.7 Propriedades à flexão.....	69
4.7.1 Orientação de impressão	70
4.7.2 Número de camadas externas.....	72
4.7.3 Direção de impressão	72
4.8 Custos de produção	73
4.8.1 Variáveis em análise.....	73
4.8.2 Variáveis fixas	74
4.8.3 Número de peças por lote.....	75
4.8.4 Preço do equipamento	76
4.8.5 Produção anual.....	76
5. Conclusões e trabalho futuro	78
Referências	81

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Classificação elegida pela norma ISO/ASTM 52900:2021 (ISO/ASTM, 2021).	4
Tabela 2.2: Densidade/Porosidade (parte 1).	20
Tabela 2.3: Propriedades à tração (parte 1).	24
Tabela 2.4: Propriedades à compressão.	26
Tabela 2.5: Propriedades à flexão.	26
Tabela 3.1: Propriedades de impressão análogas a todas as impressões.	28
Tabela 3.2: Designação e propriedades dos provetes de tração produzidos.	29
Tabela 3.3: Designação e propriedades dos provetes de tração de SLM.	29
Tabela 3.5: Designação dos provetes cúbicos de SLM.	30
Tabela 3.4: Designação e propriedades dos provetes cúbicos.	30
Tabela 3.6: Designação e propriedades dos provetes cilíndricos produzidos.	31
Tabela 3.7: Designação e propriedades dos provetes cilíndricos de SLM.	31
Tabela 3.8: Designação e propriedades dos provetes de flexão produzidos.	32
Tabela 3.9: Designação e propriedades dos provetes de flexão de SLM.	32
Tabela 4.1: Rugosidade superficial dos provetes cúbicos analisados (parte 1).	58
Tabela 4.2: Valores médios das propriedades de tração dos provetes SLM para diferentes orientações de impressão.	60
Tabela 4.3: Valores médios das propriedades de tração dos provetes FFF impressos de lado e na direção Y para diferentes quantidades de camadas externas.	60
Tabela 4.4: Valores médios das propriedades de tração dos provetes FFF impressos na horizontal (deitados) e na direção Y para diferentes quantidades de camadas externas. Com adição dos valores médios associados aos provetes FFF impressos na vertical (em pé).	61
Tabela 4.5: Relação volumétrica percentual, na zona de referência, dos provetes tração produzidos por FFF.	62
Tabela 4.6: Valores médios das propriedades à compressão dos provetes cúbicos SLM e FFF para diferentes direções de compressão e quantidades de camadas externas.	67
Tabela 4.7: Valores médios das propriedades à compressão dos provetes cúbicos FFF para diferentes direções de compressão e quantidades de camadas externas.	67
Tabela 4.8: Valores médios das propriedades à compressão dos provetes cilíndricos SLM e FFF para diferentes orientações de impressão e quantidades de camadas externas.	69
Tabela 4.9: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes SLM para diferentes orientações de impressão.	70
Tabela 4.10 Relação volumétrica percentual dos provetes de flexão produzidos por FFF.	70
Tabela 4.11: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes FFF impressos de lado e na direção X para diferentes quantidades de camadas externas.	71
Tabela 4.12: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes FFF impressos na horizontal (deitados) e na direção X para diferentes quantidades de camadas externas.	71
Tabela 4.13: Número de peças por lote → Variação do custo por peça produzida por FFF.	75
Tabela 4.14: Preço do equipamento → Variação do custo por peça produzida por FFF.	76

Tabela B.1: Sintetização dos parâmetros de impressão e respectivos valores, recomendados pela BASF, para o material Ultrafuse 316L (Forward AM, 2024c).	90
Tabela C.1: Propriedades mecânicas normalizadas para o material 316L para as tecnologias MIM, SLM e FFF.	91
Tabela C.2: Precisão e exatidão dimensional.	91
Tabela C.3: Contração.	92
Tabela C.4: Densidade/Porosidade (parte 2).	92
Tabela C.5: Rugosidade superficial média.	93
Tabela C.6: Dureza.	93
Tabela C.7: Propriedades à tração (parte 2).	94
Tabela C.8: Propriedades de impressão dos estudos mencionados.	95
Tabela C.9: Dados, respectivas referências e métodos de cálculo para determinar os custos de produção.	96
Tabela D.6: Rugosidade superficial dos provetes cúbicos analisados (parte 2).	102
Tabela D.7: Valores médios das propriedades de tração dos provetes FFF impressos na horizontal (deitados) e na direção X para diferentes quantidades de camadas externas.	102
Tabela D.8: Valores médios das propriedades de tração dos provetes FFF impressos de lado e na direção X para diferentes quantidades de camadas externas.	102
Tabela D.9: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes FFF impressos de lado e na direção Y para diferentes quantidades de camadas externas.	103
Tabela D.10: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes FFF impressos na horizontal (deitados) e na direção Y para diferentes quantidades de camadas externas.	103
Tabela D.11: Número de peças por lote → Variação do custo por peça produzida por SLM.	103
Tabela D.12: Preço do equipamento → Variação do custo por peça produzida por SLM.	104
Tabela D.13: Produção anual → Variação do custo por peça produzida por FFF.	104
Tabela D.14: Produção anual → Variação do custo por peça produzida por SLM.	105

Lista de Figuras

Figura 1.1: Número de publicações referentes ao FFF metálico desde 1996 a abril de 2025.....	1
Figura 2.1: Classificação das tecnologias de fabrico aditivo segundo diferentes contextos (metodologia de fabrico, material e meio de processamento) (adaptado de Alghamdi et al. (2021)).	3
Figura 2.2: (a) Ilustração 2D do processo e equipamento de extrusão de material (retirado de STEMpedia (2024)). (b) Representação do equipamento de extrusão de material com anotações (retirado de Markforge (2024a)).....	4
Figura 2.3: (a) Ilustração 2D e representação do processo de fusão em cama de pó (retirado de Yang et al. (2024)). (b) Representação do processo de fusão em cama de pó com anotações (retirado de Armstrong et al. (2022)).....	5
Figura 2.4: Sequência de projeto geral para as tecnologias de fabrico aditivo de metais (retirado de Armstrong et al. (2022)).....	6
Figura 2.5: (a) Produção e desenvolvimento da matéria-prima; (b) Impressão; (c) Desvinculação; (d) Sinterização (retirado de Suwanpreecha & Manonukul (2022)).....	7
Figura 2.6: (a) Ilustração de um equipamento de extrusão de filamento metálico (FFF); (b) Ilustração de um típico mecanismo de uma cabeça de extrusão de um equipamento de FFF (retirado de Armstrong et al. (2022))..	8
Figura 2.7: Esquema da morfologia da matéria-prima: (a) Componente após a impressão; (b) Debiding – decomposição térmica do material aglutinante; (c) Brown part – resultado após a desvinculação catalítica; (d) Fase inicial da sinterização – decomposição térmica do backbone residual; (e) White/Metal part - densificação térmica das partículas de pó metálico (retirado de Armstrong et al. (2022)).....	9
Figura 2.8: Comparação da dimensão entre a peça verde e a branca (retirado de Wang et al. (2023)).....	10
Figura 2.9: Ilustração do mecanismo de contração anisotrópica. Os efeitos do domínio do ligante na contração e geração de vazios nos componentes (retirado de Armstrong et al. (2022)).....	10
Figura 2.10: Componente na fase castanha e respetivo raft (retirado de Markforged (2025)).	11
Figura 2.11: Representação da resistência mecânica das peças perante a relação entre a direção do plano de deposição e as forças impostas (retirado de Markforged (2024a)).	12
Figura 2.12: (a) Esquema que representa a existência de vazios entre extrusões. (b) Esquema que representa o perfil lateral ondulante e entalhes entre camadas de material extrudido (retirado de Armstrong et al. (2022)). ...	12
Figura 2.13: Ilustração esquemática do processo SLM (retirado de Ansari et al. (2021)).	13
Figura 2.14: Projetos dentro do programa IdeaMaker da Raise3D: (a) Cubo com duas camadas externas, 10% infill e apenas o brim; (b) Cubo com cinco camadas externas, 20% infill e apenas o raft (retirado de Raise3D (2024e)).....	14
Figura 2.15: Alguns exemplos de diferentes padrões de preenchimento: Grade, concêntrico, linear e retilíneo, respetivamente (retirado de Raise3D (2024e)).....	15
Figura 2.16: Representação da altura/espessura (t) e largura (w) das camadas depositadas (retirado de Steuben et al. (2015)).....	15
Figura 2.17: Ilustração do (a) skirt, (b) brim e (c) raft, respetivamente, no slicer IdeaMaker da Raise3D (retirado de Raise3D (2024e)).....	17

Figura 2.18: (a) Orientação das peças impressas em 3D (retirado de Pellegrini et al. (2022)); (b) Possíveis direções de impressão para diferentes orientações, por exemplo, peça impressa na horizontal (flatwise) na direção X e Y (provete XY e YX, respectivamente) (retirado de Cojocar et al. (2022)).	17
Figura 2.19: Efeito de delaminação nos provetes verdes e brancos (retirado de Pellegrini et al. (2022)).	22
Figura 2.20: Morfologia da superfície de fratura dos provetes de tração: (a) Provete impresso na horizontal (deitado); (b) Provete impresso na vertical (em pé) (retirado de Tosto et al. (2021)).	25
Figura 3.1: Esquema representativo dos processos de análise do comportamento mecânico realizados para cada tipo de provete (exibidos com cores distintas).	27
Figura 3.2: Provetes e respectivas dimensões: (a) cúbico de compressão, (b) cilíndrico de compressão, (c) flexão e (d) tração.	28
Figura 3.3: (a) Provetes de tração verdes e (b) brancos. Apresentação de duas orientações de impressão e o número de camadas, nos provetes brancos, crescente da esquerda para a direita.	30
Figura 3.4: (a) Provetes cúbicos verdes com o número de camadas crescente de baixo para cima. (b) Provetes brancos com o número de camadas crescente de cima para baixo.	30
Figura 3.5: (a) Provetes cilíndricos verdes e (b) brancos. Ambos com o número de camadas crescente de cima para baixo.	31
Figura 3.6: Delaminação identificada em alguns dos provetes cilíndricos com 6 camadas externas.	31
Figura 3.7: (a) Provetes de flexão verdes, com o número de camadas crescente da esquerda para a direita, e (b) provetes de flexão brancos, com o número de camadas crescente de cima para baixo.	32
Figura 3.8: (a) Balança ML204. (b) Kit de medição da densidade. (c) Provete cilíndrico apoiado no suporte de medição dentro de água.	34
Figura 3.9: Bolhas de ar na superfície rugosa de um provete produzido por SLM.	35
Figura 3.10: Indentações de aspeto normal (ampliação de 40x) para um provete produzido por FFF e SLM, respetivamente.	35
Figura 3.11: (a) Indentação incompleta (ampliação de 40x) (provete de FFF). (b) Indentação inalterada pela composição e estrutura do provete (ampliação de 40x) (provete de SLM).	36
Figura 3.12: Indentações de elevada dimensão e incoerência estrutural de provetes produzidos por SLM e FFF, respetivamente.	36
Figura 3.13: Representação da direção das passagens, para medição da rugosidade superficial, com ilustração do aspeto, em microscópio (ampliação de 10x), de um provete produzido por FFF.	37
Figura 3.14: (a) Ilustração do equipamento DIC utilizado (retirada de Dantec Dynamics (2024)). (b) Aparato empregue nos testes de tração. (c) Provetes preparados, com a pintura necessária, para serem tracionados.	38
Figura 3.15: Máquina de ensaios universal Instron 5966K9184 (a) e equipamento para a realização de ensaios de flexão de 3 pontos 2810-400 (b).	40
Figura 3.16: Componentes dos custos de produção do FFF e SLM. Adaptado de Sæterbø & Solvang (2023).	41
Figura 3.17: Peça selecionada para o caso de estudo. Constituída por dois provetes de tração com orientações de impressão distintas e duas camadas externas.	44
Figura 4.1: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo para impressão e os provetes cúbicos verdes nas direções (a) X, (b) Y e (c) Z. (d) Exposição de uma representação dos provetes cúbicos e respetivos eixos.	46

Figura 4.2: Erro relativo percentual entre as dimensões dos provetes cúbicos verdes e brancos nas direções (a) X, (b) Y e (c) Z.....	47
Figura 4.3: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo 3D e dos provetes cúbicos brancos nas direções (a) X, (b) Y e (c) Z.	48
Figura 4.4: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo para impressão e os provetes cilíndricos verdes nas direções (a) X / Y e (b) Z. (c) Exposição de uma representação dos provetes cilíndricos, respetivos eixos e dimensões.....	49
Figura 4.5: Sistema de eixos da impressora Forge1 da Raised3D (RAISE3D, 2024d). O círculo verde representa uma das conexões entre os eixos X e Y e o quadrado azul representa a cabeça de extrusão.....	50
Figura 4.6: Erro relativo percentual entre as dimensões dos provetes cilíndricos verdes e brancos nas direções (a) X / Y e (b) Z.	50
Figura 4.7: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo 3D e dos provetes cilíndricos brancos nas direções (a) X / Y e (b) Z.	51
Figura 4.8: Distinção dimensional entre os provetes e flexão SLM e FFF (lapso na inclusão do fator de escala).52	
Figura 4.9: Exposição de uma representação dos provetes de flexão, respetivos eixos e dimensões.....	52
Figura 4.10: Exposição de uma representação dos provetes de tração, respetivos eixos e dimensões.....	54
Figura 4.11: (a) Gráfico do erro relativo médio da densidade dos provetes cilíndricos (valor de referência = 7,98 g/cm ³) e (b) tabela da densidade em g/cm ³ desses mesmos provetes.....	56
Figura 4.12: (a) Gráfico do erro relativo médio da densidade dos provetes cilíndricos (valor de referência = 7,98 g/cm ³) e (b) tabela da densidade em g/cm ³ desses mesmos provetes.....	56
Figura 4.13: Representação das faces e direções nas quais se efetuaram os registos da rugosidade superficial. ..	57
Figura 4.14: Gráfico da dureza Vickers (HV) dos provetes cúbicos.	59
Figura 4.15: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaio de tração). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provetes SLM com diferentes orientações de impressão e provetes FFF com diferentes quantidades de camadas externas.....	59
Figura 4.16: Distribuição crescente do número de camadas externas (representadas a verde e vermelho) para provetes FFF de tração impressos (a) de lado e (b) deitados.....	61
Figura 4.17: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaio de tração). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provetes FFF com diferentes orientações de impressão e quantidades de camadas externas.....	62
Figura 4.18: Distribuição crescente do número de camadas de provetes FFF impressos de lado e sinalização, a vermelho, da zona fraturada antes do previsto (curvatura associada à transição entre a região útil e a secção de fixação).	64
Figura 4.19: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaio de compressão). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provetes cúbicos SLM, com diferentes direções de compressão, e FFF com diferentes quantidades de camadas externas. (a) Gráfico completo e (b) concentração na zona elástica.....	66
Figura 4.20: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaio de compressão). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provetes cilíndricos SLM, com diferentes direções de compressão, e FFF com diferentes quantidades de camadas externas. (a) Gráfico completo e (b) concentração na zona elástica.	68

Figura 4.21: Provete cilíndrico com quatro camadas externas que, ao ensaiado à compressão, exibiu delaminação.....	69
Figura 4.22: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaios de flexão). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provates de flexão SLM, com diferentes orientações de impressão, e FFF com diferentes quantidades de camadas externas.	70
Figura 4.23: Exibição da estrutura e organização das camadas de provates FFF, sem camadas externas, impressos com orientações distintas (deitado e de lado, respetivamente).....	72
Figura 4.24: Custo unitário de fabrico por (a) FFF e (b) SLM e distribuição percentual dos componentes de custo com a dimensão do lote ((a) 5 peças / (b) 70 peças), o custo do equipamento ((a) 10 000 € / (b) 800 000 €) e o volume de produção anual (500 peças) fixos.	74
Figura 4.25: Relação entre a produção anual e o custo unitário para os processos FFF e SLM.	77
Figura A.1: Classificação dos processos de MAM segundo a matéria-prima (retirado de Kumar et al. (2021))..	89
Figura D.1: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo para impressão e os provates de flexão verdes.	97
Figura D.2: Erro relativo percentual entre as dimensões dos provates de flexão verdes e brancos.....	98
Figura D.3: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo para impressão e os provates de tração verdes.	99
Figura D.4: Erro relativo percentual entre as dimensões dos provates de tração verdes e brancos.....	100
Figura D.5: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo 3D e dos provates de tração brancos.....	101

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Abreviaturas

FFF	-	Extrusão de Filamento Fundido - <i>Fused Filament Fabrication</i>
FA/AM	-	Fabrico Aditivo - <i>Additive Manufacturing</i>
SLM	-	Fusão Seletiva por Laser - <i>Selective Laser Melting</i>
DMLS	-	Sinterização Direta de Metal a Laser - <i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBM	-	Fusão por Feixe de Eletrões - <i>Electron Beam Melting</i>
LENS	-	Modelação de Redes de Engenharia em Laser - <i>Laser Engineered Net Shapping</i>
BJ	-	Jato Ligante - <i>Binder Jetting</i>
DED	-	Deposição de Energia Dirigida - <i>Direct Energy Deposition</i>
MIM	-	Moldação por Injeção de Metal - <i>Metal Injection Moulding</i>
FDM	-	Modelação por Deposição de Material Fundido - <i>Fused Deposition Modelling</i>
ADAM	-	Fabrico Aditivo por Difusão Atômica - <i>Atomic Diffusion Additive Manufacturing</i>
D&S	-	Desvinculação e Sinterização - <i>Debinding e Sintering</i>
MPIF	-	<i>Metal Powder Industries Federation</i>
SLA	-	<i>Stereolithography</i>
SLS	-	Sinterização Seletiva a Laser - <i>Selective Laser Sintering</i>
LOM	-	Fabrico de Objetos Laminados - <i>Laminated Object Manufacturing</i>
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ISO	-	<i>International Organization for Standardization</i>
CAD	-	<i>Computer Aided Design</i>
NURBS	-	<i>Non-uniform Rational B-spline</i>
DfAM	-	<i>Design for Additive Manufacturing</i>
STL	-	<i>Standard Triangle Language</i>
MEX/ME	-	Extrusão de Material - <i>Material Extrusion</i>

MJP	-	<i>Multi Jet Fusion</i>
MAM	-	<i>Metal Additive Manufacturing</i>
LOF	-	<i>Lack of Fusion</i>
FOI	-	<i>Features of Interest</i>
YS	-	Tensão limite de elasticidade - <i>Yield strength</i>
UTS	-	Tensão de Ruptura - <i>Ultimate strength</i>
E	-	Módulo de Young - <i>Young's Modulus</i>
DIC	-	<i>Digital image correlation</i>
POM	-	<i>Polyoxymethylene</i>
Ra	-	Rugosidade Média
Rq/RMS	-	Raiz Quadrada da Média dos Quadrados/ <i>Root Mean Square</i>
Rz	-	Rugosidade Total
Rzj	-	Rugosidade Total de Jones
Rmax	-	Altura Máxima
Rp	-	Perfil de Altura de Pico
RpA	-	Perfil de Amplitude
Rpm	-	Perfil Médio
Rv	-	Rugosidade do Vale
RpK	-	Perfil de Altura do Pico
Rk	-	Altura do Pico
Rvk	-	Rugosidade do Vale do Pico

Símbolos latinos

l_e	-	<i>Roughness evaluation length</i>
E	-	Módulo de Young
A_f	-	Alongamento à fratura
W	-	Largura

L	-	Comprimento
H	-	Altura
T	-	Espessura
D	-	Diâmetro
K	-	Constante dependente do material
n	-	Coefficiente de encruamento

Símbolos grego

ρ_c	-	Densidade convencional do material
ρ_t	-	Densidade do material em teste
ε_w	-	Extensão verdadeira na direção da largura
ε_t	-	Extensão verdadeira na direção da espessura
ε_l	-	Extensão verdadeira na direção do comprimento

1. Introdução

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2021), o fabrico aditivo (FA), comumente reconhecido como impressão 3D, é definido como um processo de adição de materiais para o desenvolvimento de peças e componentes a partir de modelos tridimensionais, geralmente realizado de forma incremental, camada por camada. Este processo contrasta com as metodologias tradicionais de fabrico subtrativo e de deformação plástica, tendo vindo a suscitar um elevado interesse no fabrico de componentes de diferentes materiais, tais como cerâmicos, polímeros e, sobretudo, metais (Suwanpreecha & Manonukul, 2022). O FA distingue-se por proporcionar um elevado grau de liberdade no design, permitindo produzir peças com geometrias complexas que seriam extremamente difíceis, ou mesmo impossíveis, de produzir através dos processos de fabrico tradicionais (Pereira et al., 2019). Dentro das várias tecnologias de FA de peças metálicas, destaca-se a extrusão de filamento fundido (*Fused Filament Fabrication*, FFF). Esta tecnologia é caracterizada pela utilização de equipamentos e recursos de baixo custo, oferecendo, adicionalmente, elevada simplicidade e segurança, visto que não recorre ao uso de pó metálico, fontes de energia de alta potência nem necessita de uma atmosfera controlada.

A evolução e desenvolvimento da tecnologia de fabrico de peças metálicas por FFF teve origem na ciência de materiais e na metalurgia, mediante a investigação e desenvolvimento de filamentos metálicos adaptados para serem utilizados nas impressoras de materiais poliméricos existentes, assim como no estudo aprofundado das operações de pós-processamento, destinadas à remoção do material ligante e à subsequente sinterização das peças (Suwanpreecha & Manonukul, 2022). A qualidade e o potencial das peças produzidas nos primeiros estudos têm, na última década, despertado um crescente interesse da indústria e da comunidade académica, retratado pela evolução exponencial no número de publicações em revistas de especialidade (Figura 1.1). As publicações referem a tecnologia com diferentes nomenclaturas, tais como FFF, Modelação por Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modelling*, FDM) ou Fabrico Aditivo por Difusão Atómica (*Atomic Diffusion Additive Manufacturing*, ADAM). Observa-se que o número de publicações identificadas resulta da pesquisa em diferentes bases de dados (por exemplo, Science Direct, Web of Science e MDPI), utilizando diversas palavras-chave, como, por exemplo, “metal fused deposition modeling”, “metal material extrusion” e “metal fused filament fabrication”.

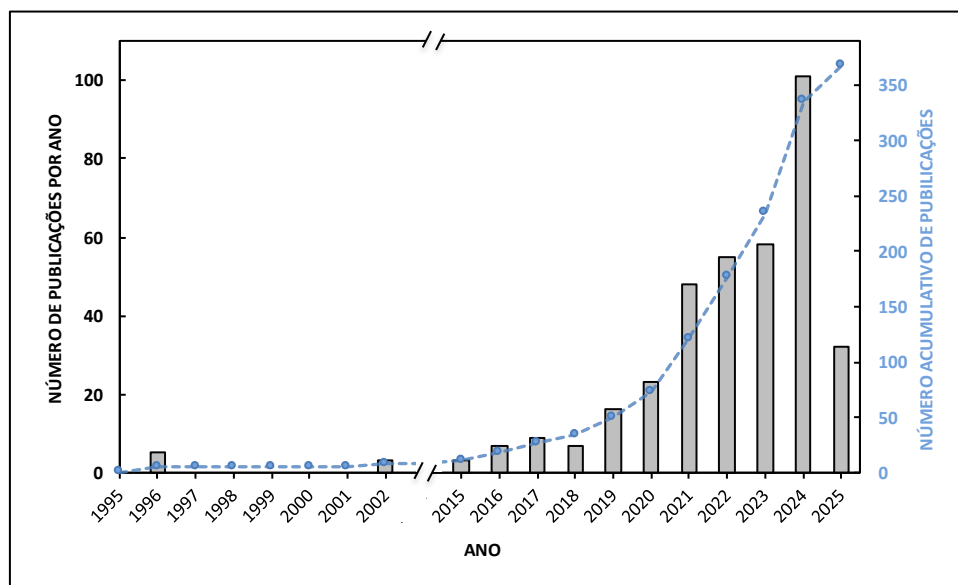


Figura 1.1: Número de publicações referentes ao FFF metálico desde 1996 a abril de 2025.

Adicionalmente, o reflexo do potencial industrial desta tecnologia é evidenciado pelo investimento no desenvolvimento de filamentos metálicos comerciais como, por exemplo, os filamentos produzidos pela Forward AM (2024b) ou pela The Virtual Foundry (2024), assim como a produção de impressoras dedicadas à utilização de filamentos metálicos, como a MetalX da Markforged (2024b) e a Forge1 da Raised3D (2024d).

Ao contrário dos processos de fabrico tradicionais, como a maquinagem, a soldadura, a fundição ou o forjamento, que se encontram tecnologicamente desenvolvidos e consolidados, os processos de FA, por terem surgido recentemente, apresentam ainda um conjunto significativo de desafios científicos e tecnológicos. Estes desafios visam, principalmente, melhorar as propriedades mecânicas e metalúrgicas das peças produzidas, a sua qualidade e a repetibilidade do processo. O FFF metálico é uma das mais recentes e mais requisitadas tecnologias de FA. Apesar de utilizar uma estratégia de impressão semelhante à extrusão de filamentos poliméricos, e de já haver um conhecimento consolidado sobre este processo, a investigação focada na produção de novos filamentos metálicos, na otimização de parâmetros de impressão e nas condições adequadas de pós-processamento continuam a ser um desafio. A otimização dos parâmetros de impressão tornou-se o ponto fulcral de estudo do mercado, dado que, para além de ser um dos fatores determinantes nas propriedades mecânicas, as variáveis de impressão são, na generalidade, os fatores sobre os quais o consumidor possui influência direta.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação das propriedades mecânicas de provetes produzidos por FFF com o filamento metálico Ultrafuse 316L (Forward AM, 2024), executando modificações em determinados parâmetros de impressão, permitindo avaliar o efeito das variáveis alteradas. Em detalhe, estudou-se a influência da orientação e direção de impressão, e da quantidade de camadas externas. Como termo de comparação e com o intuito de verificar a viabilidade dos resultados, serão avaliadas as propriedades mecânicas de provetes produzidos, com o mesmo material, por Fusão Seletiva por Laser (*Selective Laser Melting*, SLM), visto que é um processo relativamente mais consolidado. Determinou-se a precisão e exatidão dimensional do processo, a contração dos provetes (fator inerente à tecnologia estudada), a densidade, a dureza, a rugosidade superficial, a resistência mecânica à tração, à compressão e à flexão, e, por fim, a anisotropia associada às diferentes peças. Complementarmente, foi averiguada a repetibilidade do processo e realizada uma análise comparativa de custos de produção entre FFF e SLM.

Este documento encontra-se dividido em cinco capítulos. Primeiramente, o capítulo 1 dedica-se a contextualizar e introduzir os temas e tecnologias discutidos em todo o trabalho, são apresentados o objetivo e a motivação do mesmo, é esclarecida a respetiva abordagem ao estudo experimental e é apresentada a estruturação do documento. No segundo capítulo, apresenta-se a definição do FA, as categorias do mesmo, de acordo com a norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2021), os processos de produção de peças metálicas e as suas vantagens, limitações e materiais. Por fim, dedica-se inteiramente uma secção ao estudo e publicações de outros autores, diretamente relacionadas com o estudo presente neste trabalho, abordando as condições de impressão selecionadas, os resultados e respetivas diferenças em relação ao trabalho efetuado nesta dissertação. No capítulo 3 apresentam-se as ferramentas e métodos utilizados no estudo experimental, descrevem-se os procedimentos executados e o sistema de aquisição de dados. No quarto capítulo encontra-se a análise de resultados, onde são apresentadas comparações, não só entre os diferentes provetes ensaiados, como também entre os resultados obtidos e os resultados de outros autores. Por fim, no último capítulo, apresentam-se as principais conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. Estado de arte

2.1 Fabrico aditivo

Após a patente registada por Chuck Hull em 1984, termos como fabrico aditivo, prototipagem rápida, fabrico rápido, fabrico orientado por camadas, fabrico digital e impressão 3D foram introduzidos antes da padronização estabelecida pela ISO/ASTM 52900 em 2015 (ISO/ASTM, 2015). Atualmente, o termo fabrico aditivo é comumente utilizado nas comunidades científicas e técnicas, enquanto o termo impressão 3D é geralmente proferido em comunicação com o público geral. Sintetizando, o FA inverte a abordagem convencional das técnicas de fabrico subtrativas, baseia-se na construção de peças camada por camada, começando com material líquido ou sólido, como matéria-prima, para formar um objeto tridimensional a partir da sobreposição de camadas bidimensionais (2D). Esta abordagem permite colmatar diversas lacunas e limitações associadas às estratégias de fabrico convencionais, proporcionando maior flexibilidade no design das peças, que podem ser altamente complexas e personalizadas, o FA reduz, igualmente, o desperdício de material e minimiza o risco de erro humano. Assim, estas tecnologias são particularmente vantajosas na produção de pequenos lotes e de peças com geometria complexa (Pereira et al., 2019).

O FA pode ser adequado à maioria dos setores industriais utilizando uma ampla gama de materiais (metálicos, cerâmicos, poliméricos e combinações dos mesmos, na forma de compósitos, híbridos e hidrogéis). Dependendo da metodologia de fabrico, da matéria-prima e do meio utilizado para processar a mesma, os processos de FA podem adquirir diferentes classificações (Alghamdi et al., 2021). A Figura 2.1 ilustra a classificação dos processos de FA sob diferentes perspetivas.

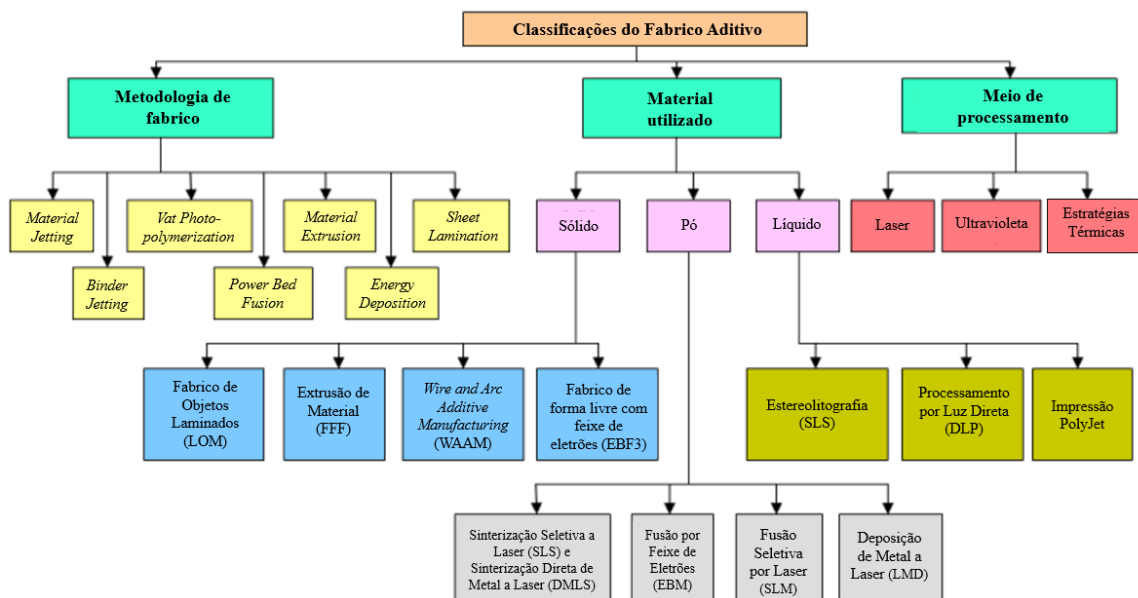


Figura 2.1: Classificação das tecnologias de fabrico aditivo segundo diferentes contextos (metodologia de fabrico, material e meio de processamento) (adaptado de Alghamdi et al. (2021)).

De acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2015), existem mais de 50 tipos diferentes de tecnologias de fabrico aditivo com base nas classificações mencionadas anteriormente. Por isso, a norma ISO/ASTM 52900:2021 (ISO/ASTM, 2021), formulou um conjunto de regras que classifica a gama dos

processos em 7 categorias (Tabela 2.1). Com base no trabalho experimental desenvolvido, a presente avaliação centrar-se-á nas categorias 4 e 5, em especial, nos processos de produção de peças metálicas, FFF e SLM.

Tabela 2.1: Classificação elegida pela norma ISO/ASTM 52900:2021 (ISO/ASTM, 2021).

Categoria	Processo	Tecnologias
1	<i>Vat Photopolymerization</i>	SLA, DLP, CLIP, DPP
2	<i>Material Jetting</i>	DOD, Polyjet, NPJ
3	<i>Binder Jetting</i>	CPJ
4	<i>Material Extrusion</i>	FFF
5	<i>Power Bed Fusion</i>	SLS, SLM, EBM, MJF
6	<i>Sheet Lamination</i>	LOM, UC
7	<i>Direct Energy Deposition</i>	LENS, LDW, EBAM, WAAM

2.1.1 Categoria 4 - Extrusão de material (MEX/ME)

Segundo a norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2021), a extrusão de material (MEX/ME) é o processo de FA no qual o material é empurrado através de um bocal aquecido (*nozzle*) a uma pressão constante num fluxo contínuo e os materiais solicitados são depositados seletivamente, camada por camada, conforme o design pré-definido para a peça 3D (Thakur et al., 2023). Como mencionado anteriormente, esta tecnologia é comumente conhecida como FFF e é um dos processos mais populares de FA.

No ciclo de impressão, os filamentos utilizados são alimentados a partir de bobines e depositados pela cabeça de extrusão aquecida. O material fundido é forçado a sair e é depositado na plataforma de construção, que, por sua vez, pode ser aquecida para existir maior aderência. Em seguida, a plataforma move-se para baixo, ou o cabeçote de impressão para cima, de forma a permitir a impressão da camada seguinte. Esta técnica, promove a criação de formas complexas ao extrudir o material através de um ou mais bocais. Na maioria dos sistemas, existem dois bocais, um utilizado para modelar a peça e o outro para modelar o material de suporte, que pode ser removido no pós-processamento do produto, com maior ou menor facilidade, dependendo do material a imprimir (Figura 2.2 (a) e (b)) (Suwanpreecha & Manonukul, 2022). Uma grande variedade de materiais podem ser utilizados, como, por exemplo, termoplásticos (ABS, PLA, HIPS e TPU), metais, cerâmicos, cimento e, até mesmo, chocolate (Bento, 2022).

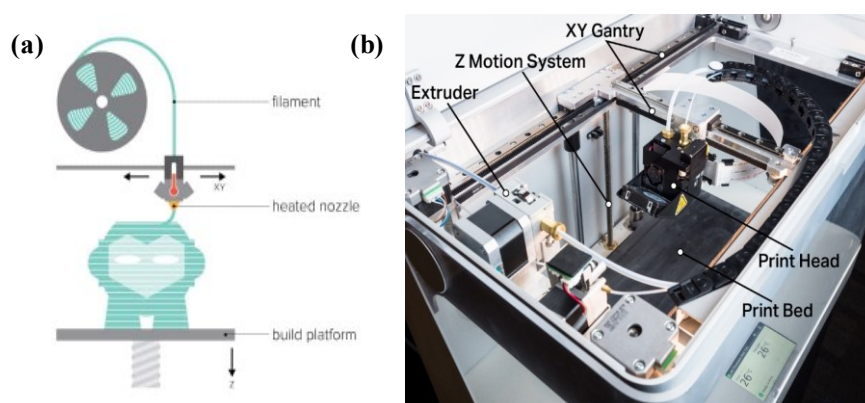


Figura 2.2: (a) Ilustração 2D do processo e equipamento de extrusão de material (retirado de STEMpedia (2024)). (b) Representação do equipamento de extrusão de material com anotações (retirado de Markforge (2024a)).

2.1.2 Categoria 5 - Fusão em cama de pó (PBF)

Segundo a mesma norma (ISO/ASTM, 2021), a fusão em cama de pó é um processo de FA no qual fontes térmicas são utilizadas para fundir regiões com partículas de pó, de forma controlada, conforme projetado em CAD. Esta técnica permite o fabrico de uma vasta gama de produtos geometricamente complexos, utilizando uma fonte de calor, nomeadamente, lasers ou feixes de eletrões, para fundir as partículas de pó, camada por camada, formando uma peça sólida (Gao et al., 2023). Existem variantes do processo de PBF, que são distinguidas pela fonte de calor utilizada, as tecnologias mencionadas incluem: Sinterização Seletiva a Laser (SLS); Fusão Seletiva por Laser (SLM); Fusão por Feixe de Eletrões (EBM); *Multi Jet Fusion* (MJP) da HP.

O processo de PBF começa por espalhar, com um rolo, uma camada de material sobre a plataforma de construção. Em seguida, a fonte térmica funde a primeira camada do modelo ou a primeira seção transversal, e uma nova camada é depositada sobre a camada anterior, o processo é repetido, sequencialmente, até atingir o modelo pré-projetado (Figura 2.3 (a) e (b)) (Ansari et al., 2021). Esta tecnologia pode ser aplicada a diferentes materiais em pó, como metais e polímeros (aço, nylon, titânio, alumínio, entre outros).

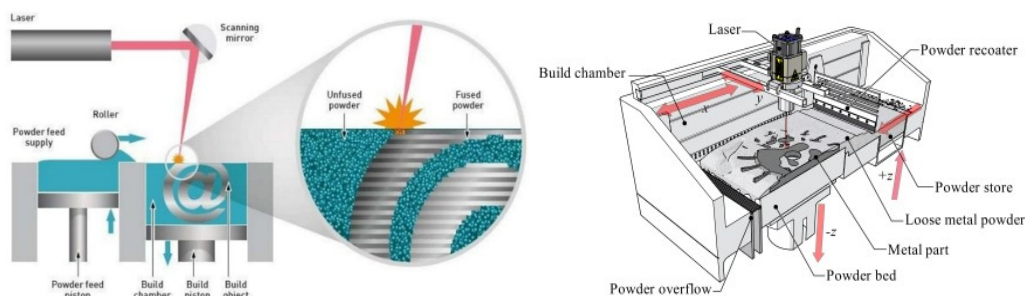


Figura 2.3: (a) Ilustração 2D e representação do processo de fusão em cama de pó (retirado de Yang et al. (2024)). (b) Representação do processo de fusão em cama de pó com anotações (retirado de Armstrong et al. (2022)).

2.2 Fabrico Aditivo de metais (MAM)

Tendo por base a matéria-prima, o fabrico aditivo de metais (*Metal Additive Manufacturing*, MAM) é classificado em quatro categorias: Líquido; Sólido; Filamento e Pó, conforme ilustrado na Figura A.1 (em anexo). Naturalmente, cada processo de MAM possui vantagens, desvantagens, mecanismos e características exclusivas. Contudo, o fluxo de trabalho de cada um não se distingue significativamente das restantes tecnologias de fabrico aditivo.

A abordagem aos processos e tecnologias de fabrico aditivo estabelece um fluxo de trabalho organizado e similar entre tecnologias, de modo que, com o auxílio de diversas ferramentas, sejam gerados ficheiros de processamento para posterior impressão e pós-processamento. Diferentes estudos e autores dividem o processo num número distinto de etapas (Ambrosi & Bonanni, 2021; Azlin et al., 2022; STEMpedia, 2024; Siddique et al., 2019; Prabhakar et al., 2021; 3DFUSION, 2023; Raeburn, 2024). Contudo, os passos fundamentais do processo podem ser facilmente concentrados e descritos em cinco etapas fundamentais (Moreno Nieto et al., 2021; Armstrong et al., 2022), listadas abaixo e representadas num esquema (Figura 2.4).

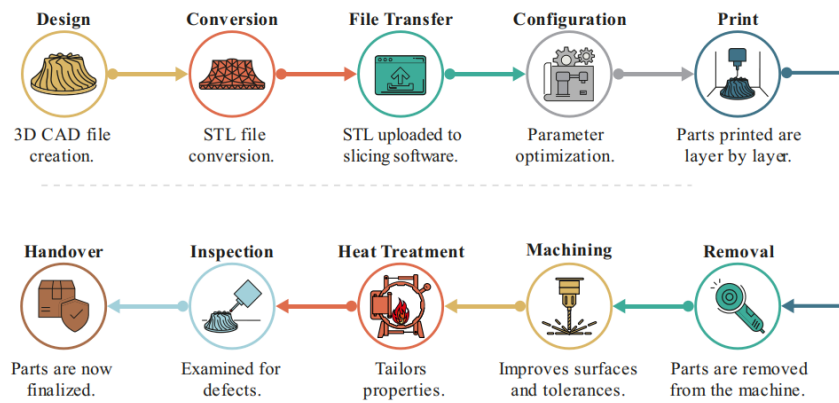


Figura 2.4: Sequência de projeto geral para as tecnologias de fabricação aditiva de metais (retirado de Armstrong et al. (2022)).

- (a) **Design:** A criação de peças, através do FA, inicia-se com o desenvolvimento de modelos tridimensionais em programas de *computer aided design* (CAD). Embora os processos permitam a conceção de geometrias complexas, as estruturas estão condicionadas pelas limitações da tecnologia utilizada. A modelação pode realizar-se através de programas de modelação de sólidos e superfícies convencionais ou com recurso a ferramentas avançadas, como malhas poligonais ou superfícies NURBS (*Non-uniform rational B-spline*). Entre os softwares mais utilizados, destacam-se o TinkerCAD (Tinkercad, 2024), AutoCAD (Autodesk, 2024) e SolidWorks (SolidWorks, 2024). Com a evolução do FA, surgem normas e diretrizes para otimizar o design das peças e minimizar as limitações tecnológicas, denominadas de *design for additive manufacturing* (DfAM), garantindo o melhor desempenho e viabilidade dos modelos fabricados.
- (b) **Conversão:** Após o design, os ficheiros são exportados para os formatos compatíveis com a impressão 3D, sendo o *standard triangle language* (STL) o mais comum. Este descreve o volume da peça através de uma malha de superfície triangular e permite a inclusão da mesma em softwares de fatiamento/laminação (*slicing softwares*). Antes do *slicing*, recomenda-se a execução de uma verificação, na qual se identificam possíveis defeitos e restrições da tecnologia utilizada. Devem ser analisados fatores como descontinuidades, orientação da peça, estruturas de suporte e zonas de difícil construção (furos, ângulos extremos, zonas de transição sem chanfros, paredes finas, fendas ou orifícios, elementos salientes, entre outros). Além disso, as restrições associadas à fase de produção tais como, dimensões, tolerâncias, material e equipamento, devem ser levadas em consideração.
- (c) **Slicing:** Os programas de *slicing*, como, por exemplo, o IdeaMaker (Raise3D, 2024c), o UltiMaker Cura (Ultimaker, 2024) e o PrusaSlicer (Prusa3D, 2024), geram o código fonte lido pela máquina/impressora, que contem as características do processo de impressão, nomeadamente, os parâmetros definidos pelo utilizador e as respetivas trajetórias de deposição. É indispensável definir corretamente os parâmetros de impressão, considerando, não só o material utilizado, como também a impressora, o design e as propriedades finais pretendidas. Os principais parâmetros compartilhados pela maioria dos processos incluem: dimensão da camada depositada, velocidade de fabrico, temperatura e percentagem de enchimento (*infill*).
- (d) **Impressão:** Nesta etapa, as peças são materializadas através dos equipamentos especializados em impressão 3D. As características específicas variam conforme a tecnologia selecionada, mas, no geral, a impressão tende a ser demorada e frequentemente requer pós-processamento.
- (e) **Pós-processamento:** Dependendo das características do processo, é necessária maior ou menor intervenção, a fim de se obter o acabamento e as propriedades específicas das peças impressas. De forma geral, esta fase

incluiu a remoção da peça da superfície de impressão e a eliminação de suportes, quando aplicável. Além disso, podem ser necessários processos adicionais, como a remoção de resíduos, etapas de acabamento superficial e tratamentos térmicos. Por fim, os componentes finalizados podem ser submetidos a testes não destrutivos para verificar a presença de defeitos e a precisão e exatidão dimensional.

O fabrico de estruturas metálicas com MAM exige, de forma geral, a introdução de uma maior quantidade de etapas de pós-processamento relativamente às restantes tecnologias de FA. No melhor dos casos, um protótipo, pode requerer apenas a impressão para executar corretamente a sua função, porém, peças que possam comprometer componentes finais de grande valor estrutural podem exigir várias operações (Suwanpreecha & Manonukul, 2022). No caso do FFF, por exemplo, após o término da impressão, o processo exige que as peças sejam removidas da plataforma de construção, ao retirar a cola solúvel entre os mesmos. Em seguida, é necessário que, as mesmas, passem pelas etapas de desvinculação e sinterização (D&S), com o intuito de remover o excesso de material e atingir a densificação das peças.

2.2.1 Extrusão de Material Metálico (FFF metálico)

A tecnologia de FFF resulta da combinação da impressão 3D, extrusão de filamentos poliméricos/compósitos camada a camada, com a matéria-prima utilizada no processo de moldação por Injeção de Metal (MIM). Em detalhe, o processo inicia-se com o desenvolvimento da matéria-prima, resultante da união de pós metálicos com uma matriz polimérica, que funciona como sistema de ligação, dando origem a uma matéria-prima segura e granulada. Em seguida, dependendo da impressora utilizada, é necessário recorrer a processos de modificação estrutural que permitem transformar a matéria-prima em barras ou filamentos flexíveis (Figura 2.5 (a)). Após a impressão (Figura 2.5 (b)), o material ligante é removido recorrendo a processos de dissolução e desvinculação, terminando com a formação da ligação das partículas metálicas aquando da sinterização (D&S) (Figura 2.5 (c) e (d)). Durante a sinterização, ocorre, como referido, a ligação entre as partículas metálicas, o que resulta na consolidação do material e redução/eliminação dos vazios, espaço anteriormente ocupado pelo material ligante, provocando a contração da peça, que, em teoria, seria uniforme, embora, na prática, a redução dimensional depende de diversos fatores (Obadimu et al., 2022).

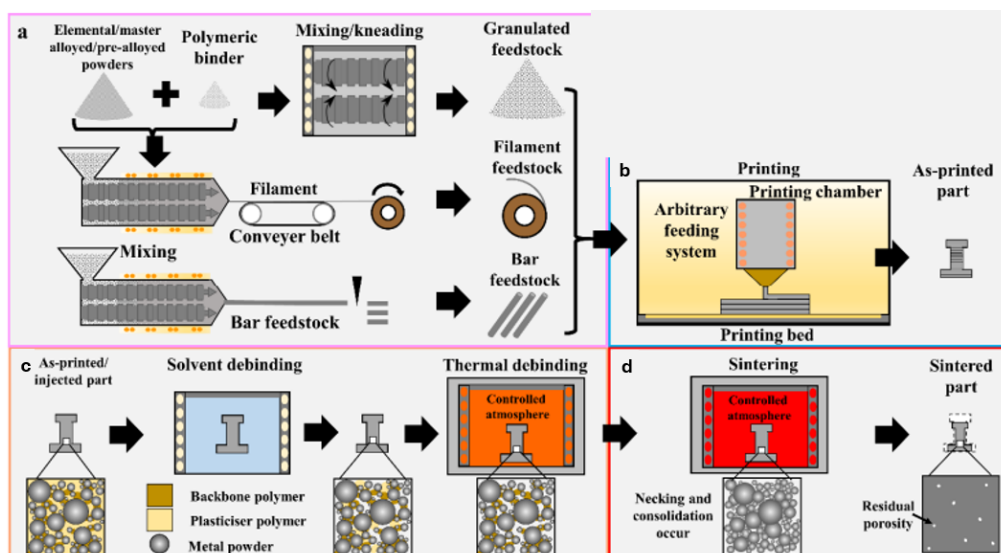


Figura 2.5: (a) Produção e desenvolvimento da matéria-prima; (b) Impressão; (c) Desvinculação; (d) Sinterização (retirado de Suwanpreecha & Manonukul (2022)).

Apesar de o desenvolvimento da tecnologia FFF ter por base os conhecimentos associados ao processo de fabrico MIM, o processo de D&S, a densidade e as propriedades mecânicas são diferentes entre os dois. Na generalidade, como a matéria-prima do FFF contem mais ligante, resultando numa menor carga sólida (com o intuito de facilitar o processo de impressão), promove a presença de vazios em maior quantidade e dimensão, levando a uma menor densidade de peças sinterizadas e à redução das propriedades mecânicas (Jacob et al., 2024).

2.2.1.1 Matéria-prima

Como a extrusão de filamento metálico foi desenvolvida com base nos princípios do MIM, a gama de materiais disponíveis para esta tecnologia é bastante semelhante. Os materiais geralmente utilizados pelo MIM são materiais sinterizáveis, como, por exemplo, aço inoxidável, cobre, titânio (e ligas associadas) e superligas à base de níquel.

Segundo o trabalho de Suwanpreecha & Manonukul (2022), a avaliação realizada dentro de grupo exclusivo de estudos, revelou que, a utilização de materiais em FFF, reflete-se na seguinte classificação (do maior para o menor): aço inoxidável 316L (41,57%), aço inoxidável 17-4PH (ou AISI 630, 17,98%), Ti-6Al-4V (13,48%), Cu (12,36%), WC-Co (4,49%), bronze (2,25%) e ferro de alto teor de carbono, aço ferramenta H13, aço rápido M2, ligas de magnésio AZ91, CP-Ti, Ni-Cu e Inconel 625 (1,12% cada). Em relação ao material mais utilizado, o 316L, verificou-se que mais de um terço dos estudos utilizaram, como material de alimentação, o filamento metálico 316L da BASF (Forward AM, 2024b), conhecido como Ultrafuse 316L (Forward AM, 2024a).

2.2.1.2 Processo de impressão

À semelhança da impressão de peças poliméricas por filamento fundido, a matéria-prima do processo FFF é aquecida na cabeça de impressão a uma temperatura superior ao ponto de fusão dos materiais ligantes. O material é extrudido na forma pastosa através do bico de extrusão sobre uma mesa de impressão aquecida. A deposição do material extrudido é realizada camada a camada, com a cabeça de impressão ligada a um sistema de dois eixos horizontais que permitem a execução das trajetórias de deposição do filamento no plano XY, construindo, assim, cada camada da peça. Após a conclusão de cada camada, a mesa de impressão desloca-se verticalmente no eixo Z, numa quantidade correspondente à espessura da camada, iniciando-se, então, a impressão da camada seguinte até à conclusão da geometria final. Ao mesmo tempo, o material *Polyoxymethylene* (POM), geralmente armazenado numa bobine separada e possuindo a própria cabeça de extrusão (e respetivo bocal) é depositado entre a peça e a estrutura de suporte, permitindo a fácil separação após a impressão (Figura 2.6) (Jacob et al., 2024).

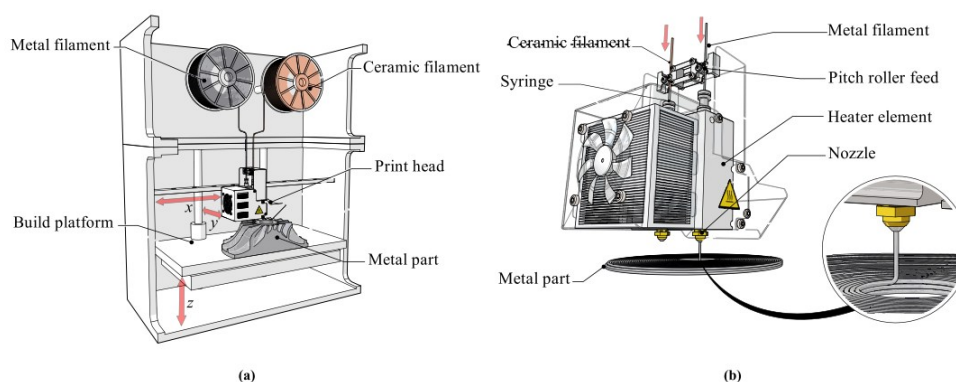


Figura 2.6: (a) Ilustração de um equipamento de extrusão de filamento metálico (FFF); (b) Ilustração de um típico mecanismo de uma cabeça de extrusão de um equipamento de FFF (retirado de Armstrong et al. (2022)).

A cabeça de impressão pode variar dependendo da impressora, desta forma, o sistema de alimentação pode ser classificado em três configurações: em parafuso (*screw-based*), em êmbolo (*plunger-based*) e em filamento (*filament-based types*). A configuração que recorre ao filamento é o processo mais popular entre as diferentes opções, existindo diversos modelos de impressoras desenvolvidas em torno desta tecnologia (Suwanpreecha & Manonukul, 2022).

2.2.1.3 Desvinculação e sinterização (D&S)

Como mencionado anteriormente, a impressão de filamentos metálicos é muito semelhante à impressão de filamentos poliméricos, no entanto, existem etapas de processamento subsequentes que ditam as práticas necessárias para a produção de peças metálicas de qualidade. Desta forma, é necessário que as peças impressas atravessem os processos de desvinculação e sinterização (D&S).

Os sistemas de ligação da matéria-prima podem influenciar o processo de D&S e a qualidade do componente final e, geralmente, consistem em três partes: polímeros, ceras e aditivos, podendo ser definidos como *core*, *blackbone* e aditivo, respetivamente, identificados pelas diferentes cores na Figura 2.7.

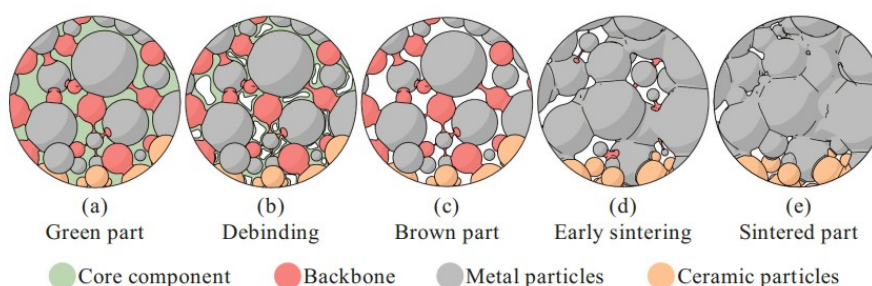


Figura 2.7: Esquema da morfologia da matéria-prima: (a) Componente após a impressão; (b) *Debinding* – decomposição térmica do material aglutinante; (c) *Brown part* – resultado após a desvinculação catalítica; (d) Fase inicial da sinterização – decomposição térmica do *backbone* residual; (e) *White/Metal part* - densificação térmica das partículas de pó metálico (retirado de Armstrong et al. (2022)).

Através de um processo industrial controlado, conhecido como desvinculação catalítica (Figura 2.7 (b)), o sistema de aglutinante polimérico é removido para produzir a peça castanha (*brown part*) (Figura 2.7 (c)). Segundo a BASF, os filamentos metálicos Ultrafuse utilizam sistemas de múltiplos ligantes para garantir a remoção rápida e controlada do material de ligação (Forward AM, 2024c). Este processo é uma estratégia termoquímica, na qual as peças verdes (*green part*) são aquecidas e expostas a ácido nítrico gasoso (HNO_3) numa atmosfera de azoto. Assim, o processo permite a remoção do material ligante rapidamente (cerca de 1 a 2 mm/h para cada superfície externa). Quanto maior for a espessura a peça, maior o tempo sob o processo é necessário. Após a remoção do aglutinante primário, as peças castanhas, geralmente, possuem menor resistência que a peça verde, mas permanecem dimensionalmente estáveis devido ao aglutinante secundário remanescente (Armstrong et al., 2022).

Por fim, a sinterização é um processo realizado numa atmosfera controlada de, por exemplo, hidrogénio puro, que é, utilizado para combinar as partículas metálicas da peça castanha e formar uma massa sólida por meio de calor, sem fundir completamente, e a altas pressões, para preservar a forma da peça, obtendo a peça metálica/branca (*metal/white part*) (Figura 2.7 (d) e (e)). Após a conclusão da sinterização, peça metálica está pronta para ser utilizada ou para prosseguir para as restantes etapas de pós-processamento.

Devido à transição de um estado poroso “castanho” para um estado denso “branco”, as dimensões das peças são reduzidas (Figura 2.8). Essa redução de tamanho é normalmente denominada de contração (*shrinkage*) e deve ser considerada, com extrema relevância, durante a fase de projeto. Segundo a BASF, a contração da peça ocorre à medida que as partículas metálicas individuais se combinam numa massa sólida durante a sinterização.

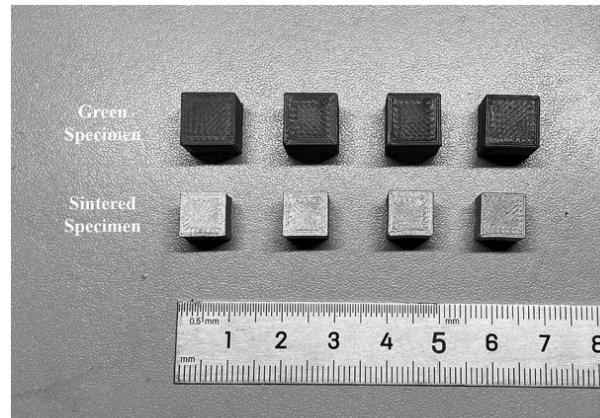


Figura 2.8: Comparação da dimensão entre a peça verde e a branca (retirado de Wang et al. (2023)).

A contração ao longo do eixo Z da impressão é, de forma geral, ligeiramente superior ao dos outros eixos, X e Y, visto que o processo de deposição, camada a camada, origina um fenômeno denominado de contração anisotrópica (Figura 2.9) (Forward AM, 2024c). Adicionalmente, no geral, os parâmetros de impressão possuem maior influência na magnitude da contração relativamente à orientação da peça no processo de D&S. Com estes factos em consideração, torna-se necessário superdimensionar (*scaling*) as peças impressas, com o intuito de garantir que as peças finais permaneçam com as dimensões o mais corretas possíveis.

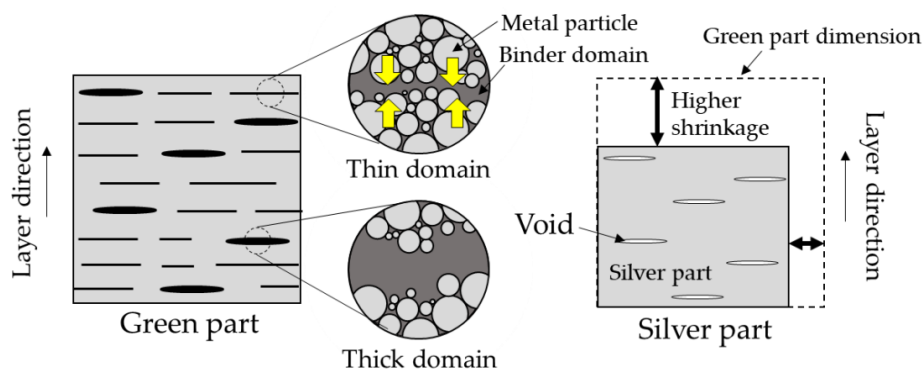


Figura 2.9: Ilustração do mecanismo de contração anisotrópica. Os efeitos do domínio do ligante na contração e geração de vazios nos componentes (retirado de Armstrong et al. (2022)).

Em adição, como acontece nos restantes processos de fabrico por extrusão de filamento, é necessário introduzir estruturas de suporte durante a impressão de zonas salientes ou de outras estruturas horizontais. Não obstante, no caso do fabrico de componentes metálicos, é igualmente fundamental superdimensionar estas estruturas, a fim de se evitar o colapso e garantir a integridade estrutural das peças durante o D&S (Bento, 2022). Assim, para além das peças, todo o design, incluindo as estruturas de suporte e o *raft*, caso exista, necessitam da devida atenção antes da impressão, quer seja ao redimensionar os componentes e estruturas, quer seja ao decidir a integração de elementos adicionais para promover a adesão e estabilidade do modelo durante a impressão.

É ainda de extrema relevância indicar que, o elemento mencionado anteriormente, o *raft*, contribuiu, significativamente, não só para adesão da peça durante a impressão, como no controlo da contração dimensional durante as etapas de D&S. Este componente consiste numa placa com dimensões superiores à peça no plano XY, impressa com poucas camadas antes de se iniciar a impressão do componente (ilustrado na Figura 2.10). Ao finalizar a impressão do *raft*, o segundo bocal de extrusão deposita uma camada de material de suporte entre o mesmo e a peça, desempenhando um papel importante perante as etapas de pós-processamento, visto que o elemento proporcionará uma contração uniforme solidária com a peça, minimizando os fenómenos de distorção e empeno, que podem ocorrer durante estas operações, sendo, assim, designada, muitas vezes, de *shrinkage plate* (Raise3D, 2024a).

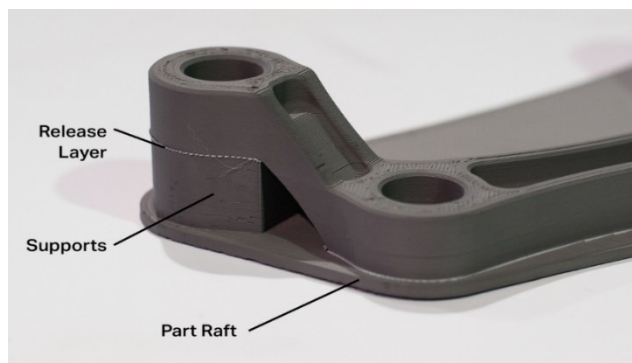


Figura 2.10: Componente na fase castanha e respetivo *raft* (retirado de Markforged (2025)).

2.2.1.4 Restrições e desvantagens

Todavia, é necessário mencionar que todo e qualquer processo apresenta as suas desvantagens, no caso do processo FFF, algumas das principais desvantagens centralizam-se no facto de se necessitar a utilização de um bocal de extrusão especial, composto por rubi ou aço endurecido, visto que a alta fração volumétrica de metal provoca uma elevada taxa de desgaste no bocal, assim, é necessário recorrer a um bocal de extrusão mais resistente, permitindo produzir um fluxo estável de filamento, prolongar a vida útil do mesmo e reduzir a contaminação da matéria-prima. Adicionalmente, este processo requer a produção de um filamento, ou seja, exige equipamentos e conhecimentos técnicos específicos. Desta forma, seleção do tipo de ligante, o procedimento de mistura e a técnica de fabrico do filamento, tornam-se fatores de elevada importância nas propriedades finais das peças impressas e sinterizadas, visto que o filamento não deve apresentar porosidade, deve ter uma forma consistente e distribuição uniforme do pó metálico, incluindo uma carga sólida o mais alta possível para minimizar a redução dimensional (Ait-Mansour et al., 2020).

Além disso, a extrusão por camada tende a criar anisotropia, causada pela introdução de vazios entre cada deposição, o que pode comprometer a adesão entre camadas. Consequentemente, a capacidade mecânica das ligações e, sucessivamente, a resistência da peça é menor perpendicularmente ao plano de deposição do material (Figura 2.11) (Markforged, 2024a). Desta forma, tendencialmente, as forças perpendiculares ao plano de deposição (paralelas à direção de deposição das camadas) fraturarão as peças ao longo da linha das camadas, enquanto as forças paralelas ao plano de impressão, geralmente, distribuem as cargas ao longo do componente.

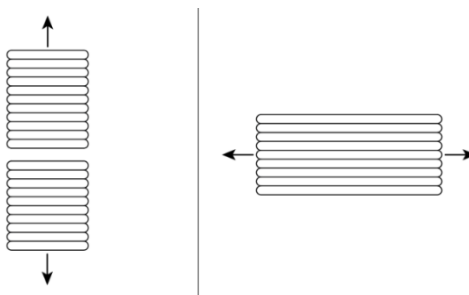


Figura 2.11: Representação da resistência mecânica das peças perante a relação entre a direção do plano de deposição e as forças impostas (retirado de Markforged (2024a)).

A extrusão de filamento metálico produz peças de acabamento superficial mediano devido ao perfil circular do bocal, onde o pó ligado é comprimido e deformado numa forma aproximadamente elíptica contra a camada anterior, ilustrado na Figura 2.12 (a). Assim, as peças incluem, inerentemente, perfis laterais ondulantes e entalhes entre as camadas, que causam concentrações de tensões indesejáveis (Figura 2.12 (b)) (Armstrong et al., 2022).

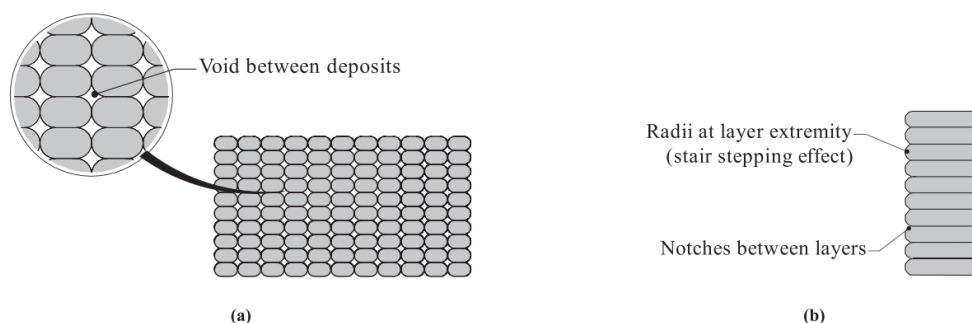


Figura 2.12: (a) Esquema que representa a existência de vazios entre extrusões. (b) Esquema que representa o perfil lateral ondulante e entalhes entre camadas de material extrudido (retirado de Armstrong et al. (2022)).

2.2.2 Fusão Seletiva por Laser (SLM)

A fusão seletiva a laser apresenta elevada versatilidade, ao processar um conjunto alargado de ligas metálicas, viabilizando o fabrico de protótipos com o mesmo material dos componentes finais. Conforme mencionado anteriormente, a construção camada a camada, permite projetar geometrias complexas, características e passagens internas desafiadoras. Desta forma, o SLM possibilita a produção de peças metálicas praticamente densas, adequadas tanto como protótipos funcionais quanto como componentes finais para aplicação industrial (Moreira Montuori et al., 2020).

A fase de impressão do processo de fabrico SLM assenta na deposição de camadas finas de pó metálico que são distribuídas uniformemente, por um mecanismo de recobrimento (lâmina ou rolo), numa placa de substrato fixada a uma plataforma de indexação que se movimenta no eixo vertical (Z). Todo este processo ocorre dentro de uma câmara com uma atmosfera controlada de gás inerte, habitualmente argônio ou azoto, com níveis de oxigênio extremamente reduzidos (Figura 2.13) (Gao et al., 2023). Após a completa distribuição de cada camada, a mesma é fundida pela fonte de energia de alta potência. O feixe de laser é suficientemente intenso e concentrado para permitir a fusão total das partículas, formando uma estrutura sólida. O processo é repetido camada após camada até que a peça esteja completa (AM Material, 2023a).

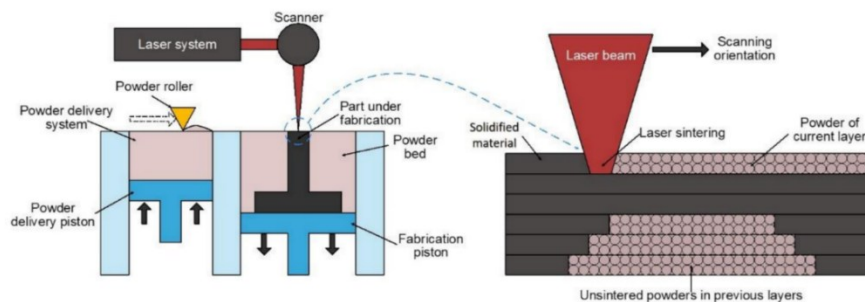


Figura 2.13: Ilustração esquemática do processo SLM (retirado de Ansari et al. (2021)).

Algumas das ligas disponíveis para o processo incluem o aço inoxidável AISI 316L, AISI 304, C47, F53, H13, 17-4 PH e 15-5, cobalto-cromo, inconel 625 e 718, ligas à base de cobre, alumínio AlSi10Mg e titânico Ti-6Al-4V (AM Material, 2023b).

Apesar dos grandes sucessos e do elevado conhecimento sobre o SLM, o processo, muitas vezes, resulta em defeitos microestruturais que podem afetar negativamente a funcionalidade e resistência geral da peça fabricada. Dois dos defeitos mais comuns incluem a carência de fusão (LOF, *lack of fusion*) ou a produção de fraturas nas regiões solidificadas. A LOF envolve a captura de gás dentro da estrutura, estes defeitos podem ocorrer devido à inadequação dos parâmetros de impressão (potência do laser, velocidade de impressão, entre outros), que promovem a insuficiente fusão do material impedindo o desenvolvimento de uma ligação forte aquando da solidificação (Zhang et al., 2017). O aparecimento de fraturas tende a ocorrer quando a baixa condutividade térmica e o alto coeficiente de expansão térmico geram tensões internas extremas, quebrando as ligações dentro do material (Dubrov et al., 2019). Contudo, as propriedades mecânicas das peças fabricadas por SLM, nos diferentes materiais, são, no geral, superiores àquelas produzidas por FFF (Gong et al., 2019). Assim, os componentes, produzidos por esta tecnologia, apresentam elevada importância para medir o progresso evolutivo das propriedades mecânicas de componentes metálicos produzidos por FFF.

2.3 Parâmetros de impressão e propriedades mecânicas do FFF

Numa primeira instância, a presente secção introduzirá e esclarecerá os diferentes parâmetros de impressão avaliados, tentando ilustrar, da melhor forma possível, o impacto e presença dos mesmos no processo de fabrico. Em segundo lugar, esta secção tem, igualmente, como objetivo reagrupar e sintetizar as principais conclusões e resultados de diversos estudos realizados sobre a extrusão do filamento Ultrafuse 316L (Forward AM, 2024a), priorizando a análise dos diferentes parâmetros de impressão e os respetivos efeitos nas propriedades mecânicas dos provetes e peças produzidos. Adicionalmente, serão reagrupadas as propriedades mecânicas de provetes, do mesmo material, produzidos por SLM, com o intuito de averiguar a veracidade e fidelidade dos resultados experimentais deste estudo.

2.3.1 Parâmetros de impressão

Dominar a infinidade de configurações e parâmetros de impressão 3D é a base crucial para conseguir garantir que cada trabalho, não só seja bem-sucedido, como também atinja o resultado desejado com elevado rigor. Desta forma, serão apresentados os diferentes parâmetros de impressão sobre os quais o operador possuiu controlo e que influenciam diretamente as propriedades mecânicas das peças metálicas finais (as recomendações

apresentadas referem-se exclusivamente ao material Ultrafuse 316L (Forward AM, 2024a; Forward AM, 2024c), fornecidas pela respectiva empresa produtora). Os parâmetros seguintes serão apresentados sem ordem particular, iniciando com (Raise3D, 2024a; Raise3D, 2024e):

- **Temperatura:** As configurações de temperatura na impressão 3D são fundamentais, possuindo impacto desde o fluxo do material até à aderência entre as camadas depositadas. Os dois parâmetros de temperatura – plataforma de construção e bocal de extrusão – devem ser cuidadosamente gerenciados para evitar falhas na impressão. A temperatura da plataforma/mesa de construção é um equilíbrio delicado, visto que, caso esteja muito quente, existe a possibilidade de as peças deformarem e, por outro lado, se estiver muito fria, as mesmas podem empenar (*warp*) ou soltar-se a meio da impressão. Adicionalmente, a temperatura do bocal de extrusão regula como o filamento funde e flui, pois, cada material possuiu a faixa ideal de temperatura, fazendo com que, caso a temperatura seja muito alta, o material possa queimar ou extrudir excessivamente e, se for muito baixa, a extrusão do mesmo não será a mais correta, podendo obstruir os canais de extrusão. Regra geral, manter as temperaturas dentro das margens indicadas pela empresa fornecedora da matéria-prima e/ou da impressora é eficaz e mitiga o aparecimento de defeitos. Exemplificando, a BASF, para o material Ultrafuse 316L (Forward AM, 2024c), recomenda que a temperatura da mesa se mantenha entre os 90-105 °C e a temperatura do bocal permaneça dentro de 230-250 °C.
- **Largura da parede externa (*shell*):** A largura das paredes externas é fundamental para a integridade estrutural e qualidade superficial dos objetos impressos. A largura ideal deve ser múltipla da dimensão do bocal de extrusão, garantindo uma extrusão uniforme. Desta forma, caso o bocal possua um diâmetro de 0,4 mm (dimensão mais comum) a largura selecionada para a parede deve respeitar esta dimensão, assim, se, por exemplo, for selecionada uma dimensão total de 0,8 mm, a impressão realizar-se-á em duas passagens. Geralmente, para facilitar a designação da dimensão total da parede externa, este parâmetro é indicado como o valor da quantidade de passagens a serem realizadas (Figura 2.14 (a) e (b)). O aumento do número de camadas implica a utilização de maiores quantidades de material e, consecutivamente, maiores tempos de impressão, sendo necessário encontrar o equilíbrio entre as propriedades mecânicas e a eficiência da impressão. A BASF (Forward AM, 2024c) recomenda, no mínimo, o uso de uma parede externa com a largura igual ao diâmetro do bocal de extrusão, além disso, a empresa alerta sobre o uso de demasiadas camadas externas, o que pode resultar na separação das mesmas após o D&S.

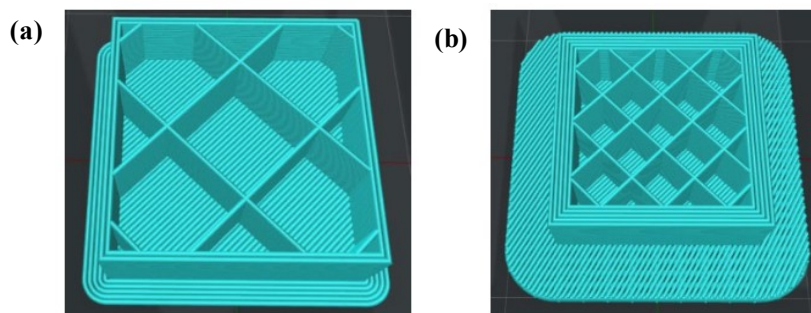


Figura 2.14: Projetos dentro do programa IdeaMaker da Raise3D: (a) Cubo com duas camadas externas, 10% *infill* e apenas o brim; (b) Cubo com cinco camadas externas, 20% *infill* e apenas o *raft* (retirado de Raise3D (2024e)).

- **Preenchimento (*infill*):** O preenchimento é a estrutura interna das peças impressas. Ajustar a densidade e o padrão do preenchimento permite atender às necessidades específicas sem alterar a aparência externa do

componente. Além disso, o ajuste possibilita salvar material, acelerar o processo de fabricação e modificar as propriedades mecânicas do mesmo. A densidade do preenchimento (Figura 2.14 (a) e (b)) é expressa em porcentagem, indicando quanto do volume interno é preenchido com material, desta forma, 0% indica que o objeto é oco e, naturalmente, 100% indica que o componente é sólido. Como será avaliado posteriormente, tudo indica que, quanto maior for a densidade, melhores são, no geral, as propriedades mecânicas dos componentes. O estudo da densidade de preenchimento é importante, dado que permite identificar um equilíbrio entre a massa do componente e a resistência mecânica do mesmo. Por outro lado, o padrão de preenchimento (Figura 2.15) refere-se à geometria interna do componente, desempenhando um papel significativo nas propriedades finais da impressão. Todavia, segundo a BASF (Forward AM, 2024c), no estudo de componentes densos, o padrão de preenchimento recomendado é o linear, podendo alterar-se a angulação da deposição entre camadas (as estratégias mais comuns são: 0°, 90°, 0°/90° e 45°/-45°). Além disso, a mesma recomenda que o preenchimento seja de 105%, com o intuito de existir material suficiente para compreender as possíveis lacunas entre deposições.

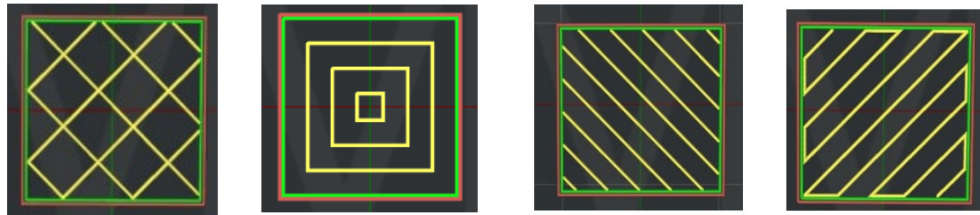


Figura 2.15: Alguns exemplos de diferentes padrões de preenchimento: Grade, concêntrico, linear e retilíneo, respectivamente (retirado de Raise3D (2024e)).

- **Largura da camada superior/inferior:** A determinação da largura da camada superior/inferior é o parâmetro que define a dimensão das camadas mais altas e mais baixas da impressão, funcionando como uma barreira que envolve a estrutura interna. As camadas desempenham um papel fundamental na durabilidade e suavidade das superfícies da peça. No caso de componentes que possuam camadas externas, este parâmetro é importante na aglomeração do material do preenchimento e das camadas externas. Por outro lado, caso se defina uma peça sem camadas externas, este parâmetro torna-se um fator significativo na proteção do material interno.
- **Altura da camada:** Este parâmetro determina a espessura de cada camada, estando diretamente relacionado com a qualidade superficial e o tempo de impressão (Figura 2.16). Normalmente, o fator varia entre 10% a 75% do diâmetro do bocal, sendo que, dimensões inferiores promovem a suavidade dos detalhes e das superfícies das peças, e dimensões superiores diminuem o tempo de impressão. A seleção do valor é uma decisão estratégica baseada no equilíbrio desejado entre a qualidade e o tempo de impressão. Contudo, como será avaliado posteriormente, estudos recentes indicam que este parâmetro possuiu elevada influência sobre as propriedades mecânicas finais. A empresa BASF (Forward AM, 2024c) recomenda que a altura da camada permaneça entre 0,10 e 0,25 mm, não ultrapassando 60% da dimensão do bocal de extrusão.

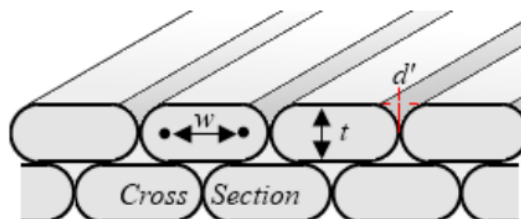


Figura 2.16: Representação da altura/espessura (t) e largura (w) das camadas depositadas (retirado de Steuben et al. (2015)).

- **Taxa de deposição (*flow rate*):** O parâmetro define o volume de filamento extrudido durante a impressão. Garantir o correto volume de deposição garante que o filamento flui de maneira consistente e precisa, impactando a integridade estrutural e o acabamento superficial da impressão. A BASF (Forward AM, 2024c) sugere um valor máximo de 25 cm³/h, no entanto, referem que, para o bocal de 0,4 mm, é essencial selecionar taxas inferiores.
- **Velocidade de impressão (*feed rate*):** O parâmetro define a velocidade de deslocação da cabeça de impressão enquanto deposita o filamento. A velocidade de impressão afeta a aparência das camadas, a resistência do componente, o tempo de impressão e a probabilidade de surgirem erros durante a mesma. Uma impressão acelerada pode resultar na subextrusão, onde é depositado filamento insuficiente, causando camadas fracas e promotoras de fraturas. Por outro lado, se a velocidade de impressão for insuficiente, a impressão pode ficar extremamente lenta, prejudicando a eficiência do tempo de impressão. Contudo, para detalhes complexos, reduzir a velocidade pode ajudar a capturar as nuances do design. A BASF (Forward AM, 2024c) recomenda uma velocidade de impressão de 25 mm/s, indicando, expressamente, que reduzir a velocidade da impressão pode proporcionar resultados melhores.
- **Retração:** A retração é o parâmetro essencial projetado para combater um dos problemas mais comuns da impressão 3D: a formação de fios (*stringing*). Quando a cabeça de impressão, sem extrusão, move-se entre secções, o filamento pode fluir pelo bocal, deixando fios que podem danificar a superfície da peça, assim, a retração opera ao recuar o filamento pelo mesmo caminho no qual é extrudido, evitando deposições indesejadas. Desta forma, é essencial configurar as propriedades da retração, especialmente a distância e a velocidade da mesma, ou seja, configurar o quão longe o filamento é puxado e a velocidade na qual isso ocorre, respetivamente. É recomendado, pela BASF (Forward AM, 2024c), que a distância de retração seja de 1,5 mm para impressoras de extrusão direta e que a velocidade de retração seja de 45 mm/s.
- **Aderência:** A aderência à mesa de impressão é um desafio comum na impressão 3D, onde as peças, por vezes, soltam-se da base durante o processo de impressão ou aderem demais e ficam difíceis de remover. Desta forma, ajustar o nível de aderência garante que a peça permaneça no lugar durante todo o processo de impressão, resultando num produto final bem-sucedido e de fácil acesso. Para colmatar este problema, são empregadas várias técnicas, sendo estas: *Skirt* – Trata-se de uma ou mais linhas de filamento impressas ao redor do objeto, sem conexão ao mesmo, com o intuito de preparar o bocal e garantir o fluxo constante do filamento antes de começar a impressão real (Figura 2.17 (a)); *Brim* – Consiste na impressão de linhas extras de filamentos ao redor da base do objeto, conectadas às bordas do mesmo, permitindo o aumento da área de contacto da primeira camada com a mesa de impressão, aperfeiçoando a aderência e evitando deformações em peças com uma base pequena (Figura 2.17 (b)); *Raft* – Esta estrutura é uma rede espessa e plana de filamento que é colocada primeiro e o componente é impresso sobre a mesma (Figura 2.17 (c)). O *raft* oferece excelente aderência e uma superfície nivelada, especialmente para peças com bases irregulares. Este componente pode reduzir significativamente as deformações, mas consome mais filamento e pode deixar a superfície inferior da impressão com uma rugosidade superficial diferente das outras fases. Adicionalmente, a BASF (Forward AM, 2024c) recomenda a utilização de colas que permitem obter maior aderência e facilidade ao retirar os componentes (colas hidrossolúveis, como, por exemplo, Magigoo *glue* (Magigoo, 2024)). Cada método possui as suas aplicações específicas e podem ser a chave para resolver os problemas relacionados à aderência à mesa de impressão.

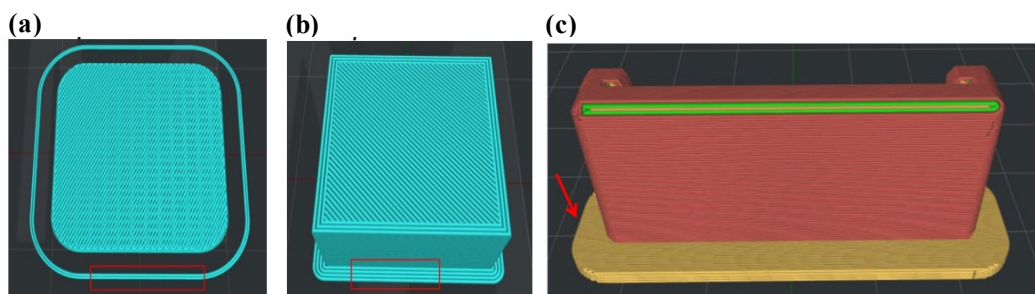


Figura 2.17: Ilustração do (a) *skirt*, (b) *brim* e (c) *raft*, respectivamente, no *slicer* IdeaMaker da Raise3D (retirado de Raise3D (2024e)).

- Orientação da impressão:** A orientação de impressão refere-se à forma em que o modelo é posicionado na plataforma de impressão e é um fator crítico para determinar a resistência mecânica, a velocidade de impressão e a qualidade superficial do produto final. A orientação adequada pode minimizar a necessidade de suportes, reduzir o tempo de impressão e garantir a melhor resistência possível ao longo do eixo desejado. Com isto em mente, existem quatro opções para a orientação das peças impressas em 3D (Figura 2.18 (a)): (1) Vertical (*upright*) – O objeto é impresso em pé. Esta estratégia tende a exigir estruturas de suporte evidentes, que podem deixar marcas e exigir pós-processamento; (2) Horizontal (*flatwise*) – O objeto é impresso deitado na plataforma de construção. Esta estratégia reduz, em geral, a necessidade de estruturas de suporte, resultando em uma superfície mais lisa onde o objeto entra em contacto com a plataforma; (3) Diagonal – O objeto é impresso em um ângulo em relação à plataforma de construção, por exemplo, de lado (*sideways*). Geralmente, é a estratégia que permitir imprimir geometrias complexas, realizando um compromisso entre as orientações vertical e horizontal; (4) Personalizada – Dependendo da complexidade do modelo e dos requisitos específicos, é possível que exista a necessidade de definir uma orientação própria para o componente a imprimir. Para além disso, existe a possibilidade de imprimir os provetes numa determinada orientação, mas em diferentes direções de deposição (Figura 2.18 (b)). Contudo, não existem resultados conclusivos sobre a influência deste parâmetro nos provetes.

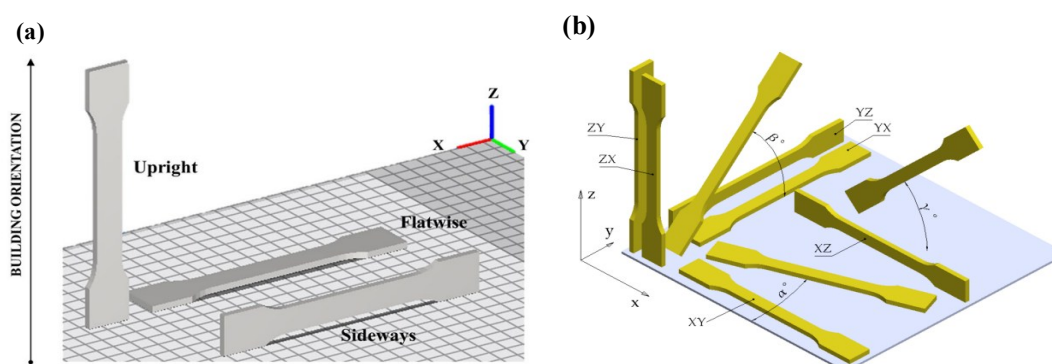


Figura 2.18: (a) Orientação das peças impressas em 3D (retirado de Pellegrini et al. (2022)); (b) Possíveis direções de impressão para diferentes orientações, por exemplo, peça impressa na horizontal (*flatwise*) na direção X e Y (provetes XY e YX, respectivamente) (retirado de Cojocar et al. (2022)).

- Diâmetro do bocal e largura de deposição (*raster width*):** O diâmetro do bocal de extrusão e a respetiva largura de deposição (Figura 2.16), são parâmetros fundamentais e interligados que influenciam diretamente a resolução das impressões e o tempo total de impressão. O tamanho do bocal mais comum é 0,4 mm,

oferecendo um bom equilíbrio entre os detalhes e o tempo de impressão, consecutivamente, é recomendado que a largura de deposição seja igual ou $\pm 10\text{-}20\%$ à dimensão do mesmo, dependendo das características de impressão requeridas.

- **Sobreposição (*overlap*):** O parâmetro refere-se à percentagem de sobreposição entre o preenchimento e as paredes externas. Esta configuração é crucial para garantir uma superfície externa suave e evitar vazios entre os mesmos. A empresa BASF (Forward AM, 2024c) recomenda utilizar um *overlap* de 20-35% para assegurar a melhor qualidade possível.
- **Contração e fator de escala (*shrinkage & scaling*):** Como explicado anteriormente, as partículas de metal, ao se agruparem durante o processo de sinterização, provocam a contração (equação (1)) das peças. Para prevenir a alteração indesejada das dimensões, introduzem-se fatores de escala (equação (2)) ao design dos componentes e estruturas auxiliares, com o intuito de aumentar previamente a dimensão dos mesmos (equações retiradas da secção 4 (Shrinkage & Oversizing Factor) do documento Ultrafuse Metal User Guideline (Forward AM, 2024c)). Segundo a BASF (Forward AM, 2024c), a média da contração, no eixo X e Y, é de 16,6% e, no eixo Z, é de 19,3%, desta forma, os fatores de escala recomendados são 120% e 124%, respetivamente.

$$\text{Contração (\%)} = \left(1 - \frac{L_s}{L_g} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Fator de escala (\%)} = \left(\frac{L_g}{L_s} \right) \times 100 \quad (2)$$

- L_s = Comprimento da secção da peça sinterizada (mm)
- L_g = Comprimento da secção da peça verde (mm)

Por fim, após o esclarecimento dos diferentes parâmetros de impressão, dos respetivos efeitos e de alguns valores recomendados para os mesmos, a Tabela B.1, em anexo, sintetiza todos estes dados, para facilitar a revisão dos parâmetros.

2.3.2 Propriedades mecânicas

Após a apresentação dos parâmetros de impressão e antes de verificar as descobertas de alguns estudos científicos relativamente às propriedades mecânicas, é relevante identificar os valores normalizados para as mesmas. Tendo em conta que o processo FFF não possui atualmente normalização neste setor, a melhor estratégia será comparar os dados obtidos com os valores regularizados para as tecnologias MIM e SLM.

A Tabela C.1, em anexo, reúne os valores mínimos padronizados de diferentes propriedades mecânicas, associadas ao material 316L, para os processos de fabrico MIM (MPIF, 2024; ISO, 2012; Forward AM, 2024d) e SLM (SLM Solutions Group AG, 2023), e, além disso, exibe os valores para o material bruto (ASM International, 2024), utilizado em processos tradicionais, e os dados providenciados pela fornecedora do filamento metálico utilizado neste estudo (Forward AM, 2024d).

2.3.2.1 Precisão dimensional, exatidão dimensional e contração

A presente secção analisa a influência dos diferentes parâmetros de impressão nas primeiras duas características apresentadas, a precisão e exatidão dimensional (Tabela C.2, em anexo) e a contração (Tabela C.3,

em anexo). A precisão e exatidão dimensional é a designação fornecida à repetibilidade e proximidade dimensional entre o modelo 3D e a peça metálica final, ou seja, são comparadas as medições dos componentes metálicos e as medidas pré-impostas pelo modelo 3D. O confronto entre as medições das peças verdes e das peças brancas é designado de contração (*shrinkage*), como anteriormente explicado. A avaliação, de ambas as propriedades, é determinante para o desenvolvimento da tecnologia estudada, visto que o correto dimensionamento dos componentes é a base de qualquer tecnologia de produção, sendo essencial compreender a influência dos parâmetros de impressão.

O estudo de Gong et al. (2019) identificou que, apesar da evidente contração após o processo de sinterização, a peça metálica manteve todas as características gerais, além disso, as áreas de interesse (FOI's) produzidas (estruturas de geometrias diferentes, em posições distintas, com o intuito de avaliar as características pontuais de cada uma) preservaram a configuração geométrica inicial, indicando o sucesso da produção de peças metálicas com a extrusão de filamento fundido, desde que a contração seja compensada durante a impressão de peça verde (Tabela C.3– N°7). Adicionalmente, o mesmo trabalho identificou que a contração no plano XY foi ligeiramente influenciada pelo nível do eixo Z, ou seja, observaram que as características posicionadas em níveis mais baixos do eixo Z tendem a encolher menos do que em níveis mais altos, no entanto, foram observadas maiores variações de profundidade nos níveis mais baixos do eixo Z. Como previsto por outros trabalhos, a taxa de contração nesse mesmo eixo é, no geral, superior à do plano XY.

O trabalho de Wang et al. (2023), que tinha como objetivo verificar a influência de alguns parâmetros de impressão nas propriedades das peças impressas, verificou que a espessura da camada é o fator mais crítico na exatidão dimensional. A menor margem de erro ocorre com uma espessura de 0,1 mm, devido à promoção da adesão entre cada camada, desenvolvendo menores tensões internas. À medida que a espessura aumenta, o efeito da compactação do bocal diminuiu, resultando num maior erro dimensional, especialmente nos eixos X e Y. Suplementarmente, avaliaram que o impacto do ângulo de deposição, da largura da camada e da densidade do infill foi relativamente reduzido na exatidão dimensional. As três propriedades afetam diretamente a estrutura interna nas peças, mas não o perfil de impressão, mantendo a exatidão elevada (superior a 99,6%). A influência das variáveis foi, negativamente, superior no eixo Z, devido à sobreposição dos filamentos (Tabela C.2– N°5). Adicionalmente, verificaram que o rigor no eixo Z é influenciado por mais fatores que os outros dois eixos, como, por exemplo, pela altura e desgaste do bocal, tornando difícil alcançar dimensões precisas, sendo difícil identificar um padrão claro de melhoria entre os parâmetros estudados. Contudo, para os eixos X e Y, verificou-se um padrão para a densidade do preenchimento, quanto maior for a densidade, menor as dimensões dos poros e mais limitado fica o fluxo do filamento, levando a uma melhoria na exatidão dimensional.

Por fim, o estudo identificou que, durante a sinterização, a contração foi de 18,87% nas direções X e Y e de 19,66% na direção Z (Tabela C.3 – N°5). Estes valores são congruentes com estudos anteriores (Tabela C.3), representando um comportamento anisotrópico de contração. Diversos estudos (Wang et al., 2023; Kurose et al., 2020; Tosto et al., 2021) apontam que este comportamento resulta da orientação dos domínios do aglomerante, perpendicular à direção da camada, o que aumenta a distância média entre partículas metálicas nessa direção, levando a uma maior contração durante a sinterização. As distâncias excessivas entre as partículas metálicas na direção da camada impedem a sinterização, resultando em vazios. Em suma, a estrutura das camadas e o efeito da

gravidade durante o processo de sinterização, fazem com que os provetes no eixo Z, em qualquer orientação de impressão, contraíam mais do que os outros eixos.

2.3.2.2 Densidade/porosidade

A densidade/porosidade (Tabela 2.2 e Tabela C.4, em anexo) é uma das característica mais estudadas da tecnologia FFF, visto que, muitas vezes, as fraturas, falhas e propriedades mecânicas dos componentes estão diretamente relacionadas com a densidade dos mesmos. O tamanho, a distribuição e o formato dos poros são as características que, quanto maiores e mais irregulares forem, menor é a resistência mecânica dos provetes, dado que a concentração de tensões, associadas à formação de poros, deteriora as propriedades dos mesmos (Wang et al., 2023). É importante realçar que nos diferentes estudos, geralmente, a densidade e porosidade são avaliadas como fatores percentuais em relação a uma densidade típica, sendo esta, normalmente, 7,98 g/cm³. Além disso, muitos estudos, designam a porosidade como o valor percentual em falta para que a densidade do componente atinja o valor típico (princípio de Arquimedes, equação (3)), ou seja, se indicarmos que a porosidade relativa é de 3%, isto significa que a densidade relativa é de 97% e, consecutivamente, o valor da densidade é de 7,74 g/cm³. Até que seja dito o contrário, a presente avaliação seguirá a mesma estrutura de pensamento.

$$p = \frac{\rho_c - \rho_t}{\rho_c} * 100\% \quad (3)$$

- p – porosidade [%];
- ρ_c – densidade convencional do material [g/cm³];
- ρ_t – densidade do material em teste [g/cm³].

Tabela 2.2: Densidade/Porosidade (parte 1).

Parâmetros de impressão		Propriedades mecânicas					
Tabela C.8 – N.º 2 (Suwanpreecha & Manonukul, 2022)		7,780 ± 0,040 g/cm ³					
Tabela C.8 – N.º 10 (Pellegrini et al., 2022)	Provete Tração Horizontal	2 camadas		7,100 g/cm ³			
		4 camadas		7,100 g/cm ³			
		6 camadas		6,900 g/cm ³			
	Provete Tração Vertical	2 camadas		7,000 g/cm ³			
		4 camadas		6,450 g/cm ³			
		6 camadas		6,900 g/cm ³			
	Provete Tração de Lado	2 camadas		7,000 g/cm ³			
		4 camadas		6,850 g/cm ³			
		6 camadas		6,800 g/cm ³			
Tabela C.8 – N.º 4 (Wang et al., 2023)	N.º	Layer height (mm)	Infill direction	Line width (mm)	Infill density	Porosidade relativa	Densidade
	1	0,1	+45°/-45°	0,40	100%	3,06%	7,736 g/cm ³
	4	0,4	+45°/-45°	0,40	100%	8,32%	7,316 g/cm ³
	5	0,1	0°	0,40	100%	2,66%	7,768 g/cm ³
	6	0,1	90°	0,40	100%	2,16%	7,808 g/cm ³
	10	0,1	+45°/-45°	0,45	100%	4,96%	7,584 g/cm ³
	11	0,1	+45°/-45°	0,40	70%	16,04%	6,700 g/cm ³
Tabela C.8 – N.º 5 (Wang et al., 2023)	N.º	Layer height (mm)	Infill direction	Line width (mm)	Infill density	Porosidade relativa	Densidade
	1	0,1	+45°/-45°	0,40	100%	2,88%	7,750 g/cm ³

O trabalho de Wang et al. (2023) verificou o impacto de diferentes parâmetros de impressão na densidade e microestrutura dos provetes de tração desenvolvidos. Em primeiro lugar, ao avaliar o efeito da altura da camada nos provetes verdes, verificaram que à medida que a mesma aumenta, a compactação do bocal sobre o filamento fundido diminuiu, fazendo com que o filamento mantivesse a sua forma extrudida, enfraquecendo a ligação entre as camadas. Consecutivamente, isto resultou na formação de longos poros, semelhantes a rachaduras, ao longo da direção de impressão, que, naturalmente, evoluíram para poros de formato irregular durante a sinterização. Desta forma, a porosidade relativa mais baixa, para uma altura de 0,1 mm, foi de 3,06% e, para a maior altura (0,4 mm), foi de 8,32% (Tabela 2.2 - N.º 4).

Em seguida, ao averiguar o efeito do ângulo de deposição, verificou-se que, apesar do provete de 0° apresentar maior densidade perante os provetes de 0°/90° e +45°/-45°, a organização dos poros (distribuição contínua e irregular ao longo da secção transversal) levou a que este provete apresentasse a pior resistência à tração. Contudo, o provete de 90° (porosidade relativa de 2,16%), com os poros dispostos longitudinalmente, obteve o maior alongamento à tração (as restantes propriedades foram dominadas pelo provete +45°/-45°, com uma porosidade relativa de 3,06% (altura da camada – 0,1 mm; largura da camada – 0,4 mm; *infill* – 100%)) (Tabela 2.2 - N.º 4). Este comportamento indica que, a distribuição dos poros possuiu um efeito significativo sobre as propriedades mecânicas dos provetes, dependendo da orientação do esforço, assim, os poros distribuídos perpendicularmente à direção de tração promovem a ampliação de certas propriedades, tais como, por exemplo, o alongamento à fratura.

Suplementarmente, como verificado na análise dimensional, quando a largura da camada corresponde ao diâmetro do bocal, neste caso, de 0,4 mm, a extrusão é mais estável, resultando numa melhor adesão entre as deposições adjacentes e maior é a respetiva densidade. Assim, Wang et al. (2023) verificaram que, quando selecionadas larguras inferiores ou superiores ao bocal de extrusão, surgiram problemas como a subalimentação ou superalimentação do filamento fundido, originando poros de dimensões inconsistentes e enfraquecendo a ligação entre deposições.

Da mesma forma, ao analisar o impacto da densidade de preenchimento, verificaram que valores menores proporcionam maior porosidade, obtendo diferenças significativas entre provetes. O aumento da densidade de preenchimento resulta numa extrusão mais compacta, originando poros menores e facilmente elimináveis durante o processo de sinterização, por outro lado, valores menores promoveram camadas incapazes de suportarem adequadamente o novo filamento depositado, ocorrendo fluxos descendentes, sob efeito da gravidade, e a formação de poros irregulares.

Adicionalmente, os mesmos trabalhos, ao analisarem os provetes cúbicos por estes produzidos, verificaram que, a melhor configuração dos parâmetros de impressão (altura da camada – 0,1 mm; largura da camada – 0,4 mm; *infill* – 100%; Deposição – +45°/-45°), proporcionou o fabrico de provetes com uma densidade relativa de 97,12%, ou seja, 2,88% de porosidade após o D&S (Tabela 2.2 - N.º 5). Estes valores são congruentes com outros inúmeros estudos (Tabela C.4). Todavia, é necessário compreender que a densidade pode variar significativamente, não só com os parâmetros de impressão, mas também com os equipamentos utilizados, incluindo a impressora, as máquinas e o processo de D&S e o filamento, tornando-se bastante difícil generalizar os parâmetros de impressão para obter a melhor densidade possível.

À semelhança da análise desenvolvida neste trabalho, o estudo de Pellegrini et al. (2022), investigou o efeito do número de camadas e da orientação de impressão na densidade dos provetes. Naturalmente, existiu uma variação significativamente entre os diferentes provetes analisados, mesmo dentro do grupo que seriam, teoricamente, idênticos, resultado da anisotropia do processo de fabrico. Todavia, ao analisarem todos os provetes, os autores verificaram que, para os provetes verticais, os de quatro camadas atingiram as densidades mais baixas ($6,45 \text{ g/cm}^3$). Em seguida, foi possível identificar que os provetes de 6 camadas detiveram, na generalidade, densidades inferiores aos provetes de 2 camadas, justificável pelo efeito de delaminação (separação entre camadas) (Figura 2.19), que, consequentemente, reduz a densidade do componente. Desta forma, concluíram que o conjunto de provetes com maior densidade e repetibilidade, neste fator, foram os componentes impressos horizontalmente (deitados) com 2 camadas externas (cerca de $7,10 \text{ g/cm}^3$).

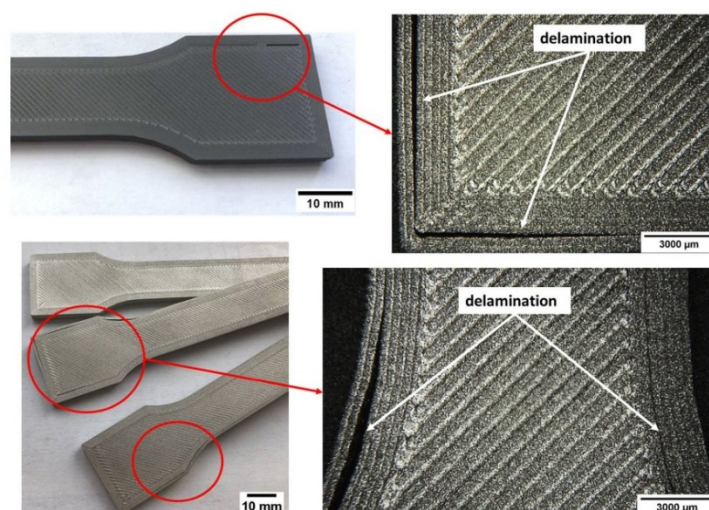


Figura 2.19: Efeito de delaminação nos provetes verdes e brancos (retirado de Pellegrini et al. (2022)).

Por fim, ao comparar os diferentes resultados com os provetes de outras tecnologias, o estudo de Suwanpreecha & Manonukul (2022), verificou que, geralmente, os provetes produzidos por extrusão de filamento metálico apresentam uma ligeira vantagem em relação ao MIM. As macro e microestruturas de ambos revelam porosidade arredondada uniformemente distribuídas, defeitos típicos e inclusões específicas, no entanto, o MIM apresenta contaminação por inclusões de Si-O, devido ao processo de atomização, resultando numa densidade relativamente inferior.

2.3.2.3 Rugosidade superficial

Os resultados do estudo de Suwanpreecha & Manonukul (2022) demonstram que os provetes de tração do FFF apresentam superfícies significativamente mais rugosas (Tabela C.5, em anexo) em comparação com os provetes de MIM, com a topologia da superfície a refletir os caminhos de impressão e as características das camadas. A rugosidade média (R_a) é mais elevada para as superfícies superiores, seguida das superfícies laterais e, por fim, inferiores. Este estudo indica que a qualidade superior das superfícies apoiadas ocorre porque, durante a impressão, o material extrudido é fortemente pressionado contra a base, originando superfícies mais regulares. Da mesma forma, a rugosidade da superfície lateral é influenciada pela pressão das camadas superiores, enquanto a superfície superior encontra-se livre no final da impressão.

Por fim, o estudo verifica que, não existindo diferença significativa na dimensão dos grãos entre as duas tecnologias, a qualidade superficial é o fator determinante pelas diferenças na resistência à fadiga entre o FFF e o MIM. Assim, observaram que os provetes FFF, devido à maior capacidade plástica, possuem maior resistência à fadiga de baixos ciclos (LCF, menor que 10^5 ciclos), por outro lado, na fadiga a elevado número de ciclos (HCF, superior a 10^5 ciclos), os provetes MIM mostram melhores resultados, pois, o começo e propagação das fendas ocorre em entalhes leves nos cantos externos do provete, proporcionando elevada resistência ao longo de um elevado número de ciclos.

2.3.2.4 Dureza

A dureza indica a capacidade de um material resistir à deformação plástica localizada. Um material mais duro, geralmente, possui maior resistência à deformação permanente, estando associado a uma maior durabilidade, alta resistência a riscos, desgaste e impactos, tornando-o adequado para o uso em componentes mecânicos, estruturais e industriais. Tendo em consideração que o material estudado possuiu o intuito de ser introduzido nessas mesmas aplicações, o valor da dureza é um bom indicativo da viabilidade dos componentes (Tabela C.6, em anexo). No entanto, quando a dureza é muito elevada, a ductilidade do material é reduzida, e a fragilidade torna-se dominante.

O estudo de Gong et al. (2019) verificou que a dureza dos provetes FFF é relativamente inferior às dos provetes SLM e MIM. O resultado de 107 HV é inferior a todos os valores típicos apresentados na Tabela C.6, consecutivamente, no caso do provete analisado neste estudo, as propriedades à tração foram significativamente inferiores.

Todavia, a análise realizada por Wagner et al. (2022), permitiu verificar a irregularidade do valor da dureza ao detetar a presença de diferentes fases/precipitados na superfície do material. A dureza variou de acordo com o precipitado ou poro detetado, no entanto, apuraram que grande parte da superfície do componente apresentou uma dureza média de 2,6-3,6 GPa (265-367 HV). O estudo, tendo obtido valores relativamente elevados nas superfícies avaliadas, averiguou as respetivas propriedades mecânicas à tração, tendo obtido valores consideravelmente elevados, tanto para a tensão de rotura (561 ± 10 MPa), como para o alongamento à fratura ($64 \pm 2\%$). Este e outros estudos, como, por exemplo, o estudo de Raza et al. (2024), indicam que os parâmetros dos processos de D&S são alguns dos principais fatores pela dureza, porosidade e densidade dos materiais. Consecutivamente, o estudo anteriormente mencionado, verificou que a dureza das peças sinterizadas a vácuo foi, significativamente, superior às peças sinterizadas em argónio, nas mesmas condições de sinterização, tendo obtido um valor máximo de 200 HV e 177 HV, respetivamente.

2.3.2.5 Propriedades à tração

Como mencionado anteriormente e verificado por diversos estudos (Tabela 2.3 e Tabela C.7, em anexo), de forma geral, os componentes de aço inoxidável 316L fabricados por FFF exibem propriedades mecânicas inferiores em comparação com os provetes, do mesmo material, fabricados por SLM ou por tecnologias convencionais. Especialmente, algumas propriedades associadas à tração, ou seja, a tensão limite de elasticidade (*Yield strength*, YS), a tensão de rotura (*Ultimate strength*, UTS) e o módulo de Young (*Young's modulus*, E). Gong et al. (2019) atribuíram a responsabilidade deste comportamento à microestrutura austenita, aos grãos equiaxiais e à influência direta da porosidade. Estes fatores tendem a prejudicar as propriedades gerais e a

ductilidade do material, ao proporcionar o desenvolvimento de concentrações de tensões locais, resultando na fratura antecipada dos provetes. Todavia, o estudo de Suwanpreecha & Manonukul (2022), entre outros, verificaram que, nos resultados dos testes de tração, os provetes de FFF apresentam um desempenho ligeiramente superior ao MIM, atribuindo a diferença à densidade relativa das peças após a sinterização, em vez de à dimensão do grão.

Tabela 2.3: Propriedades à tração (parte 1).

Parâmetros de impressão			Propriedades mecânicas			
			Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (GPa)
Tabela C.8 – N.º 7 (Gong et al., 2019)			167	465	31	152
Tabela C.8 – N.º 10 (Pellegrini et al., 2022)	Vertical	2 camadas	115,00	380,00	29,00	188,94
		4 camadas	117,00	345,00	25,00	182,00
		6 camadas	122,70	399,60	35,00	176,37
	De lado	2 camadas	127,50	401,00	33,00	185,64
		4 camadas	125,00	439,30	43,00	160,00
		6 camadas	132,70	430,00	40,00	142,42
	Horizontal	2 camadas	120,00	400,00	38,00	182,83
		4 camadas	125,70	405,20	45,00	170,00
		6 camadas	106,70	387,70	40,00	143,91
Tabela C.8 – N.º 6 (Tosto et al., 2021)	Vertical		113,75 ± 13,42	206,27 ± 80,11	13,35 ± 6,59	117,31 ± 1,94
	Horizontal		148,01 ± 4,50	443,90 ± 5,87	43,33 ± 2,53	157,24 ± 4,50

A análise de Wang et al. (2023) permitiu verificar o impacto de diferentes parâmetros de impressão nas propriedades à tração dos provetes desenvolvidos. Em primeiro lugar, ao avaliar o impacto da altura da camada, foi possível verificar que o aumento da mesma reduz, significativamente, a UTS (redução de 14,44%) e a YS (redução de 17,23%), além disso, quanto maior foi a altura de impressão, menor foi o alongamento à rutura, indicando que camadas mais finas aumentam a ductilidade do provete. O aumento da porosidade e do tamanho dos poros, com o aumento da altura de deposição, levam à concentração de tensões nesses mesmos locais, tornando o material mais propenso à formação e propagação de fendas sob tensão.

Em seguida, ao estudar o impacto do ângulo de deposição, o estudo verificou que, como referido anteriormente, as propriedades mecânicas das peças sinterizadas estão fortemente relacionadas com o tamanho, distribuição e formato dos poros, desta forma, os provetes com um ângulo de deposição de 90° apresentaram a maior resistência à tração, com valores de UTS de 505,60 MPa e de YS de 173,27 MPa, enquanto os valores mais baixos (476,82 MPa e 159,74 MPa, respetivamente) foram observados para os provetes de 0°. Por sua vez, ao comparar os resultados obtidos para os ângulos de +45°/-45° e 0°/90°, verificaram que o arranjo dos poros e a densidade é bastante semelhante entre os mesmos, levando a valores de UTS e YS (499,42 MPa e 173,45 MPa; 493,60 MPa e 166,84 MPa, respetivamente) muito próximos, sendo estes ligeiramente superiores para o ângulo de +45°/-45°.

As conclusões sobre a largura de deposição são semelhantes às mencionadas na secção 2.3.2.2, ou seja, os melhores resultados das propriedades à tração foram obtidos, de forma geral, quando a dimensão do bocal e a largura de deposição coincidem. Adicionalmente, os resultados associados à densidade do preenchimento seguem a mesma lógica, quanto maior for a percentagem de preenchimento, significativamente maior foram as propriedades mecânicas dos provetes.

Ao analisar a influência da orientação de impressão, o estudo de Kurose et al. (2020), averiguou que os provetes impressos horizontalmente exibiram maior UTS e alongamento à fratura, seguidos dos provetes impressos de lado. Os provetes horizontais apresentaram valores suficientemente elevados (453 MPa e 48%, respetivamente) para compreender os padrões estabelecidos pela ISO 22068:2012 (ISO, 2012) e MPIF Standard 35 (MPIF, 2024) (Tabela C.7). Nos ensaios de tração, o provete vertical apresentou valores consideravelmente baixos para ambas as propriedades, exibindo uma estrutura de superfície de fratura distinta, caracterizada por uma aparência mais lisa (Figura 2.20 (b)), ao contrário dos outros provetes que, por sua vez, apresentaram uma superfície de fratura dútil com padrões irregulares de cavidades acentuados (Figura 2.20 (a)). É importante mencionar que, nos provetes verticais, a direção de deposição das camadas dos provetes é paralela à direção da tração, ou, por sua vez, o plano de deposição das camadas é perpendicular a direção do esforço, fazendo com que a desagregação de camadas atuasse como defeito crítico nos ensaios de tração, contribuindo para a formação de fendas. Todavia, os resultados do estudo de Pellegrini et al. (2022), indicam que existe a possibilidade de que os provetes impressos de lado exibiam valores, de UTS e YS, consistentemente superiores aos provetes impressos deitados (horizontais), mesmo que, em ambas orientações de impressão, o plano das camadas seja paralelo à direção da carga de tração.

Para além disso, o estudo relata que o número de camadas de parede impactou as propriedades mecânicas, com o aumento das mesmas levando à melhoria das propriedades à tração dos provetes horizontais e de lado. No entanto, a configuração com 6 camadas, nos provetes deitados, exibiu características mecânicas inferiores devido ao efeito de delaminação e à maior porosidade. Assim, concluíram que o aumento do número de camadas de parede pode melhorar as propriedades mecânicas, desde que a adesão entre as mesmas seja suficiente.

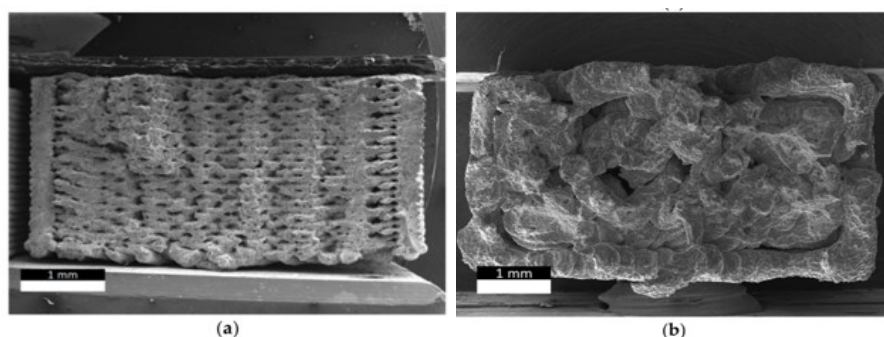


Figura 2.20: Morfologia da superfície de fratura dos provetes de tração: (a) Provelte impresso na horizontal (deitado); (b) Provelte impresso na vertical (em pé) (retirado de Tosto et al. (2021)).

2.3.2.6 Propriedades à compressão

A razão entre os parâmetros de impressão e as propriedades à compressão, dos provetes desenvolvidos por FFF, seguem a mesma lógica das propriedades à tração. Tendencialmente, quanto maior for a densidade, melhor for a distribuição dos poros e menor for a dimensão dos mesmos, melhores serão as propriedades mecânicas (Tabela 2.4).

O estudo de Ait-Mansour et al. (2020), reporta que o limite dos níveis de tensões compressíveis aumenta com os níveis teóricos de preenchimento, ou seja, quanto maior for a densidade do *infill*, maior serão as propriedades de compressão dos componentes. Neste estudo, para além de densidades inferiores a 100%, foram avaliados provetes cilíndricos com valores de preenchimento de 125%, tendo, estes provetes, apresentado as melhores propriedades (Tabela 2.4 – N.º9). Contudo, o estudo não reporta a influência do nível de preenchimento na precisão e exatidão dimensional, sendo difícil compreender se transpor os 100% prejudicará, ou não, as dimensões dos componentes finais.

Tabela 2.4: Propriedades à compressão.

Parâmetros de impressão		Propriedades mecânicas	
		Yield strength (MPa)	Stress at 20% strain (MPa)
Tabela C.8 – N.º 9 (Ait-Mansour et al., 2020)	25% <i>infill</i>	53,23 ± 1,51	152,32±3,73
	50% <i>infill</i>	59,57 ± 3,95	224,97 ± 5,85
	75% <i>infill</i>	88,03 ± 0,87	364,58 ± 8,03
	100% <i>infill</i>	108,89 ± 2,70	484,73 ± 7,22
	125% <i>infill</i>	167,38 ± 2,51	667,62 ± 15,03
Tabela C.8 – N.º 12 (Carminati et al., 2022)		150,00	-

2.3.2.7 Propriedades à flexão

A análise das propriedades à flexão de provetes produzidos por FFF, disponível na bibliografia, com este material é bastante reduzida e pouco aprofundada (Tabela 2.5).

Os ensaios de flexão produzem tensões de tração no lado convexo dos provetes, acima do eixo neutro, e esforços compressivos no lado côncavo dos provetes, abaixo do eixo neutro. A resistência à flexão foi quantificada através da tensão máxima na fibra externa da peça. O estudo de Carminati et al. (2022), verificou que a tensão máxima, durante o teste de flexão em três pontos, concentrou-se principalmente numa pequena região acima do eixo neutro. Ademais, as curvas de flexão obtidas mostraram uma tendência semelhante entre os diversos provetes, verificando a repetibilidade do processo, e todas as amostras exibiram uma deformação completa sem a presença de fraturas nas áreas submetidas a tensões de tração. O valor médio para a *flexural* UTS foi de 795 ± 27 MPa e o valor médio para a deformação à flexão foi de, aproximadamente, 44%.

Tabela 2.5: Propriedades à flexão.

Parâmetros de impressão	Propriedades mecânicas			
	Yield strength (MPa)	Ultimate flexural strength (MPa)	Flexural at break (%)	Flexural modulus (GPa)
Tabela C.8 – N.º 12 (Carminati et al., 2022)	-	795,0 ± 27,0	44,0 ± 1,4	-
Tabela C.8 – N.º 3 (Thompson et al., 2019)	723	967	-	75

3. Metodologia

O presente capítulo apresentará os procedimentos, métodos e tecnologias utilizadas para determinar os resultados analisados no capítulo 4. Para a realização deste projeto, o estudo do material impresso foi dividido em diferentes etapas, de acordo com o provete impresso (Figura 3.1).

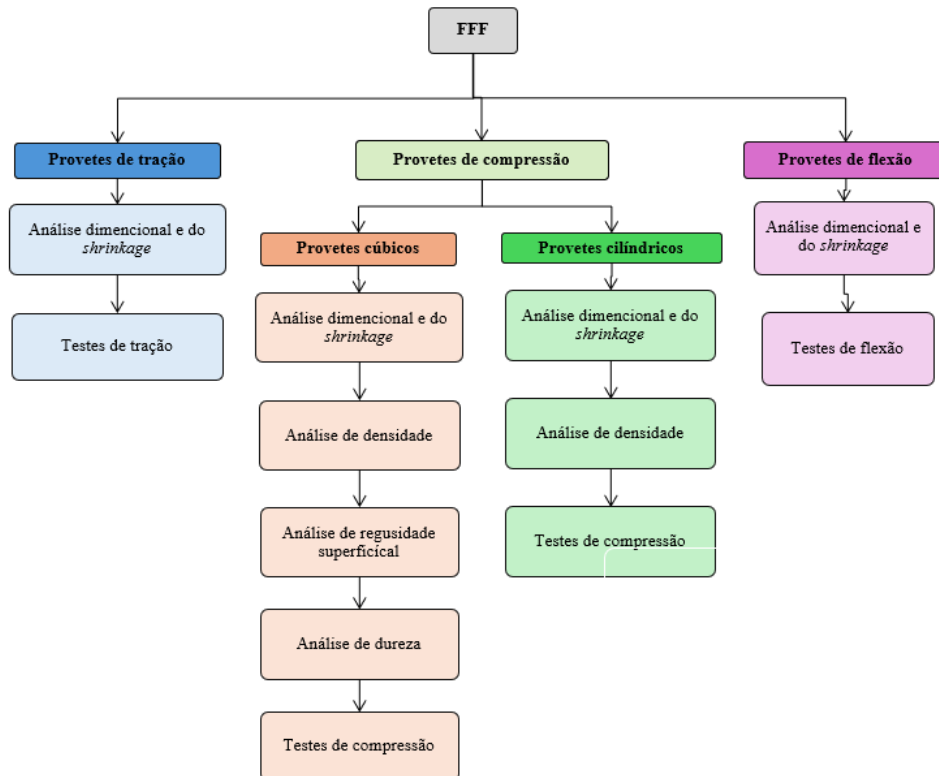


Figura 3.1: Esquema representativo dos processos de análise do comportamento mecânico realizados para cada tipo de provete (exibidos com cores distintas).

Desta forma, como apresentado na figura, a primeira secção, zona da esquerda assinalada com a cor azul, é referente às tarefas envolvidas no estudo do comportamento mecânico dos provetes de tração, em seguida, marcada com a cor laranja, o estudo dos provetes cúbicos, com a cor verde, dos provetes cilíndricos e, por fim, indicada com a cor rosa, dos provetes de flexão. No final do estudo, procedeu-se a uma análise custos de produção associados à tecnologia estudada.

Para a impressão dos diferentes provetes analisados no presente estudo, recorreu-se ao programa SolidWorks (SolidWorks, 2024) para conceber o design, ao *slicer* IdeaMaker (Raise3D, 2024c) para produzir o G-code adequado e, em seguida, à impressora Forge1 (RAISE3D, 2024d) para imprimir. Utilizou-se a cola hidrossolúvel Magigoo (Magigoo, 2024), para promover a aderência entre a mesa de impressão e os provetes. Como mencionado anteriormente, os provetes foram impressos com o filamento Ultrafuse 316L (Forward AM, 2024a), em sintonia com o material POM de suporte (Forward AM, 2024d).

3.1 Provetes

Os provetes utilizados nos ensaios foram dimensionados com base nas seguintes normas (Figura 3.2):

- Provetes cúbicos – Adaptação da norma ASTM standard E9 (2018) para testes de compressão;
- Provetes cilíndricos – Adaptação da norma ASTM standard E9 (2018) para testes de compressão;

- c) Provetes de flexão – ASTM standard E290 (2014);
d) Provetes de tração – ASTM standard E8/E8M (2022) para *subsize specimen*.

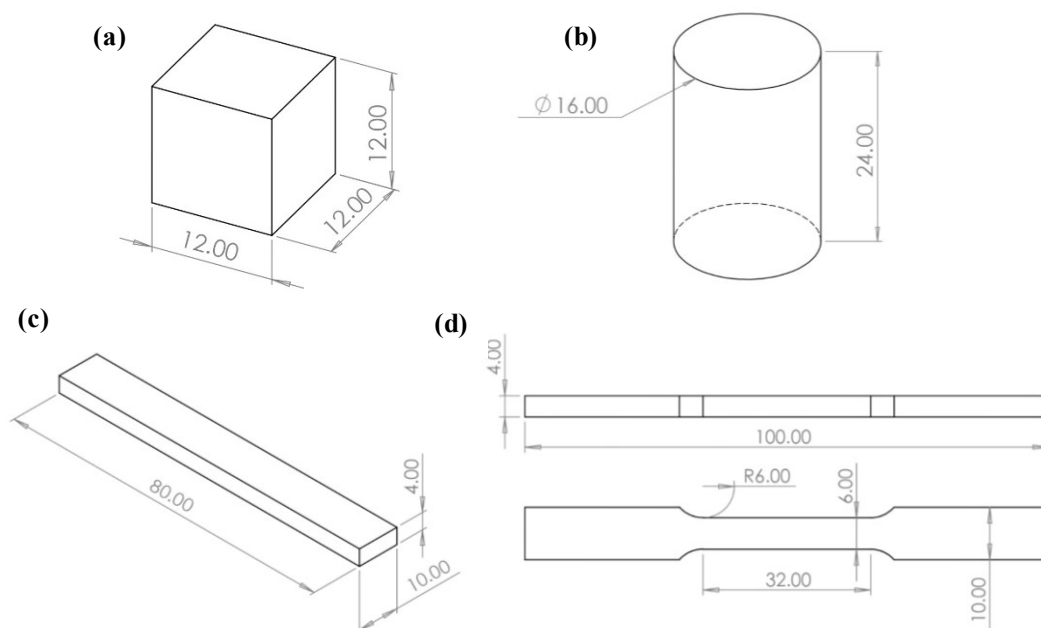


Figura 3.2: Provete e respectivas dimensões: (a) cúbico de compressão, (b) cilíndrico de compressão, (c) flexão e (d) tração.

3.2 Propriedades de impressão

Como referido anteriormente, utilizaram-se os parâmetros de impressão aconselhados pela RAISE3D, explorados e definidos em conjunto com a BASF, e modificados a orientação de impressão, a direção de impressão e a quantidade de camadas internas/externas. Assim, nesta secção, numa primeira instância, serão apresentadas as propriedades conservadas entre todos os provetes e, de seguida, expostas, individualmente, as propriedades e designações atribuídas aos diferentes provetes impressos. A Tabela 3.1 retém a informação relativa às propriedades de impressão análogas entre todas as impressões.

Tabela 3.1: Propriedades de impressão análogas a todas as impressões.

Parâmetro	Valor
Bed temperature	100 °C
Nozzle temperature	Bocal de extrusão da esquerda (Ultrafuse 316L) – 242 °C Bocal de extrusão da direita (POM) – 247 °C
Cooling	Nenhum
Infill density	100%
Infill type	Linhas
Infill line directions	[45, -45]
Infill overlap	27%
Layer height	0,15 mm
Print speed	20 mm/s
Retraction speed	35 mm/s
Retraction distance	Bocal de extrusão da esquerda (Ultrafuse 316L) – 1,85 mm Bocal de extrusão da direita (POM) – 1,76 mm
Adherence	Plataforma de vidro + cola hidrossolúvel + estruturas adicionais (<i>raft + skirt</i>)
Nozzle size	0,4 mm
Line width	0,4 mm
Scaling	XY – 19%; Z – 22%

É importante realçar que as etapas de pós-processamento de D&S de todos os provetes foram realizadas do mesmo modo na empresa Elnik Systems GmbH (Elnik Systems, 2024), parceiro da Forward AM (Forward AM, 2024a).

Ao considerar as modificações da orientação de impressão, da direção de impressão e da quantidade de camadas internas/externas, verificou-se uma elevada complexidade na identificação dos diferentes provetes, pelo que, para efeitos de clareza, introduziram-se em cada secção, figuras e/ou tabelas, que pretendem indicar o conjunto de alterações realizadas nos parâmetros de impressão e a designação atribuída para cada conjunto de provete. Adicionalmente, apesar dos provetes de SLM não terem sido produzidos em conjunto com os provetes de FFF, apresentar-se-á uma tabela própria com as designações atribuídas aos mesmos, de forma a centralizar toda a informação necessária à posterior análise.

Provetes de tração

A Tabela 3.2 ilustra a designação de cada conjunto de provetes, e respetivas variáveis, para simplificar a posterior análise de resultados (somente a primeira linha apresentará a designação para provetes idênticos com numerações distintas, todavia, todos os provetes com quantidades superiores a 1 empregarão a mesma estratégia). A Tabela 3.3 apresenta os provetes produzidos por SLM.

Tabela 3.2: Designação e propriedades dos provetes de tração produzidos.

Denominação	Direção de impressão	Orientação de impressão	Número de camadas	Quantidade
FFF_X_F_0N.01 FFF_X_F_0N.02 FFF_X_F_0N.03	X	Flatwise (F)	0 e sem <i>top/bottom layers</i>	3
FFF_X_F_0	X	Flatwise (F)	0	3
FFF_X_F_2	X	Flatwise (F)	2	3
FFF_X_F_4	X	Flatwise (F)	4	3
FFF_X_F_6	X	Flatwise (F)	6	3
FFF_X_S_0N	X	Sideways (S)	0 e sem <i>top/bottom layers</i>	3
FFF_X_S_0	X	Sideways (S)	0	3
FFF_X_S_2	X	Sideways (S)	2	3
FFF_X_S_4	X	Sideways (S)	4	3
FFF_X_S_6	X	Sideways (S)	6	3
FFF_Y_F_0N	Y	Flatwise (F)	0 e sem <i>top/bottom layers</i>	3
FFF_Y_F_0	Y	Flatwise (F)	0	3
FFF_Y_F_2	Y	Flatwise (F)	2	3
FFF_Y_F_4	Y	Flatwise (F)	4	3
FFF_Y_F_6	Y	Flatwise (F)	6	3
FFF_Y_S_0N	Y	Sideways (S)	0 e sem <i>top/bottom layers</i>	3
FFF_Y_S_0	Y	Sideways (S)	0	3
FFF_Y_S_2	Y	Sideways (S)	2	3
FFF_Y_S_4	Y	Sideways (S)	4	3
FFF_Y_S_6	Y	Sideways (S)	6	3
FFF_U_2	Sem direção específica	Upright (U)	2	3

Tabela 3.3: Designação e propriedades dos provetes de tração de SLM.

Denominação	Direção de impressão	Orientação de impressão	Número de camadas	Quantidade
SLM_F	-	Flatwise (F)	-	3
SLM_S	-	Sideways (S)	-	3
SLM_U	-	Upright (U)	-	3

Por fim, a Figura 3.3 apresenta um dos conjuntos de provetes impressos, a fim de possibilitar a visualização dos mesmos após a impressão (a) e no seu estado final (b), após o D&S.

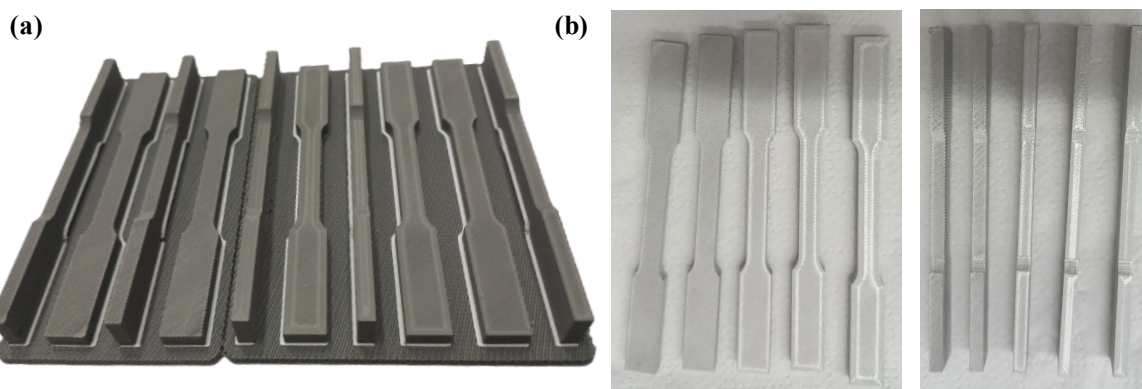


Figura 3.3: (a) Provetes de tração verdes e (b) brancos. Apresentação de duas orientações de impressão e o número de camadas, nos provetes brancos, crescente da esquerda para a direita.

Provetes cúbicos

No caso dos provetes cúbicos, a direção e orientação de impressão não são variáveis aplicáveis, desta forma, como será exposto e estudado no próximo capítulo, os ensaios de compressão serão realizados nas três direções (X, Y e Z). Foram impressos dois provetes do mesmo conjunto para cada uma das direções de compressão, totalizando 6 provetes por conjunto. A Tabela 3.4, seguindo a lógica anterior, apresenta a denominação atribuída aos diferentes conjuntos de provetes. A Tabela 3.5 apresenta os provetes produzidos por SLM. Por fim, a Figura 3.4 apresenta um dos conjuntos de provetes impressos, para fins ilustrativos.

Tabela 3.4: Designação e propriedades dos provetes cúbicos.

Denominação	Número de camadas	Quantidade
FFF_0_X; FFF_0_Y; FFF_0_Z	0	2+2+2 = 6
FFF_2_X; FFF_2_Y; FFF_2_Z	2	6
FFF_4_X; FFF_4_Y; FFF_4_Z	4	6
FFF_6_X; FFF_6_Y; FFF_6_Z	6	6

Tabela 3.5: Designação dos provetes cúbicos de SLM.

Denominação	Quantidade
SLM_X	2
SLM_Y	2
SLM_Z	2

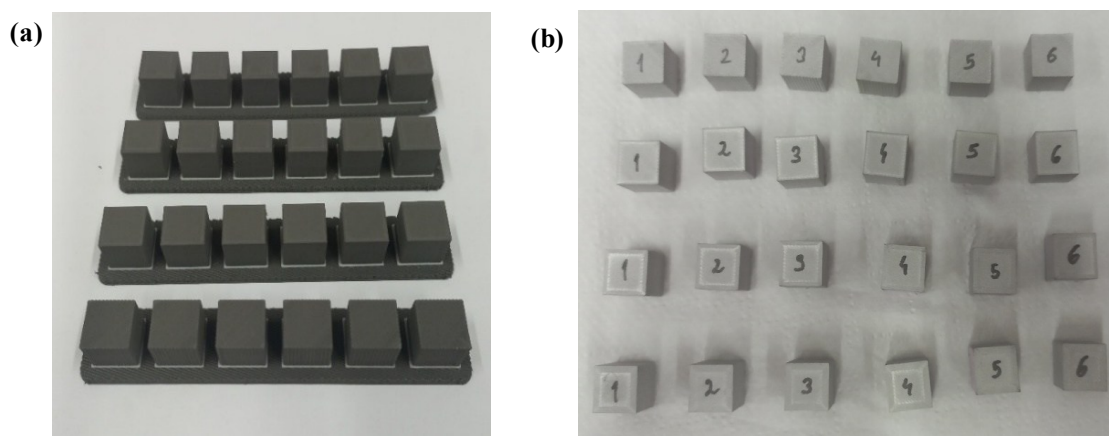


Figura 3.4: (a) Provetes cúbicos verdes com o número de camadas crescente de baixo para cima. (b) Provetes brancos com o número de camadas crescente de cima para baixo.

Provetes cilíndricos

A Tabela 3.6 e a Tabela 3.7 apresentam as denominações atribuídas aos provetes cilíndricos produzidos por FFF e SLM, respetivamente. Posteriormente, os provetes são ilustrados na Figura 3.5.

Tabela 3.6: Designação e propriedades dos provetes cilíndricos produzidos.

Denominação	Direção de impressão	Orientação de impressão	Número de camadas	Quantidade
FFFcil_X_F_2	X	<i>Flatwise</i> (F)	2	3
FFFcil_Y_F_2	Y	<i>Flatwise</i> (F)	2	3
FFFcil_U_0	-	<i>Upright</i> (U)	0	3
FFFcil_U_2	-	<i>Upright</i> (U)	2	3
FFFcil_U_4	-	<i>Upright</i> (U)	4	3
FFFcil_U_6	-	<i>Upright</i> (U)	6	3

Tabela 3.7: Designação e propriedades dos provetes cilíndricos de SLM.

Denominação	Direção de impressão	Orientação de impressão	Número de camadas	Quantidade
SLMcil_F	-	<i>Flatwise</i> (F)	-	3
SLMcil_U	-	<i>Upright</i> (U)	-	3

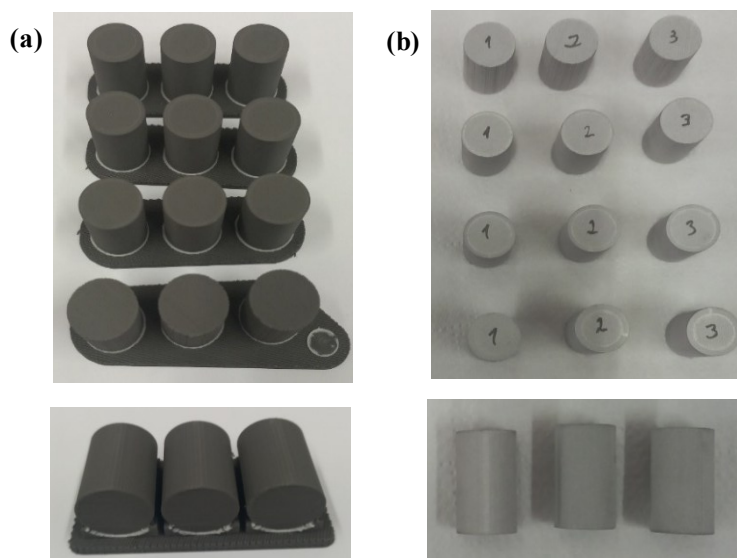


Figura 3.5: (a) Provetes cilíndricos verdes e (b) brancos. Ambos com o número de camadas crescente de cima para baixo.

Adicionalmente, os provetes cilíndricos de 6 camadas foram os únicos que, à semelhança do que foi identificado pelo estudo de Pellegrini et al. (2022), apresentaram delaminação visualmente significativa, que pode, diretamente, influenciar as propriedades mecânicas dos mesmos (Figura 3.6).



Figura 3.6: Delaminação identificada em alguns dos provetes cilíndricos com 6 camadas externas.

Provetes de flexão

Seguindo a lógica anterior, a Tabela 3.8 e a Tabela 3.9 apresentam as denominações atribuídas aos provetes produzidos por FFF e SLM, respetivamente. Posteriormente, os provetes são ilustrados na Figura 3.7.

Tabela 3.8: Designação e propriedades dos provetes de flexão produzidos.

Denominação	Direção de impressão	Orientação de impressão	Número de camadas	Quantidade
FFFflex_X_F_0N	X	Flatwise (F)	0 e sem top/bottom layers	3
FFFflex_X_F_0	X	Flatwise (F)	0	3
FFFflex_X_F_2	X	Flatwise (F)	2	3
FFFflex_X_F_4	X	Flatwise (F)	4	3
FFFflex_X_F_6	X	Flatwise (F)	6	3
FFFflex_X_S_0N	X	Sideways (S)	0 e sem top/bottom layers	3
FFFflex_X_S_0	X	Sideways (S)	0	3
FFFflex_X_S_2	X	Sideways (S)	2	3
FFFflex_X_S_4	X	Sideways (S)	4	3
FFFflex_X_S_6	X	Sideways (S)	6	3
FFFflex_Y_F_0N	Y	Flatwise (F)	0 e sem top/bottom layers	3
FFFflex_Y_F_0	Y	Flatwise (F)	0	3
FFFflex_Y_F_2	Y	Flatwise (F)	2	3
FFFflex_Y_F_4	Y	Flatwise (F)	4	3
FFFflex_Y_F_6	Y	Flatwise (F)	6	3
FFFflex_Y_S_0N	Y	Sideways (S)	0 e sem top/bottom layers	3
FFFflex_Y_S_0	Y	Sideways (S)	0	3
FFFflex_Y_S_2	Y	Sideways (S)	2	3
FFFflex_Y_S_4	Y	Sideways (S)	4	3
FFFflex_Y_S_6	Y	Sideways (S)	6	3

Tabela 3.9: Designação e propriedades dos provetes de flexão de SLM.

Denominação	Direção de impressão	Orientação de impressão	Número de camadas	Quantidade
SLMflex_F	-	Flatwise (F)	-	3
SLMflex_S	-	Sideways (S)	-	3

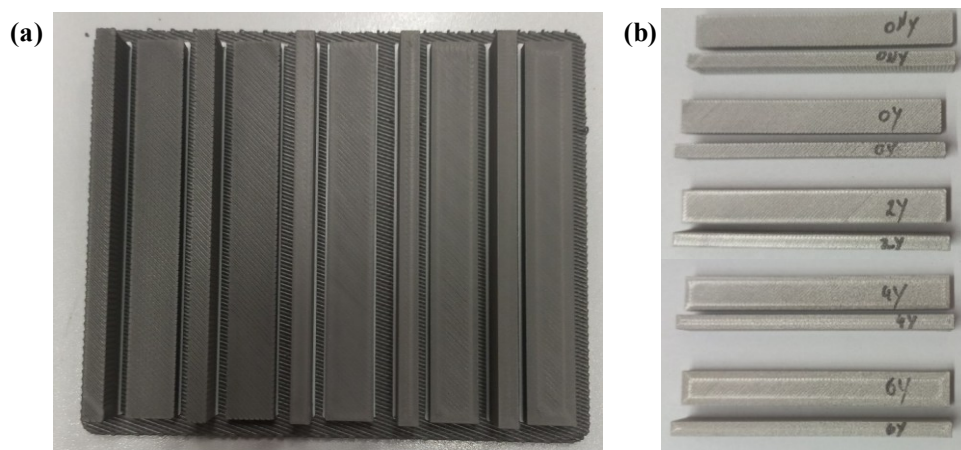


Figura 3.7: (a) Provetes de flexão verdes, com o número de camadas crescente da esquerda para a direita, e (b) provetes de flexão brancos, com o número de camadas crescente de cima para baixo.

3.3 Processos e equipamentos de análise

A presente secção tem como objetivo apresentar e clarificar os processos e equipamentos de análise utilizados ao estudar o comportamento mecânico dos provetes desenvolvidos (Figura 3.1). A secção segue a mesma ordem que a, posterior, análise de resultados, começando pela: Precisão dimensional, exatidão dimensional e contração; Densidade; Dureza; Rugosidade; Tração; Compressão; Flexão.

Precisão dimensional, exatidão dimensional e contração

A primeira análise tem como intuito verificar a coerência dimensional entre o modelo para impressão (modelo 3D + fator de escala (*scaling*)) e os provetes verdes, entre os provetes verdes e os provetes brancos, denominado de *shrinkage*, e, por fim, entre o modelo 3D e os provetes brancos. Estas três comparações, permitirão avaliar o rigor dimensional em todas as fases do processo de fabrico e de pós-processamento.

Primeiramente, ao verificar a conformidade entre o modelo para impressão e os provetes verdes, é possível apurar a precisão e exatidão da impressão, podendo identificar, caso existam, erros durante este processo, que irão influenciar, diretamente, o resultado dos provetes finais. Em seguida, a investigação entre os provetes verdes e brancos, permite ajustar o valor do *scaling* introduzido inicialmente, visto que, este mesmo valor, tem como intuito combater a redução dimensional que ocorre nos processos de D&S. Por fim, tendo em consideração que o mais importante é o resultado final, a comparação entre as dimensões das peças brancas e do modelo 3D, permitirão averiguar a margem de erro presente após todo o processo e a influência dos diferentes parâmetros de impressão nas dimensões das peças produzidas.

Assim, para se atingir este fim, as dimensões dos provetes foram determinadas ao recurso ao micrómetro Insize 3560-25SA, para elevada precisão, e, em casos de restrição dimensional para o uso do mesmo (sendo possível verificar estes casos ao observar o espaçamento disponível entre provetes verdes na Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5 e Figura 3.7), foi necessário recorrer ao paquímetro Mahr GmbH 16ER 150 mm. Além disso, como é possível verificar nas mesmas figuras, algumas das dimensões são constrangidas pela presença do *raft*. Nestes casos, os valores determinados estão sujeitos a erros inerentes à medição e serão devidamente sinalizados quando forem apresentados.

A exatidão (equação (4)) é medida ao comparar a médias das medições com o valor teórico esperado. Assim, calculou-se o erro percentual relativo:

$$\text{Exatidão (\%)} = \left| \frac{X_{\text{teórico}} - \bar{X}}{X_{\text{teórico}}} \right| \times 100 \quad (4)$$

- $X_{\text{teórico}}$ = Valor esperado (dimensão nominal ou teórica)
- $\bar{X}$ = Média das medições obtidas

A precisão (equação (5)) está associada à repetibilidade das medições e pode ser medida pelo desvio padrão das amostras:

$$\text{Desvio padrão} = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

- X_i = Cada valor medido
- $\bar{X}$ = Média das medições obtidas
- N = Número total de medições

Densidade

A determinação da densidade dos provetes permitirá avaliar, quantitativamente, a porosidade e, qualitativamente, a resistência mecânica dos provetes. O método de Arquimedes foi utilizado para determinar a densidade dos mesmos, recorrendo à balança ML204 (Hogentogler & Co., 2024). Considerou-se o valor nominal para a densidade de 7,98 g/cm³.

O método de medição da balança ML204 (Figura 3.8 (a) e (b)), descrito no guia operacional (Mettler-Toledo, 2024), permite, ao determinar a massa do provete em dois ambientes distintos (ar e água destilada (19,2°C)), calcular a densidade do provete estudado ao aplicar as equações (6) e (7) (Wang et al., 2023), expostas na secção 7.10.3 do mesmo guia. Todavia, a restrição dimensional do goblé e da balança utilizados, limitou a avaliação aos provetes de menor dimensão, ou seja, os provetes cúbicos e cilíndricos (Figura 3.8 (c)). Mesmo não procedendo à avaliação de todos os tipos de provetes produzidos, o conjunto estudado permitirá retirar as conclusões necessárias acerca da influência dos parâmetros de impressão na porosidade das peças impressas.

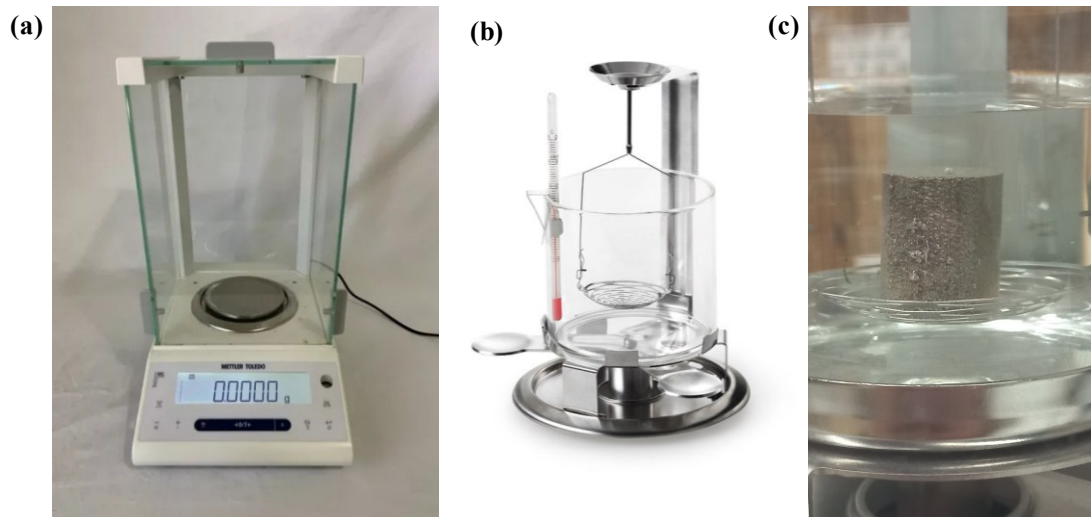


Figura 3.8: (a) Balança ML204. (b) Kit de medição da densidade. (c) Provette cilíndrico apoiado no suporte de medição dentro de água.

$$\rho = \frac{A}{A - B}(\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (6)$$

$$V = \alpha \frac{A - B}{\rho_0 - \rho_L} \quad (7)$$

- ρ = densidade da amostra
- A = peso da amostra no ar
- B = peso da amostra no líquido auxiliar
- V = volume da amostra
- ρ_0 = densidade do líquido auxiliar
- ρ_L = densidade do ar (0,0012 g/cm³)

- α = fator de correção de peso (0,99985), para ter em conta a flutuação atmosférica do peso de ajuste

Durante a execução das medições, verificou-se a existência de bolhas de ar unidas (Figura 3.9), muitas vezes, às superfícies mais rugosas, que influenciam, diretamente, os valores obtidos, desta forma, foi necessário eliminar a maior quantidade de bolhas possíveis, com o intuito de minimizar os erros nas medições. Para além disso, foi necessário secar cuidadosamente os provetes após as medições dentro de água e antes das medições em ar, visto que a massa da água remanente nos provetes pode afetar drasticamente os valores das densidades medidos, tendencialmente, quanto maior for a porosidade, maior é a probabilidade de erros deste tipo acontecerem.

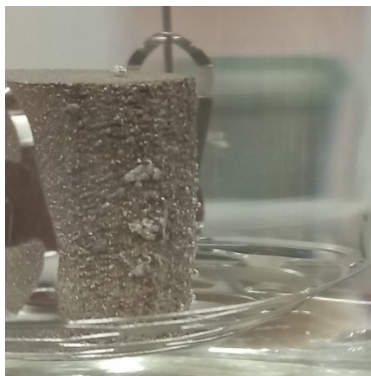


Figura 3.9: Bolhas de ar na superfície rugosa de um provete produzido por SLM.

Dureza

Nos ensaios de dureza, realizados no equipamento Struers Duramin – *Digital Vickers/Knoop Hardness Tester* (modelo 05656242) (Struers, 2024; Bullseye Calibration, 2024), introduziu-se a configuração para uma indentação de carga HV0,5 – 4,903 N durante 10 segundos (a Figura 3.10 ilustra indentações de aspeto normal para provetes produzidos por FFF e SLM, respetivamente). Todas as indentações foram realizadas nos provetes cúbicos, tendo-se testado, em alguns dos casos, se os valores determinados seriam diferentes entre o preenchimento e as camadas externas dos mesmos.

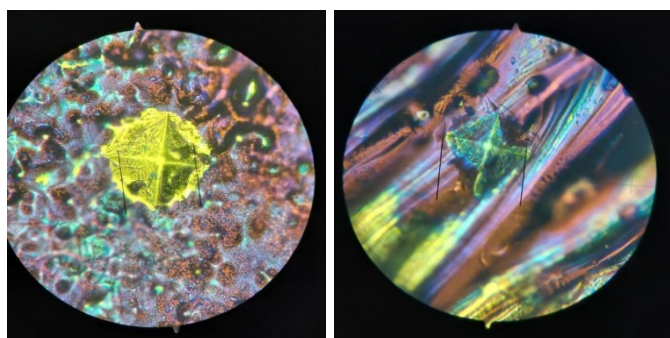


Figura 3.10: Indentações de aspeto normal (ampliação de 40x) para um provete produzido por FFF e SLM, respetivamente.

No decorrer dos ensaios, deparou-se com um elevado conjunto de dificuldades na determinação dos dados, que podem, significativamente, influenciar os resultados. Em primeiro lugar, muitas indentações surgem incompletas, dado que, a estratégia de deposição das camadas (FFF) promove a formação de perfis laterais ondulados e entalhes entre as camadas depositadas. Assim, a indentação é visualmente caracterizada pela incapacidade de formar uma estrutura coerente e a focagem torna-se um forte indício para justificar a presença de perfis ondulados (Figura 3.11 (a)). Adicionalmente, nos provetes de SLM, a dimensão e quantidade de vazios é,

consideravelmente, inferior às dos provetes de FFF. Assim, em algumas ocasiões, é possível verificar indentações muito pequenas, imperturbadas pela presença de lacunas na estrutura do componente (Figura 3.11 (b)), fazendo com que os valores sejam bastante dispares.

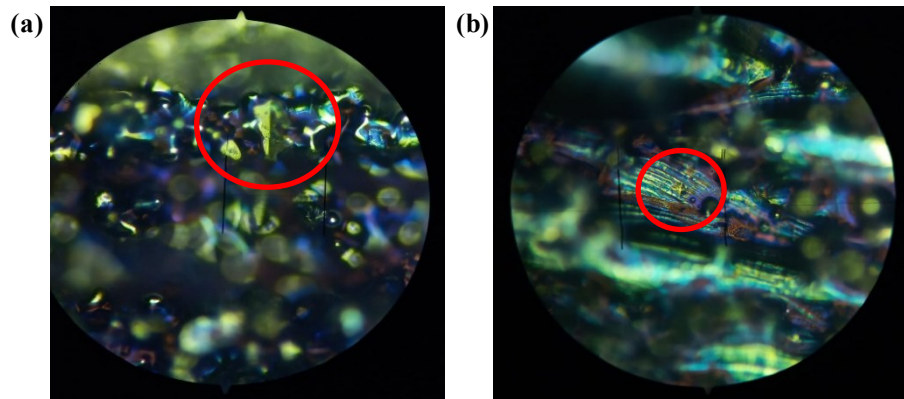


Figura 3.11: (a) Indentação incompleta (ampliação de 40x) (provete de FFF). (b) Indentação inalterada pela composição e estrutura do provete (ampliação de 40x) (provete de SLM).

Por fim, é muito comum, em ambas as tecnologias de produção, verificar indentações que apresentam dimensões bastante superiores às restantes medições, por interceptarem fendas, vazios e entalhes presentes na estrutura do componente (Figura 3.12).

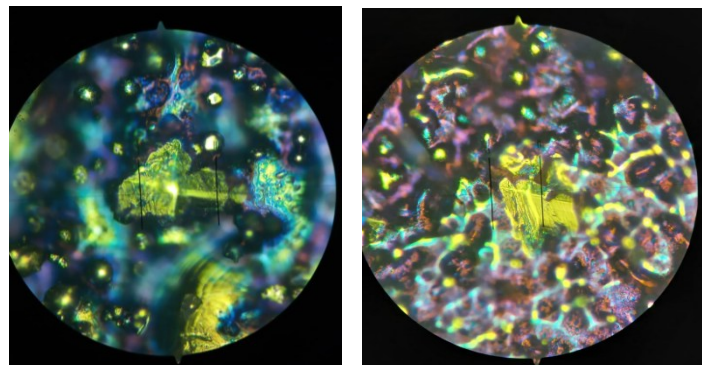


Figura 3.12: Indentações de elevada dimensão e incoerência estrutural de provetes produzidos por SLM e FFF, respetivamente.

Rugosidade

Os testes de rugosidade superficial foram realizados nos provetes cúbicos (um provete de SLM e um provete com 6 camadas externas de FFF) com o auxílio do equipamento Mahr MarSurf M300 *Portable Surface Tester with MarSurf RD 18 Stylus* (Mahr GmbH, 2024; Deterco Inc, 2024). Foram realizadas, no total, quatro medições por provete, duas, perpendiculares entre si, na parte superior do provete (ou seja, última camada produzida), e duas, igualmente perpendiculares, na zona lateral do mesmo (Figura 3.13). Seguiram-se as condições de medição estabelecidas pela norma ISO 21920-3:2021 (ISO, 2021 (a)), utilizando-se uma *evaluation length* (l_e) de 1,25 mm.

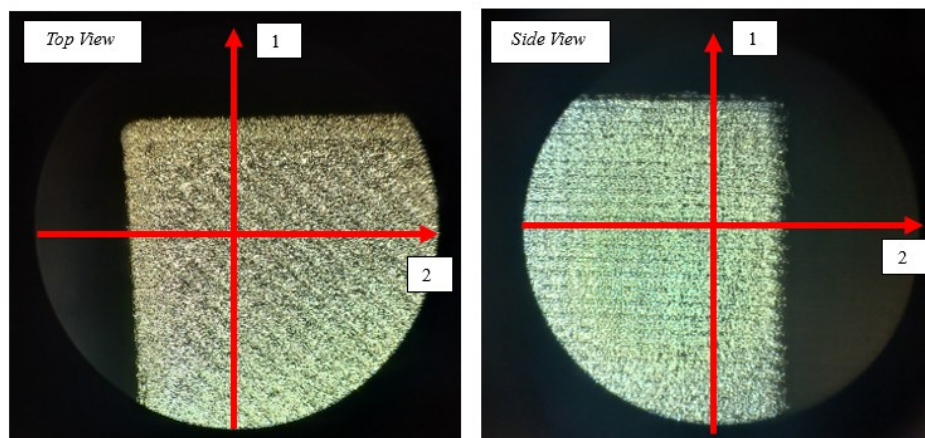


Figura 3.13: Representação da direção das passagens, para medição da rugosidade superficial, com ilustração do aspeto, em microscópio (ampliação de 10x), de um provete produzido por FFF.

Tração

Os testes de tração foram realizados na máquina de ensaios mecânicos Instron 5900R/4507 (Instron, 2024a), com o apoio do programa associado ao mesmo (Bluehill Universal (Instron, 2024b)), a uma velocidade de 5 mm/min. O equipamento dispõe de uma célula de carga de 200KN, transdutor de deslocamento e amarras de fixação, que garantem o não escorregamento dos provetes. A evolução dos deslocamentos e das extensões na superfície dos provetes foi obtida através de um sistema DIC (*digital image correlation*), Dantec Dynamics Model Q-400 3D (Dantec Dynamics, 2024).

O DIC é um método ótico baseado na avaliação de imagens que permite avaliar a estrutura do provete, o deslocamento e a deformação durante os testes, ou seja, é uma tecnologia capaz de avaliar a localização da deformação e seguir a progressão da falha, ao comparar as fotografias retiradas em diferentes fases da deformação do provete (Pellegrini et al., 2022). Alguns trabalhos anteriores (Gonabadi et al., 2020; Farfán-Cabrera et al., 2017; Somireddy et al., 2019), relatam a introdução e o benefício da aplicação do DIC no estudo de provetes produzidos por FFF. No domínio metálico, o DIC permite estudar o efeito da orientação e direção de construção, do número de camadas, entre outras variáveis, associadas às propriedades mecânicas das peças impressas. Além disso, os mapas de deformações estruturados podem mostrar a presença e o efeito da anisotropia nas peças durante os ensaios. Em suma, a aplicação do DIC, na caracterização mecânica de provetes FFF metálicos, facilita a compreensão do comportamento mecânico dos mesmos e torna o estudo mais fiável, quando comparado com os métodos tradicionais.

O sistema DIC (Figura 3.14 (a) e (b)) utilizado possuiu duas câmaras, cada uma com uma resolução de 6 megapixéis e uma distância focal de 50,2 mm com uma abertura de f/11. A frequência de aquisição das imagens foi definida em 10 frames por segundo e o algoritmo de correção foi realizado no software INSTRON 4D – v.4.9.0.182.179. Para aumentar a precisão das medições, utilizou-se uma fonte de luz para iluminar toda a superfície dos provetes que foi previamente pintada de branco com um padrão estocástico de pontos pretos (Figura 3.14 (c)).

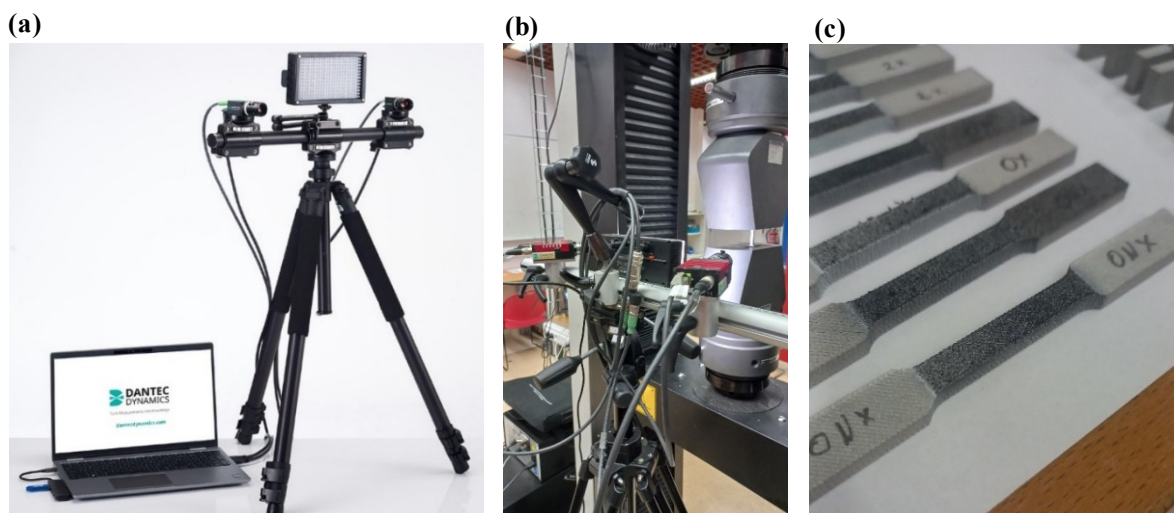


Figura 3.14: (a) Ilustração do equipamento DIC utilizado (retirada de Dantec Dynamics (2024)). (b) Aparato empregue nos testes de tração. (c) Proveteos preparados, com a pintura necessária, para serem tracionados.

A máquina de ensaios universal e o sistema DIC permitiram obter os valores da força e evolução dos deslocamentos e das extensões na superfície dos provetes, possibilitando traçar as curvas tensão nominal vs. extensão nominal dos ensaios de tração uniaxial. Foi possível determinar as seguintes propriedades mecânicas: tensão limite de elasticidade (Y_S), tensão de rotura (UTS), módulo de Young (E) e alongamento à fratura (A_f) (ASTM standard E8/E8M (2022)).

Os valores associados à tensão limite de elasticidade, mencionados em todo o documento, foram determinados segundo o *Offset Method* (com o valor de 0,2%) apresentado na norma ASTM standard E8/E8M (2022).

Para a determinação da lei de comportamento mecânico em domínio plástico do material em cada ensaio, aproximou-se a respetiva curva tensão verdadeira vs. extensão verdadeira, em domínio plástico, através de uma lei de potência, modelo de Ludwik-Hollomon (equação (8)), onde o K é o coeficiente de resistência mecânica e n é o coeficiente de encruamento do material.

$$\sigma = K\epsilon^n \text{ [MPa]} \quad (8)$$

Por fim, para a determinação do coeficiente de anisotropia (r), definido como o quociente entre a extensão verdadeira na direção da largura (ϵ_w) e a extensão verdadeira na direção da espessura (ϵ_t) do provete no regime plástico (expresso na equação (9)), foi essencial, primeiramente, assumir a conservação do volume dos provetes durante os ensaios (equação (10)) e, em seguida, determinar a extensão verdadeira na direção da espessura, segundo a mesma equação. Ao traçar uma curva da extensão verdadeira na largura vs. extensão verdadeira na direção da espessura e a respetiva linha de tendência neste regime, é possível determinar valor do coeficiente de anisotropia (declive da linha de tendência).

Um material isotrópico é aquele que possuiu um valor de $r = 1$. Sendo assim, um material que exiba um comportamento isotrópico, apresenta propriedades mecânicas iguais nas direções estudadas. É importante mencionar que, um valor inferior a 1, indica uma maior resistência à deformação na direção da largura e, respetivamente, um valor superior a 1, aponta para uma maior resistência à deformação na direção da espessura.

$$r = \frac{\ln\left(\frac{W}{W_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (9)$$

$$\varepsilon_w + \varepsilon_t + \varepsilon_l = 0 \quad (10)$$

Compressão

Os testes de compressão uniaxial foram realizados na máquina universal de ensaios mecânicos Instron, Satec1200 (Instron, 2024a), com uma célula de carga de 1200 KN, com o apoio do programa (Bluehill Universal (Instron, 2024b)). A evolução dos deslocamentos e das extensões na superfície dos provetes também foi obtida com recurso ao sistema digital de correlação de imagem, Dantec Dynamics Model Q-400 3D, utilizando os mesmos parâmetros dos ensaios de tração.

Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 5 mm/min nos provetes cilíndricos e de 2,5 mm/min nos provetes cúbicos, até uma redução em altura dos provetes de 60%, ou seja, realizou-se uma compressão máxima de 14,4 mm e de 7,2 mm, respetivamente. Com o intuito de eliminar o efeito do atrito nos resultados e obter uma deformação uniforme durante a compressão uniaxial, procedeu-se à lubrificação, com massa grafitada, das interfaces entre os provetes e os pratos compressores em todos os ensaios.

Antes de se proceder ao cálculo das propriedades mecânicas, foi necessário acertar a zona de adaptação dos provetes associada à curva força vs. deslocamento e aplicar o ajuste, das mesmas variáveis, associadas à deformação elástica da máquina e ferramenta de ensaios (obtidas ao realizar um ensaio em vazio, isto é, sem provete). A partir dessa mesma curva, é possível determinar a tensão limite de elasticidade, o módulo de Young (E), a lei de comportamento mecânico em domínio plástico (utilizando a mesma estratégia mencionada anteriormente) e os valores da tensão associados a uma, pré-determinada, percentagem de compressão (5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50%).

Flexão

Os ensaios de flexão foram executados na máquina de ensaios mecânicos Instron 5960 (Instron, 2024a), equipada com uma célula de carga de 10KN, com o apoio do programa Bluehill Universal (Instron, 2024b), a uma velocidade de 2 mm/min.

A Figura 3.15 ilustra a máquina de ensaios e o dispositivo utilizado na realização dos ensaios de flexão de três pontos (5 kN Flexure Fixture, cat. no. 2810-400 (Instron, 2012)). Adicionalmente, segundo a norma ASTM standard E290 (2014), é necessário realizar o cálculo, recorrendo à equação (11), e situar os suportes inferiores à distância correta. Neste caso, foi necessário determinar dois valores, visto que, como será analisado posteriormente, não se introduziu o fator de escala, para compensar a contração, na produção dos provetes por FFF, fazendo com que obtivéssemos peças com dimensões distintas dos provetes de SLM. Utilizaram-se distâncias no valor de 22 mm, para os provetes SLM (equação (12), e 20,2 mm, para os provetes FFF (equação (13)). Durante estes ensaios, registaram-se os valores de força e de deslocamento do cunho móvel da ferramenta de flexão.

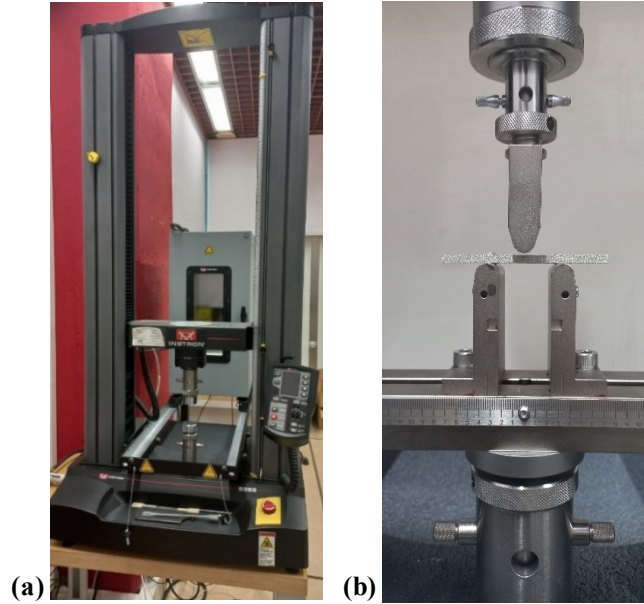


Figura 3.15: Máquina de ensaios universal Instron 5966K9184 (a) e equipamento para a realização de ensaios de flexão de 3 pontos 2810-400 (b).

$$C = 2r + 3t + \frac{t}{2} \quad (11)$$

- C = distância entre os suportes inferiores
- r = raio da zona de contacto do mandril
- t = espessura do provete

$$C_{\text{SLM}} = 2 \times 5 + 3 \times 4 \pm \frac{4}{2} = 22 \pm 2 \text{ mm} \quad (12)$$

$$C_{\text{FFF}} = 2 \times 5 + 3 \times 3,4 \pm \frac{3,4}{2} = 20,2 \pm 1,7 \text{ mm} \quad (13)$$

Por fim, a partir da curva força vs. deslocamento é possível determinar a tensão limite de elasticidade, o módulo de Young (E) e a lei de comportamento mecânico em domínio plástico.

3.4 Custos de produção

3.4.1 Modelo de custos

Nesta secção, apresenta-se um modelo de custos híbrido com a capacidade de ser aplicado, tanto ao processo de extrusão de filamentos metálicos (FFF), quanto à fusão seletiva por laser (SLM). O modelo foi obtido através da revisão e fusão de informações na literatura (FFF – Sartini et al. (2024); Hernandez Korner, et al. (2024); Sæterbø & Solvang (2023)) (SLM - Sequeira (2019); Remédios (2021)) e através da experiência e dados obtidos durante a concessão deste estudo.

O modelo proposto descreve com precisão os custos de produção de ambas as tecnologias, com o intuito de se identificarem vantagens financeiras ao comparar, diretamente, a evolução dos custos de produção unitários com a evolução do número de peças por lote, do número de peças produzidas anualmente e do custo do equipamento de fabrico. O estudo centra-se nos custos diretos associados aos processos de fabrico, para se fornecer uma estimativa precisa e consistente do custo por peça.

O modelo de custos baseia-se numa repartição de custos organizada em duas fases: Impressão e pós-processamento. A Figura 3.16 apresenta uma visão detalhada dos componentes dos custos de produção.

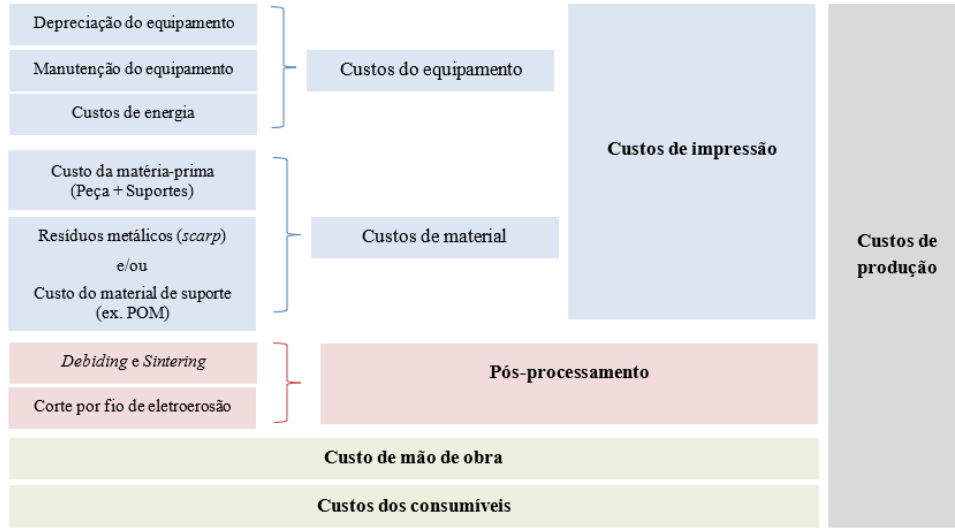


Figura 3.16: Componentes dos custos de produção do FFF e SLM. Adaptado de Sæterbø & Solvang (2023).

Os custos totais de produção podem ser, então, expressos como:

$$C_{\text{Total}} = C_{\text{Material}} + C_{\text{Máquina}} + C_{\text{Mão de obra}} + C_{\text{Consumíveis}} + (C_{\text{D\&S}} + C_{\text{Corte}}) \quad (14)$$

onde C_{Total} representa os custos totais de produção, C_{Material} os custos de material, $C_{\text{Máquina}}$ os custos do equipamento, $C_{\text{Mão de obra}}$ os custos de mão de obra, $C_{\text{Consumíveis}}$ os custos de consumíveis, $C_{\text{D\&S}}$ os custos do pós-processamento das partes impressas através de FFF e C_{Corte} os custos do pós-processamento das peças impressas por SLM.

As seguintes subseções descrevem os diferentes elementos da equação (14) em pormenor.

Custos de material

O cálculo dos custos de material, e respetivas fórmulas, são distintos entre tecnologias, visto que, existem variáveis inerentes a cada, que particularizam os cálculos. A tecnologia de produção SLM, exige considerar a percentagem de pó que é queimado no processo e não pode ser reutilizado na produção subsequente. Esta percentagem é o fator de perda de material ($\%scrap$). O custo do material é então calculado tendo em conta todo o pó utilizado, o preço do pó (P_{material}) e o preço de venda dos resíduos metálicos ($P_{\text{venda_scrap}}$), expresso como:

$$C_{\text{Material_SLM}} = (M_{\text{útil}} + M_{\text{scrap}}) \times P_{\text{material}} - (M_{\text{scrap}} \times P_{\text{venda_scrap}}) \quad (15)$$

onde a massa útil ($M_{\text{útil}}$) e a massa residual (M_{scrap}) de matéria-prima são determinadas segundo as equações (16) e (17), respetivamente.

$$M_{\text{útil}} = V_{\text{componente}} \times \rho_{\text{material}} \quad (16)$$

$$M_{\text{scrap}} = M_{\text{útil}} \times \%scrap \quad (17)$$

Por sua vez, o FFF, exige considerar o volume adicional de matéria-prima associado ao combate ao *shrinkage* ($\%shr$) e a quantidade de material de suporte utilizado (M_{POM}). Desta forma, a equação reorganizada pode ser expressa como:

$$C_{\text{Material_FFF}} = \left((V_{\text{componente}} + V_{\text{suporte}}) \times (1 + \%shr.)^3 \right) \times \rho_{\text{material}} \times P_{\text{material}} + \frac{(M_{\text{POM}} \times P_{\text{POM}})}{(18)} \quad (18)$$

onde a massa total de filamento utilizado é determinada pela multiplicação, após escala, do volume do componente ($V_{\text{componente}}$), e respectivo suporte (V_{suporte}), pela densidade do mesmo (ρ_{material}).

Custos de equipamento

Ao calcular os custos do equipamento, foram considerados três componentes: a depreciação da máquina (C_{dep}), o consumo energético (C_{energia}) e o custo de manutenção ($C_{\text{manutenção}}$). Estes são influenciados pelo tempo de impressão por peça (T_{imp}) e pelos custos de utilização da máquina por hora ($C_{\text{dep,h}}$). O custo total da máquina por peça é dado por:

$$C_{\text{Máquina}} = C_{\text{dep}} + C_{\text{manutenção}} + C_{\text{energia}} \quad (19)$$

Para determinar o custo de depreciação da máquina por peça (C_{dep}), é necessário calcular o custo de depreciação por hora ($C_{\text{dep,h}}$) e o custo de depreciação anual ($C_{\text{dep,a}}$). A respectiva relação entre os mesmos é dada por:

$$C_{\text{dep}} = C_{\text{dep,h}} \times T_{\text{imp}} \quad (20)$$

$$C_{\text{dep,h}} = \frac{C_{\text{dep,a}}}{H_{\text{imp/ano}}} \quad (21)$$

$$C_{\text{dep,a}} = \frac{P_{\text{máquina}}}{Y} \quad (22)$$

onde $H_{\text{imp/ano}}$ representa o tempo de atividade anual do equipamento, dado pelo número de horas anuais nas quais a máquina está em funcionamento. Adicionalmente, para determinar o custo de depreciação anual ($C_{\text{dep,a}}$), é necessário ter conhecimento do custo do equipamento ($P_{\text{máquina}}$) e o tempo de vida do mesmo (Y).

O custo do consumo energético por peça é estimado ao multiplicar o tempo de impressão por peça (T_{imp}), o consumo energético do equipamento ($Pot_{\text{máquina}}$) e o preço da eletricidade ($P_{\text{eletricidade}}$).

$$C_{\text{energia}} = T_{\text{imp}} \times Pot_{\text{máquina}} \times P_{\text{eletricidade}} \quad (23)$$

Por último, os custos de manutenção por peça podem ser calculados ao utilizar os custos de manutenção por hora e o tempo de impressão por peça. Assim, o custo de manutenção por peça é dado por:

$$C_{\text{manutenção}} = \frac{P_{\text{máquina}} \times PM\%}{H_{\text{imp/ano}}} \times T_{\text{imp}} \quad (24)$$

onde $PM\%$ representa a percentagem do custo de manutenção relativamente ao preço total de compra da máquina ($P_{\text{máquina}}$).

Custos de mão de obra

Os custos diretos de mão de obra para ambos os processos de produção baseiam-se no tempo gasto no fabrico de uma peça (T_e) multiplicado pela taxa horária de trabalho do operador (P_{operador}). O processo de impressão é automatizado, sendo assim, não existe a necessidade de o operador permanecer, a tempo inteiro, durante o processo de impressão.

No entanto, é necessário que o operador configure o equipamento, observe esporadicamente a impressão, remova as peças fabricadas, limpe as mesmas, prepare a máquina para a próxima construção e, caso necessário, efetue as etapas de pós-processamento necessárias. Assim, os custos de mão de obra podem ser expressos como:

$$C_{\text{Mão de obra}} = \sum_e (T_e \times P_{\text{operador}}) \quad (25)$$

onde (e) representa os elementos das diferentes etapas de produção descritos previamente.

Custos de consumíveis

Os consumíveis são os materiais (não incluindo as matérias-primas) utilizados na produção e incluem todos os elementos que necessitem, eventualmente, de ser trocados. Podem incluir, o bico de extrusão, a cola para a mesa de impressão, as cabeças de impressão, filtros para os equipamentos, entre outros. O custo dos consumíveis é calculado de acordo com o preço de compra unitário (P_i) e a quantidade utilizada (N_i), desta forma, é possível estimar o custo da seguinte forma:

$$C_{\text{Consumíveis}} = \sum_i (N_i \times P_i) \quad (26)$$

onde (i) representa os elementos considerados ao longo do processo de produção.

Custos de pós-processamento

Os custos de pós-processamento considerados por este modelo referem-se às etapas necessárias, no caso da tecnologia FFF, para a obtenção das peças metálicas, ou seja, o custo associado aos processos de D&S.

É possível que a própria empresa efetue estes tratamentos caso adquira as ferramentas necessárias, ou, por outro lado, o tratamento é subcontratado a uma entidade externa. Este modelo, para o D&S, considera que o tratamento foi subcontratado, utilizando, como referência, os custos por shelf assinalados pelas empresas Elnik Systems e DSH Technologies, em cooperação com a empresa Foward AM (Forward AM, 2024e). A referência indica para um custo de 230 € por 2 kg de material ou por 300x200 mm e altura máxima de 100 mm. Sendo assim, é possível determinar o custo por peça ao organizar os cálculos da seguinte forma:

$$C_{\text{D\&S}} = \frac{P_{\text{D\&S}}}{N_{\text{shelf}}} \quad (27)$$

onde $P_{\text{D\&S}}$ representa o preço do tratamento por prateleira e N_{shelf} o número máximo de peças que a compõem.

Não obstante, o modelo, no caso da tecnologia SLM, não incorpora o cálculo dos custos associados à separação das peças metálicas da base (corte por fio de eletroerosão) (C_{Corte}), pois foram considerados, para o custo ligado a este processo, os dados obtidos em contacto com o Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos (CENTIMFE).

Todavia, noutro estudo ou ocasião, caso existe a necessidade de incorporar o cálculo dos custos da separação das peças, é possível recorrer à estratégia expressa pela equação (19), adquirir os equipamentos necessários, ou pela equação (27), subcontratar o processo.

3.4.2 Caso de estudo e suposições

O objetivo do caso de estudo é avaliar a competitividade e a viabilidade da extrusão de filamentos metálicos ao implementar o modelo desenvolvido na secção anterior. Em particular, pretende-se comparar o custo de produção do FFF com o do SLM, a fim de se determinar em que situação o FFF poderia competir com outro processo de fabrico aditivo relativamente mais consolidado.

O caso de estudo foi concebido para fornecer uma aplicação prática do modelo de custos, para validar a sua eficácia na previsão do custo de produção de ambas as tecnologias e para prever a influência da variação da dimensão do lote de produção, do custo do equipamento e da produção anual, no custo de fabrico por peça. Para tal, seleccionou-se uma peça de fácil estudo e na qual se obteve bastantes dados, para que se pudesse avaliar a viabilidade com maior exatidão. Desta forma, o componente selecionado é constituído por dois provetes de tração, com as dimensões apresentadas na Figura 3.2, com orientações de impressão distintas e duas camadas externas (Figura 3.17).

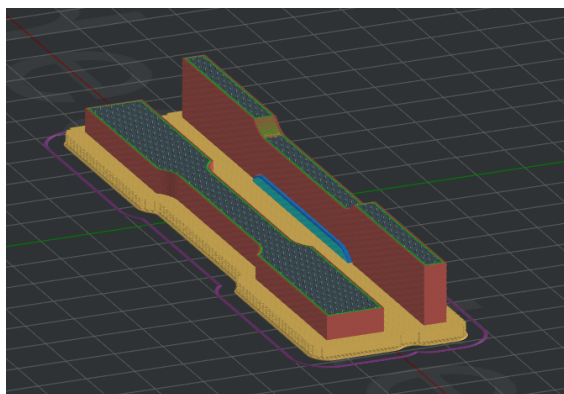


Figura 3.17: Peça selecionada para o caso de estudo. Constituída por dois provetes de tração com orientações de impressão distintas e duas camadas externas.

Para se recolher os dados necessários para o desenvolvimento do caso de estudo, recorreu-se ao programa IdeaMaker for Metals para simular a impressão da peça selecionada. Documentaram-se os tempos de impressão e quantidade de material utilizado ao longo da produção. Em contacto com o CENTIMFE foi possível obter dados, para a mesma peça, associados ao SLM. Além disso, recolheram-se dados externos, incluindo os preços da eletricidade, o custo de mão de obra especializada, os preços dos equipamentos e materiais, para garantir que os cálculos fossem o mais exatos possível. Os valores utilizados, respetivas referências e métodos de cálculo podem ser consultados na Tabela C.9, em anexo.

Alguns dos dados selecionados e cálculos realizados estabelecem-se em determinadas suposições:

- Outras variáveis de custos, tais como, por exemplo, vendas, marketing, administração, armazenamento e eliminação ou stock, não estão incluídas na análise, uma vez que são frequentemente difíceis de estimar e podem variar muito consoante a empresa e processo de produção. Concentrou-se nos custos diretamente associados à produção, para se obter um modelo de custos mais simples e fácil de aplicar.

- Assumiu-se que os custos de instalação do equipamento e a garantia estão incluídos no preço de compra.
- As empresas fornecedoras dos equipamentos de produção não definiram a esperança de vida dos mesmos. Fixou-se os valores com base no estudo de Hernandez Korner, et al. (2024) e Sæterbø & Solvang (2023), para a impressora FFF, e de Sequeira (2019), para o equipamento de SLM. Adicionalmente, não existem custos de manutenção pré-definidos, desta forma, como orientação geral, assumiu-se o custo de manutenção como 5% do preço de compra da máquina por ano, caso o fator de uso anual seja igual ou inferior a 50%. A partir desse valor, o custo de manutenção é igual a $\frac{\%Fator\ de\ uso}{10}$ %, atingindo o valor mais alto, 10%, se o fator de uso for 100%. O fator de uso representa a relação entre o número de horas anuais disponíveis e o número de horas anuais que o equipamento está a trabalhar.
- Os elementos de custos, no caso do processo de fabrico SLM, associados ao arranque e ao pós-processamento, incorporam o custo do operador durante a inicialização da produção e a separação das peças, respetivamente. Desta forma, o tempo por impressão contabilizado no custo de mão de obra é indicativo do trabalho do operador no *setup* e limpeza do equipamento.

4. Análise de resultados

4.1 Precisão dimensional, exatidão dimensional e contração

A análise, realizada nesta subsecção, será exposta de acordo com a quantidade de variáveis dimensionais dos provetes, ou seja, apresentar-se-ão os resultados, e a respetiva análise, na seguinte ordem: provetes cúbicos, cilíndricos, de flexão e de tração. A ordem selecionada expõe os resultados do provete geometricamente mais simples para o mais complexo, visto que, como será avaliado posteriormente, a estrutura e o design tendem a influenciar consideravelmente os resultados.

4.1.1 Provetes cúbicos

Antes de analisar os resultados obtidos, é importante referir que, os provetes verdes cúbicos, possuem um erro inerente à medição na direção Z, que, devido à presença do *raft* e da camada de suporte de POM (Figura 3.4), dificultam a utilização correta dos equipamentos de medição. Por este motivo, as medições realizadas nesta direção tendem a ser superiores à realidade (teoricamente, a camada de POM possuiu uma dimensão de 0,45 mm). De modo a eliminar a presença da camada de material de suporte optou-se por retirar o valor de 0,45 mm às medições na direção Z e avaliar o valor resultante.

Ao verificar a coerência dimensional entre o modelo para impressão e os provetes verdes (Figura 4.1), é possível verificar que, para a direção X e Y, a exatidão entre as medidas tende a aumentar com o aumento do número de camadas. Todavia, o erro relativo, segundo Z, manteve-se aproximadamente constante entre todos os provetes, pois, nesta direção, as camadas externas não possuem interferência física. Os valores apresentados são relativamente reduzidos, sendo um excelente indicador da exatidão de impressão nesta direção.

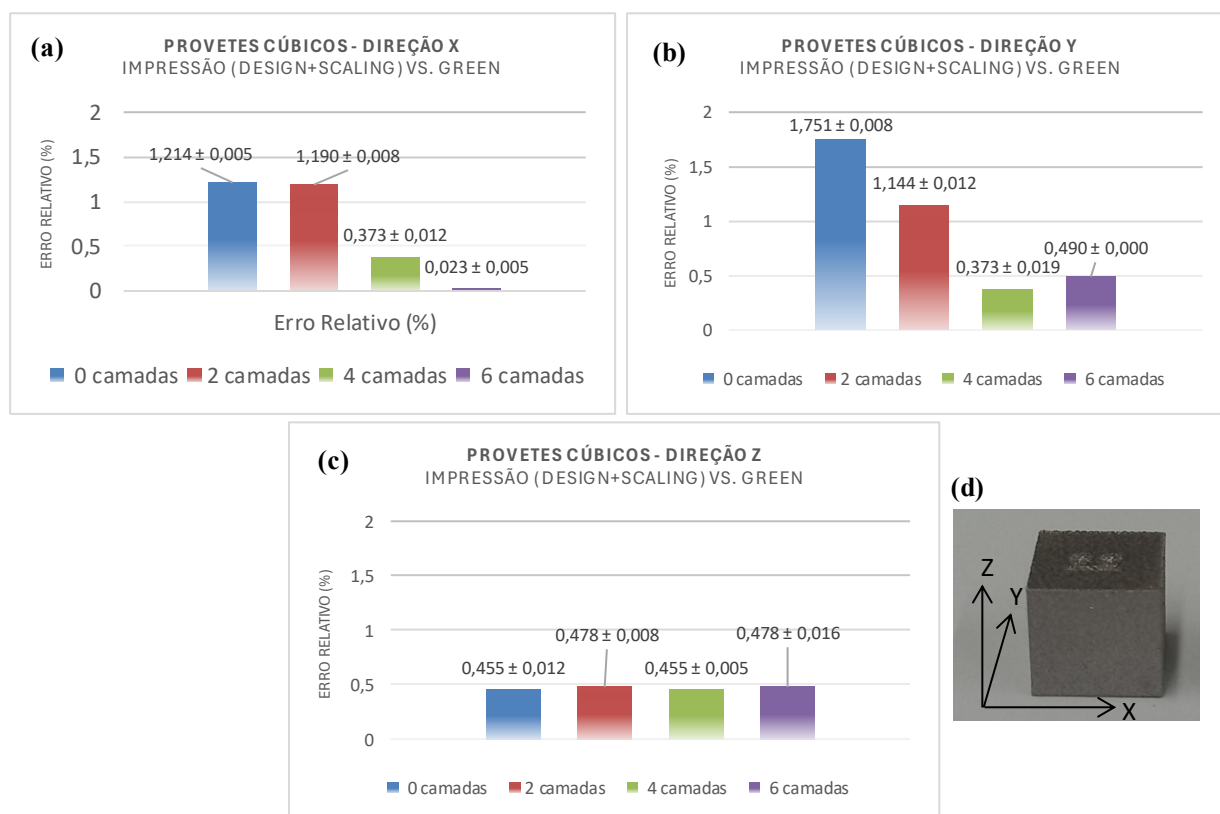


Figura 4.1: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo para impressão e os provetes cúbicos verdes nas direções (a) X, (b) Y e (c) Z. (d) Exposição de uma representação dos provetes cúbicos e respetivos eixos.

A análise da contração dimensional entre os provetes verdes e brancos (Figura 4.2), permite verificar uma tendência para a redução percentual da contração com o aumento do número de camadas nas três direções, com a exceção dos provetes com 2 camadas externas que apresentam uma leve subida. Este facto era de se esperar, visto que o aumento do número de camadas promove a compactação do preenchimento (ao reduzir a possibilidade de dispersão do material durante a impressão), levando à redução da distância média entre partículas metálicas, ou seja, à redução da quantidade e dimensão dos vazios presentes nas peças.

Todavia, ao introduzir-se fatores de escala inferiores ao recomendado (Tabela 3.1), principalmente na direção Z, verificou-se que a contração foi sempre superior ao valor coberto pelo sobredimensionamento. De acordo com as equações fornecidas pela Foward AM (Forward AM, 2024c), o fator de escala nas direções X e Y – 19% e Z – 22% seriam adequados para uma contração de 16% e 18%. Assim, com valores e contração de, aproximadamente, 17% a 18,5% e 19,4% a 20,4%, para as direções X / Y e Z, respetivamente, implicaria o uso de valores de fatores de escala de 20,5% a 22,7% e 24,1% a 25,6%, intervalos que se apresentam bastante coerentes aos valores recomendados pela Foward AM.

Desta forma, é possível prever que as dimensões das peças brancas sejam inferiores às pretendidas em todas as direções. Porém, ao conjugar o erro por excesso da impressão e o erro por defeito do *scaling*, é possível que o desvio final seja minimizado. Ainda assim, como o erro por defeito é superior, supõe-se que as dimensões sejam inferiores aos valores pretendidos.

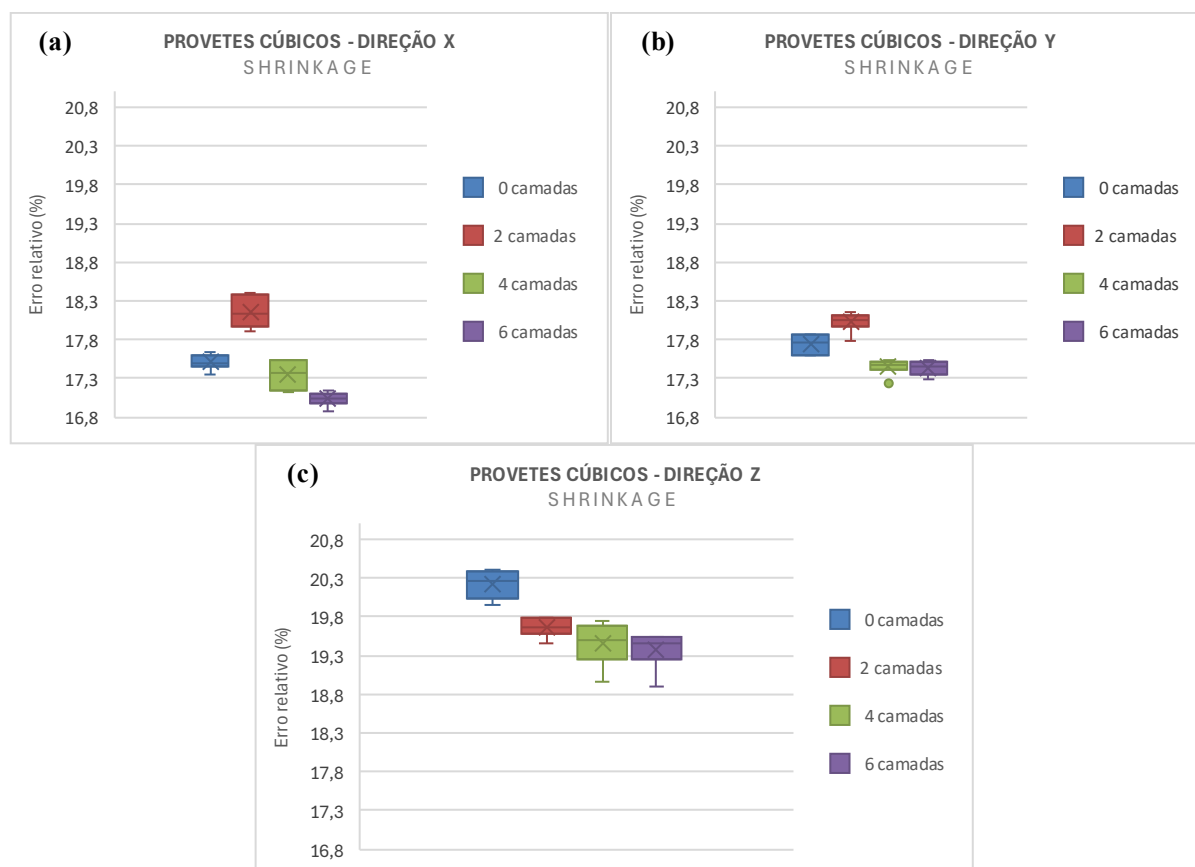


Figura 4.2: Erro relativo percentual entre as dimensões dos provetes cúbicos verdes e brancos nas direções (a) X, (b) Y e (c) Z.

Por fim, ao analisar os valores do erro relativo entre o modelo 3D e as peças brancas (Figura 4.3), com a adição das dimensões associadas aos provetes de SLM, verifica-se, primeiramente, uma proximidade entre os conjuntos de provetes com camadas externas (2, 4 e 6), sendo notória a distinção, dos mesmos, perante o provete impresso sem camadas externas. Este fenómeno pode ser justificado pela compactação provida pelas camadas externas, o que, obstrui a dispersão do material nas direções X e Y, ou seja, no caso dos provetes sem camadas externas, existe a possibilidade de que, durante a impressão, o material flua nas diferentes direções, levando à redução da dimensão na direção Z e o aumento desigual nas direções X e Y.

Adicionalmente, verifica-se um contraste entre a elevada exatidão dimensional dos provetes de SLM nas direções X e Y, e a variabilidade dimensional apresentada na direção Z. Porém, na generalidade, os provetes de SLM apresentam dimensões mais exatas, nas três direções, quando comparados com os provetes de FFF.

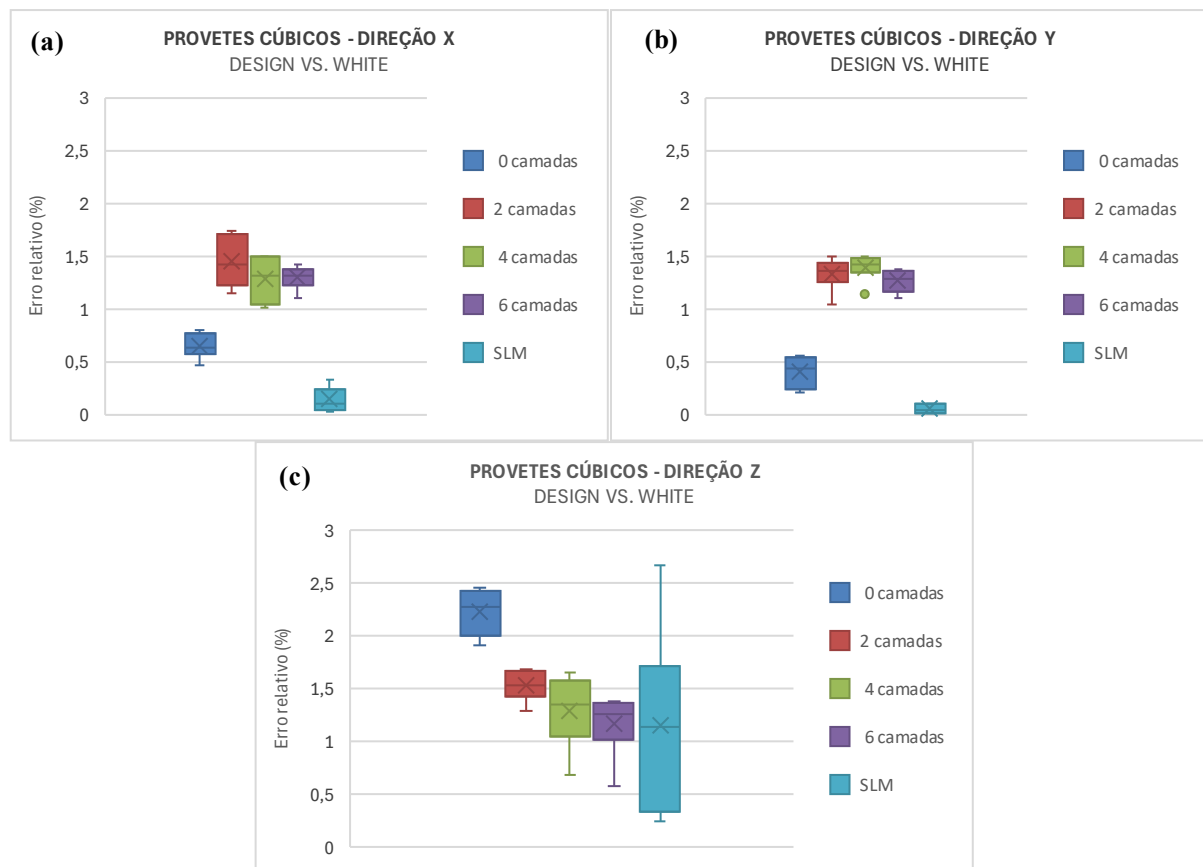


Figura 4.3: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo 3D e dos provetes cúbicos brancos nas direções (a) X, (b) Y e (c) Z.

4.1.2 Provetes cilíndricos

À semelhança dos provetes cúbicos, os provetes cilíndricos possuem um erro na medição da direção Z (Figura 3.5), valor associado à altura dos provetes impressos em pé (*upright*) e ao diâmetro, nessa mesma direção, dos provetes impressos deitados (*flatwise*).

Ao analisar os dados entre o modelo para impressão e os provetes verdes (Figura 4.4), verifica-se que, em todas as direções (X, Y e Z) dos provetes *upright*, a exatidão tende a ampliar com o aumento do número de camadas, sendo notório, um salto significativo entre os provetes sem camadas externas e os provetes com.

No caso dos provetes *flatwise*, verifica-se que a direção de impressão surte um leve impacto na exatidão dimensional, fazendo com que, tanto em altura como em diâmetro, os provetes impressos na direção do eixo Y (FFFcil_Y_F_2) possuam um erro relativo superior entre a dimensões do modelo para impressão e os provetes verdes. Normalmente, a direção de impressão não sortearia efeito na produção dos provetes, no entanto, como se verificará nos restantes provetes, este fator mantém a sua influência independentemente da geometria impressa. Ao tentar identificar uma possível causa para este desvio, verificou-se que, ao contrário de outros equipamentos, o eixo de deslocação na direção Y, desta impressora, tem o seu movimento dependente do eixo na direção X (Figura 4.5), o que implica que erros associados ao eixo primário (desalinhamentos, folgas, variabilidade de carga, entre outros) propagar-se-ão, com um agravante, para o eixo dependente.

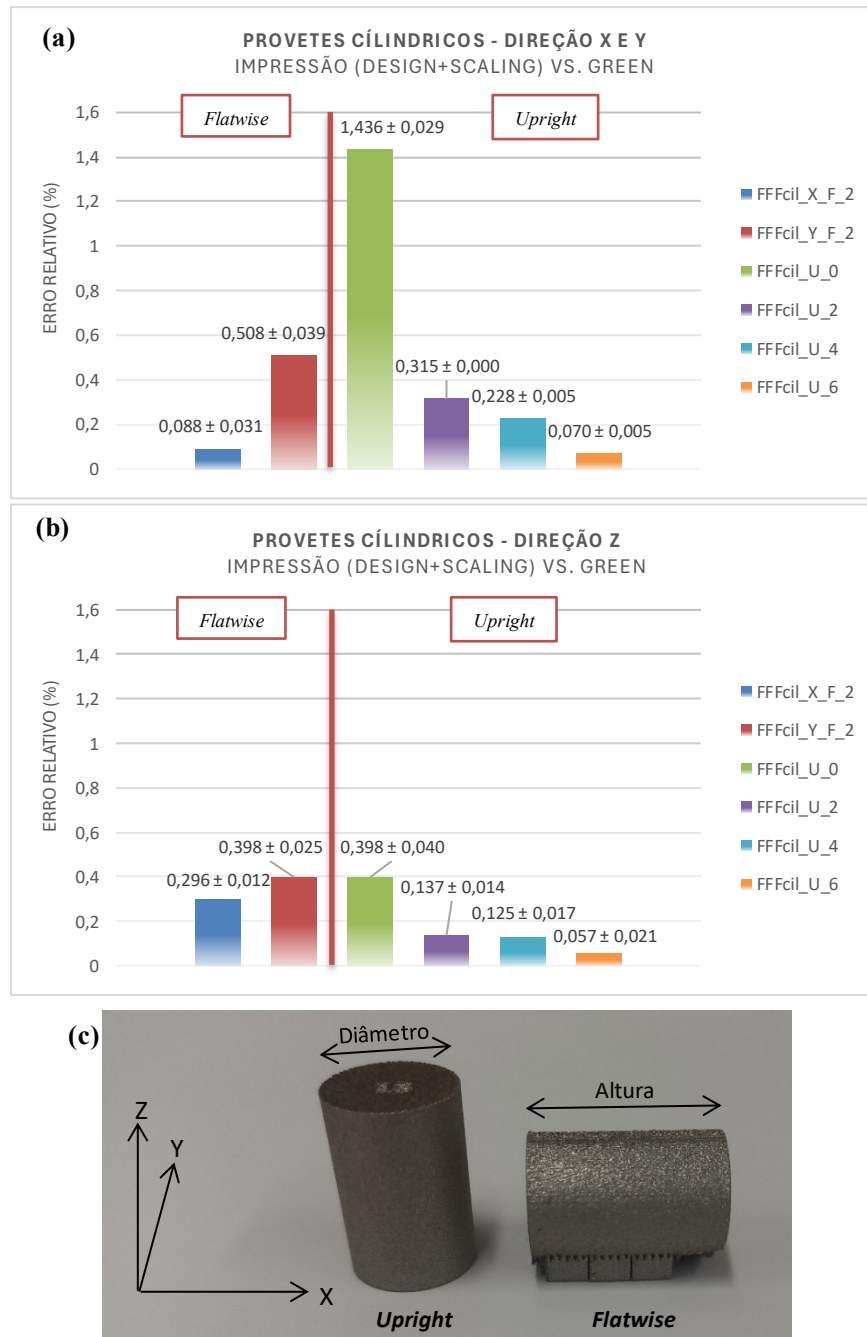


Figura 4.4: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo para impressão e os provetes cilíndricos verdes nas direções (a) X / Y e (b) Z. (c) Exposição de uma representação dos provetes cilíndricos, respetivos eixos e dimensões.

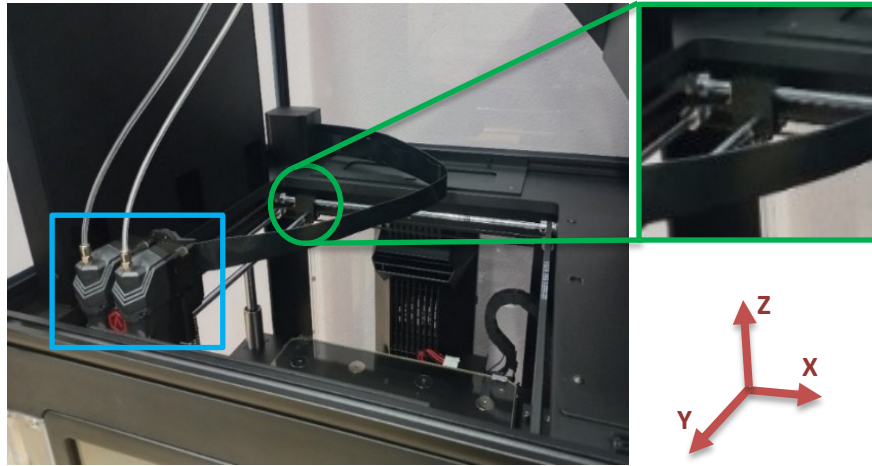


Figura 4.5: Sistema de eixos da impressora Forge1 da Raised3D (RAISE3D, 2024d). O círculo verde representa uma das conexões entre os eixos X e Y e o quadrado azul representa a cabeça de extrusão.

Em seguida, ao estudar a redução dimensional entre os provetes verdes e brancos (Figura 4.6), é possível verificar que, para os provetes *upright*, o número de camadas promove uma variação significativa do *shrinkage* entre os provetes com e sem camadas. Todavia, a leve subida do valor da contração no diâmetro (X e Y), para os provetes com maiores números de camadas, pode estar relacionado com a delaminação observada nos mesmos.

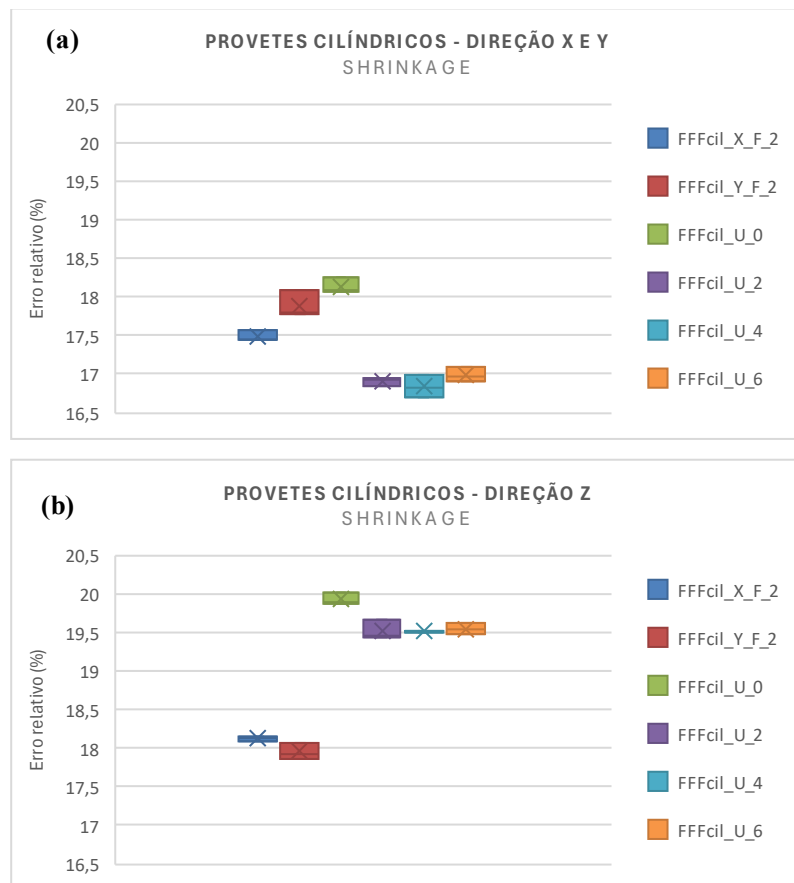


Figura 4.6: Erro relativo percentual entre as dimensões dos provetes cilíndricos verdes e brancos nas direções (a) X / Y e (b) Z.

Os valores da contração são muito similares aos valores observados para os provetes cúbicos, ou seja, cerca de $X / Y - 17\%$ a 18% e $Z - 20\%$. Todavia, os valores do mesmo destoam na direção Z para os provetes impressos deitados. Esta variação permite identificar que variações dimensionais e estruturais tendem a influenciar os resultados da contração durante o processo de D&S, neste caso, o salto entre produção da altura (provetes em pé) e do diâmetro (provetes deitados), representativo de uma redução dimensional teórica de 33% , provocou uma variação do *shrinkage* de, aproximadamente, $1,5\%$. Seguindo a mesma lógica, na direção X e Y, é notória uma variação na mesma proporção ($1,5\%$ a 2%), ao comparar os provetes com orientações de impressão distintas e a mesma quantidade de camadas externas.

Por fim, ao analisar os valores do erro relativo entre o modelo 3D e as peças brancas (Figura 4.7), com a adição das dimensões associadas aos provetes de SLM, verifica-se, assim como se apurou nos provetes cúbicos, uma proximidade entre os conjuntos de provetes com camadas externas, sendo notória uma variação significativa para o provete sem camadas na direção Z. Os provetes impressos deitados apresentam erros reduzidos associados à impressão do diâmetro (direção Z), a variação está relacionada aos valores reduzidos do *shrinkage* que, em adição à precisão de impressão, promovem a proximidade entre os provetes de FFF e de SLM. Todavia, no geral, os erros associados aos provetes de SLM são inferiores, em ambas as orientações de impressão, em comparação aos provetes de FFF.

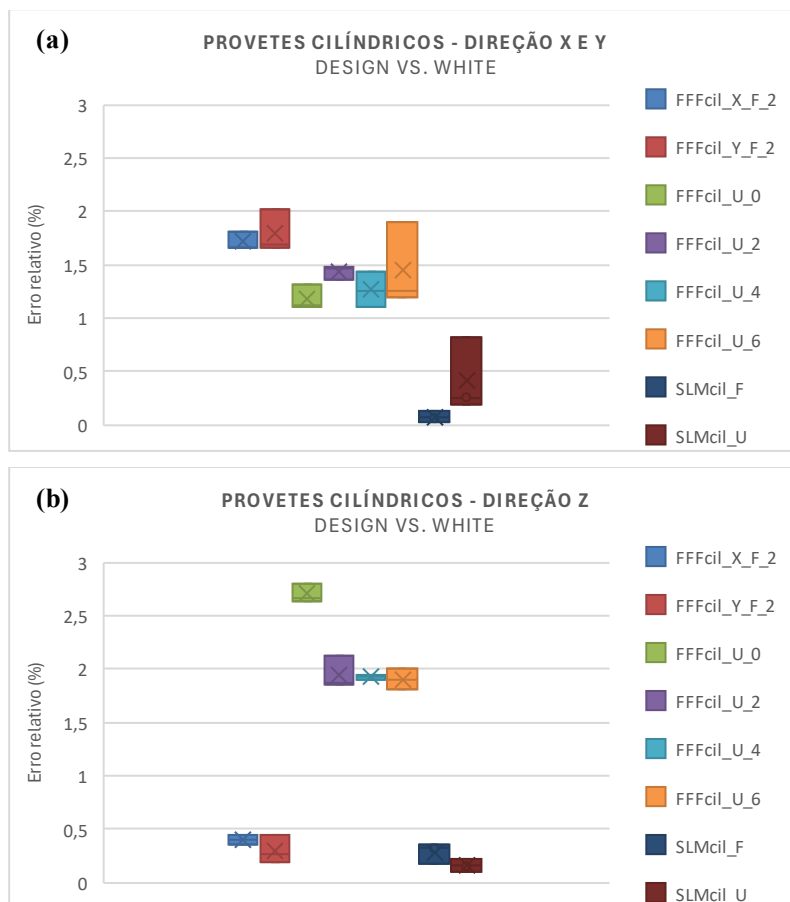


Figura 4.7: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo 3D e dos provetes cilíndricos brancos nas direções (a) X / Y e (b) Z.

4.1.3 Provetes de flexão

À semelhança dos provetes anteriores, a direção Z possuiu um erro de medição associado à presença do *raft* e do material de suporte (Figura 3.7). Além disso, como mencionado na secção 3.3, não se introduziu o fator de escala na produção dos provetes por FFF, fazendo com que os provetes adquirissem dimensões inferiores às pretendidas (Figura 4.8). Este lapso impediu a realização da terceira análise (comparação entre a dimensão final pretendida e a dimensão do provete branco).



Figura 4.8: Distinção dimensional entre os provetes e flexão SLM e FFF (lapso na inclusão do fator de escala).

A complexidade da análise cresce exponencialmente com o número de dimensões distintas a avaliar, neste caso, o estudo da altura, do comprimento e da largura, exige a divisão dos gráficos entre as direções X, Y e Z e entre as diferentes direções de impressão (X e Y) (Figura 4.9).

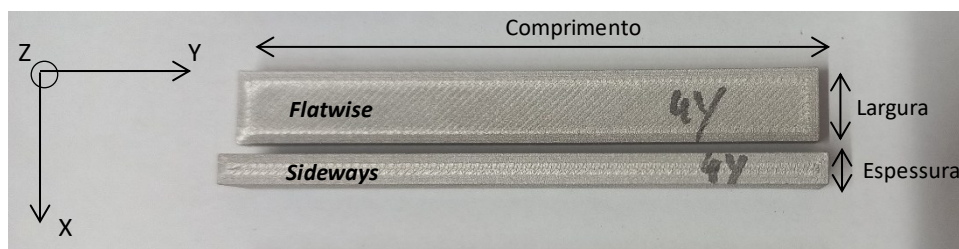


Figura 4.9: Exposição de uma representação dos provetes de flexão, respetivos eixos e dimensões.

Ao avaliar os dados entre o modelo para impressão e os provetes verdes (Figura D.1, em anexo), verifica-se que, à semelhança das avaliações anteriores, de forma geral, o aumento do número de camadas exteriores promove a coerência dimensional entre as variáveis estudadas, notando-se o aparecimento de pequenas exceções quando se trata de provetes com um maior número de camadas, visto que estes estão sujeitos a um maior efeito da desagregação dessas mesmas camadas. Adicionalmente, o impacto da direção de impressão é bastante notável, averiguando-se aumentos nos erros relativos associados à mesma dimensão quando impressos na direção Y.

Ao comparar os resultados obtidos, para a mesma dimensão e direção de impressão, entre as diferentes orientações de impressão (deitado e de lado), é possível verificar uma elevada proximidade entre ambas. Não obstante, as pequenas diferenças seguem uma lógica definida, no caso das direções X e Y, os provetes impressos de lado apresentam, na generalidade, erros relativos superiores. Na direção Z, o erro associado à largura (provetes

sideways) é, em geral, inferior ao erro associado, na mesma direção, aos provetes deitados. Este fator pode resultar da quantidade de material que tende a fluir durante a impressão dos provetes e que afeta, notoriamente, a dimensão na direção Z. Assim, os provetes com maior área no plano XY, deterão, tendencialmente, as dimensões, na direção Z, afetadas com maior regularidade e intensidade.

Ao estudar a redução dimensional entre os provetes verdes e brancos (Figura D.2, em anexo), contrastando com o que se verificou nos provetes anteriores, o efeito do aumento do número de camadas no *shrinkage* não é notável. Contudo, os valores da contração mantiveram-se bastante semelhantes aos casos anteriores, apresentando valores, para X e Y, que se situam, maioritariamente, entre 16% a 17% e, para Z, entre 18% a 20%. Apesar de se notar alguma variação, no geral, os valores conservaram-se entre provetes com orientação de impressão, direção de impressão e número de camadas distintos.

4.1.4 Provetes de tração

Primeiramente, à semelhança dos restantes provetes, as dimensões na direção Z (Figura 3.3) apresentam um erro associado à presença de material POM e da estrutura de suporte.

Ao analisar os dados entre o modelo para impressão e os provetes verdes (Figura D.3, em anexo), verifica-se que, em primeiro lugar, a exatidão dimensional aumenta com o número de camadas externas, em seguida, observa-se o impacto da complexidade geométrica na impressão, sendo possível notar que os erros determinados são, no geral, consideravelmente superiores aos dos provetes de flexão (Figura 4.10). Ininterruptamente, é possível apurar que o efeito da direção de impressão aparenta ser menos marcante, sendo que, as variações tomam-se pouco notórias, ou seja, para a mesma dimensão, provetes impressos na direção X e Y apresentam valores muito próximos. A nível de exemplo, ao considerar um provete impresso deitado de quatro camadas externas e a dimensão de maior valor, ou seja, o comprimento (com o valor teórico de 119 mm), o erro associado ao provete impresso na direção X (FFF_X_F_4) é de 0,15% e na direção Y (FFF_Y_F_4) é de 0,10%. Apesar de se apresentar somente um caso, a partir dos gráficos apresentados, é possível certificar o ocorrido para todos os provetes e respetivas dimensões. No caso da orientação de impressão (deitado ou de lado), não existem diferenças significativas, sendo possível verificar no primeiro ou quarto gráfico, por exemplo, que o impacto da orientação de impressão, para a mesma dimensão, não é notável. Por último, verifica-se que os erros de maior valor estão associados à dimensão mais pequena, a espessura (com um tamanho teórico de 4,88 mm), para qualquer uma das direções estudadas. Confirmando a dificuldade de se imprimir estruturas complexas de pequenas dimensões, onde uma pequena variação de dimensão está associada a um elevado erro.

Em seguida, ao estudar a redução dimensional entre os provetes verdes e brancos (Figura D.4, em anexo), é possível verificar que, na generalidade e como apurado anteriormente, o aumento do número de camadas promove a redução do *shrinkage* dos provetes. Além disso, observa-se que as dimensões com maior erro de impressão, identificadas previamente, apresentam valores superiores e mais irregulares de *shrinkage*. Facto que é ilustre nos restantes provetes e justificável pela irregularidade na impressão que, por sua vez, promove a formação de um maior número de vazios e influencia diretamente a contração do provete no processo de D&S. Não obstante, os valores são ligeiramente superiores aos determinados previamente, apresentando, em adição, maior variação entre provetes impressos com as mesmas propriedades. Assim, os dados tendem a variar entre 16,5% a 19%, para X e Y, e 19% a 21% para Z.

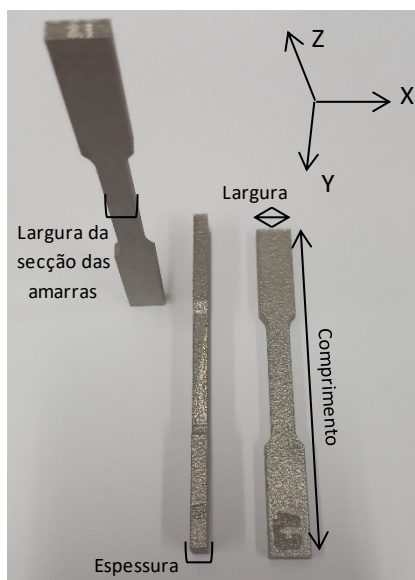


Figura 4.10: Exposição de uma representação dos provetes de tração, respetivos eixos e dimensões.

Por fim, ao analisar os valores do erro relativo entre o modelo 3D e as peças brancas (Figura D.5, em anexo), com a adição das dimensões associadas aos provetes SLM, verifica-se que as secções de maior dimensão, no caso dos provetes FFF nas direções X e Y, apresentam valores bastante reduzidos e coerentes entre si enquanto, as secções de menor dimensão, apesar de apresentarem alguns valores bastante bons, é notável uma maior irregularidade nos dados.

No caso dos resultados para os provetes FFF na direção Z, o erro relativo manteve-se abaixo dos 3% para todos os provetes, sendo notável, como determinado para os provetes de flexão, que o erro dos provetes impressos deitados é, tendencialmente, inferior aos provetes impressos de lado, independentemente da direção de impressão. A quantidade de material a fluir durante a impressão dos provetes deitados é superior, resultando na diminuição da espessura e aproximando o resultado ao valor esperado. Adicionalmente, os provetes com menor quantidade de camadas externas possuem erros inferiores, visto que, de forma semelhante, o menor efeito da compactação, provido pela falta dessas mesmas camadas, permite aproximar as dimensões.

No caso dos provetes SLM, independentemente da orientação de impressão, as secções de maior dimensão, o comprimento e a largura, apresentam erros bastante reduzidos. Por outro lado, ao avaliar os resultados da espessura e da largura na secção das amarras, observa-se que, quando esta dimensão está associada à direção Z, o erro é bastante superior e irregular em comparação, com esta mesma medição, aquando realizada nas restantes direções. O provete impresso em pé foi o único no qual, a dimensão associada à direção Z (comprimento), foi insignificativamente afetada pela dificuldade comum ligada à precisão de impressão nesta direção. Excluindo os resultados da secção da largura das amarras para o provete de SLM de lado, os restantes valores são muito semelhantes aos dados determinados para os provetes FFF, desta forma, ao contrário do que se tem vindo a notar, no caso dos provetes de tração, os provetes de SLM não apresentam superioridade na exatidão dimensional da impressão.

4.1.5 Conclusão

Da análise efetuada relativamente à precisão e exatidão dimensional das geometrias na fase de impressão, verificou-se, que, de um modo geral, o aumento do número de camadas promove a redução do erro na impressão e que, tendencialmente, os provetes verdes são impressos com dimensões superiores às de design (poucos casos de provetes com dimensões inferiores às pré-determinadas foram encontrados). Determinou-se um erro relativo médio, entre as dimensões dos provetes verdes e as respetivas dimensões de design, de $1,230 \pm 1,584$ %.

Relativamente às etapas de pós-processamento (D&S), conclui-se que as contrações lineares associadas foram de $17,147 \pm 1,284$ %, nas direções X e Y, e de $19,247 \pm 1,067$ %, segundo Z (que correspondem a valores de escala na fase de preparação das impressões de $20,696 \pm 1,527$ % e $23,834 \pm 1,336$ %, respetivamente). Foi também possível apurar que, devido ao sistema de guia da cabeça de impressão, no geral, os provetes impressos na direção Y apresentavam erros de impressão ligeiramente superiores aos provetes impressos na direção X.

Por fim, o erro entre os provetes finais e as dimensões pretendidas, para todos os tipos de provetes, foi de $1,184 \pm 0,679$ %, podendo ser, este valor, reduzido através do ajuste do sobredimensionamento na fase de preparação de impressão. O valor desta variável, associada aos provetes produzidos por SLM, foi de $1,182 \pm 1,670$ %.

Ao confrontar os dados analisados perante os resultados expostos na Tabela C.2 e Tabela C.3, é possível verificar que, primeiramente, o erro relativo, associado aos provetes cúbicos brancos, é superior ao apresentado por Wang et al. (2023) (Tabela C.2 – N°5). Contudo, a diferença está dependente do sobredimensionamento imposto, ou seja, como foi selecionado, no presente estudo, um valor de escala inferior ao recomendado/necessário, os provetes obtidos foram relativamente menores aos pretendidos. Alterar o valor permitirá obter resultados muito mais coerentes com os estudos mencionados. Em seguida, ao particularizar a análise da contração, é observável uma concordância entre os valores determinados e os estudos mais recentes (Ait-Mansour et al., 2020; Wang et al., 2023; Tosto et al., 2021), nos quais, independentemente da geometria projetada, a contração nas direções X e Y situa-se entre 16% a 19% e em Z de 19% a 24%.

Apesar de todos os dados obtidos e da respetiva análise, é necessário indicar o peso desta secção perante o processo completo e as propriedades mecânicas e dimensionais das partes utilizadas na indústria e pelo mercado. No geral, as peças obtidas por qualquer processo de fabrico aditivo não são comercializadas e utilizadas sem acabamento, pois as operações de pós-processamento apresentam-se indispensáveis para a obtenção de melhorias mecânicas e geométricas. Assim, dependendo das estratégias de acabamento geométrico e superficial das peças ou das tolerâncias dimensionais do local de implementação, a importância desta secção é minimizada sem prejudicar os componentes fabricados.

4.2 Densidade

Conforme descrito na secção 2.3.2.2, a densidade está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas dos componentes produzidos por fabrico aditivo. A dimensão, a distribuição e o formato dos poros são as características que condicionam a resistência mecânica das peças produzidas.

Os dados apresentados na Figura 4.11 e Figura 4.12, ilustram o erro relativo médio da densidade das peças produzidas perante o valor de referência da densidade ($7,98 \text{ g/cm}^3$) e permitem analisar a porosidade das peças

produzidas no âmbito deste trabalho, essencial para prever o impacto nas características das peças produzidas e na resistência mecânica das mesmas.

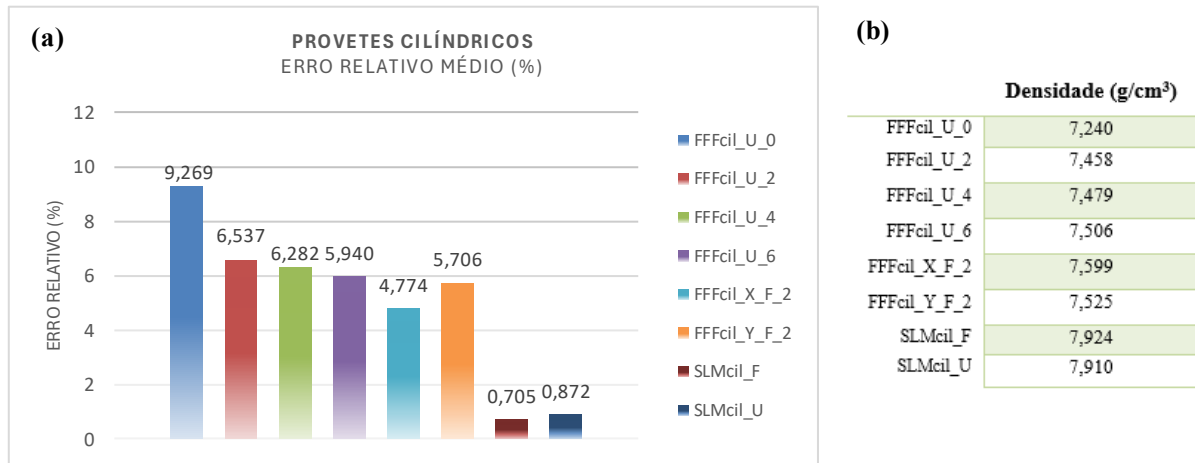


Figura 4.11: (a) Gráfico do erro relativo médio da densidade dos provetes cilíndricos (valor de referência = 7,98 g/cm³) e (b) tabela da densidade em g/cm³ desses mesmos provetes.

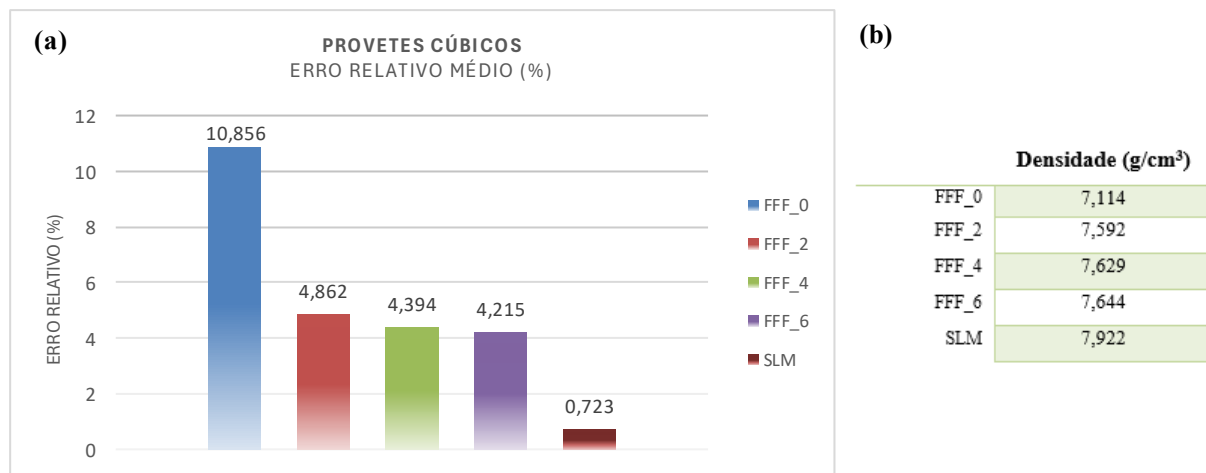


Figura 4.12: (a) Gráfico do erro relativo médio da densidade dos provetes cúbicos (valor de referência = 7,98 g/cm³) e (b) tabela da densidade em g/cm³ desses mesmos provetes.

Em primeiro lugar, é possível observar o impacto das camadas externas, as quais, quanto maior for a sua quantidade, até ao limite estudado de seis camadas, proporcionam o aumento da densidade. Tendo-se obtido um impacto significativo entre os provetes com e sem camadas. Identificou-se um aumento da densidade de 7,240 g/cm³ para 7,458 g/cm³ e de 7,114 g/cm³ para 7,592 g/cm³, associado aos provetes cilíndricos e cúbicos, respetivamente. Por esta mesma razão, para efeitos de fabrico, as peças e componentes são sempre produzidos com camadas externas.

Em segundo lugar, ao avaliar o impacto da orientação de impressão, verifica-se que os provetes cilíndricos FFFcil_X_F_2 e FFFcil_Y_F_2, impressos deitados, apresentam melhores resultados perante os provetes impressos em pé com o mesmo número de camadas externas. Contudo, é impossível generalizar este fator para outras geometrias, visto que, neste caso, a estratégia de deposição, associada à produção do diâmetro nos cilindros impressos deitados, é uma combinação intercalada da impressão na direção Z e em X ou Y (dependendo

da direção de impressão), o que, por sua vez, permite reduzir a quantidade de poros formados. Assim, existe a necessidade de se realizarem testes com geometrias diversas para poder comprovar ou refutar estes dados. Adicionalmente, como verificado na análise da precisão e exatidão dimensional, os provetes produzidos na direção Y exibem menor densidade do que os produzidos segundo X.

Por fim, em ambos os gráficos, os provetes SLM destacam-se pela proximidade elevada ao valor de referência ($7,98 \text{ g/cm}^3$), sendo que, por uma diferença reduzida, os provetes deitados obtiveram melhores resultados.

Ao confrontar os dados analisados perante os resultados expostos na Tabela 2.2, observa-se uma elevada proximidade de valores para os provetes FFF cúbicos produzidos com os mesmos ou próximos parâmetros de impressão (comparação com os dados do estudo de Wang et al. (2023)). Em relação às restantes geometrias, os provetes cúbicos e cilíndricos apresentam valores de densidade consideravelmente superiores aos provetes de tração (comparação com os dados do estudo de Pellegrini et al. (2022)) e similares aos provetes de flexão (comparação com os dados do estudo de Thompson et al. (2019)). Por fim, os provetes SLM apresentam densidades superiores perante os provetes produzidos por FFF do atual e de anteriores estudos (Tabela 2.2 e Tabela C.4, em anexo).

4.3 Rugosidade superficial

Os dados obtidos e expostos na Tabela 4.1 e Tabela D.6 (em anexo), reforçam as conclusões obtidas por Kluczyński et al. (2023) e Suwanpreecha & Manonukul (2022) relativamente à rugosidade média (R_a) dos provetes de FFF e SLM.

Em primeiro lugar, é possível identificar que a rugosidade é mais elevada nas faces superiores (identificada na Figura 4.13 como “Topo”), relativamente às superfícies laterais (identificada como “Lateral”), com os provetes de FFF a apresentarem rugosidades superiores aos de SLM.

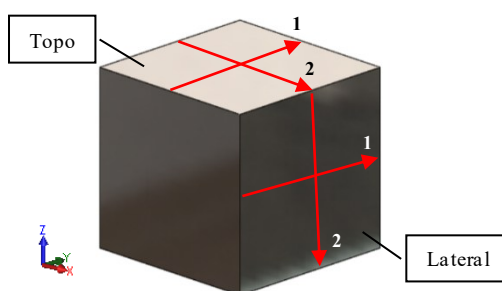


Figura 4.13: Representação das faces e direções nas quais se efetuaram os registos da rugosidade superficial.

Adicionalmente, na avaliação da rugosidade da superfície lateral do provete de FFF, é possível notar o impacto da estratégia de deposição, camada por camada, ao verificar a variação entre as passagens 1 e 2, para a altura máxima (R_m) e para o perfil de amplitude (R_pA), nas quais, é possível identificar um valor superior na segunda análise, associado à maior distância entre alguns dos picos mais altos e vales mais profundos. Desta forma, ao selecionar e executar operações de acabamento para a melhoria da rugosidade superficial do componente, é necessário considerar o impacto que esta disparidade dimensional, entre picos e vales, possa contribuir para o desempenho funcional do componente.

De acordo com a norma ISO 21920-2:2021 (ISO, 2021 (b)) e a respetiva escala de rugosidade, os provetes de FFF, sem qualquer tipo de tratamento superficial, enquadram-se no grau N8/N9, enquanto, os valores dos provetes de SLM estão compreendidos no N7/N8. Desta forma, sem sofrer qualquer acabamento, a rugosidade superficial destes provetes é equivalente às de peças fundidas ou forjadas (Palová et al., 2023; Silva, M. A., 2020), podendo ser utilizadas em estruturas que não requerem alta precisão e exatidão dimensional ou superfícies de contato críticas. Adicionalmente, em alguns componentes de máquinas agrícolas ou de construção, onde o nível de rugosidade superficial tolerável é elevado, é possível introduzir peças com tamanha rugosidade, especialmente em componentes que não estejam sujeitos a movimentos de contacto ou onde a fricção não é uma preocupação principal.

Todavia, é crucial avaliar se a rugosidade superficial afeta o desempenho funcional ou se cumpre os requisitos de projeto, visto que, superfícies lisas, distribuem melhor as cargas, reduzem o atrito, diminuem o desgaste abrasivo dos componentes e promovem a distribuição uniforme de lubrificantes e de camadas protetoras contra a corrosão (Rijeza, 2023). Desta forma, e como foi mencionado anteriormente, para ampliar o leque de empregabilidade dos componentes, é extremamente importante recorrer a outras operações que, não só melhoram a rugosidade dos componentes, como as restantes propriedades mecânicas, fazendo com que possam ser introduzidos em uma ampla gama de indústrias.

Tabela 4.1: Rugosidade superficial dos provetes cúbicos analisados (parte 1).

Variáveis	SLM				FFF			
	Topo		Lateral		Topo		Lateral	
	1 (μm)	2 (μm)	1 (μm)	2 (μm)	1 (μm)	2 (μm)	1 (μm)	2 (μm)
Rugosidade Média (R_a)	6,40	6,19	3,59	3,51	6,41	7,83	4,16	4,18
Altura Máxima (R_{max})	40,96	42,36	-	21,66	36,39	38,65	26,62	42,26
Perfil de Amplitude (R_pA)	21,53	22,82	12,87	12,34	23,08	16,58	14,49	29,32

4.4 Dureza

Os dados obtidos e expostos na Figura 4.14, permitem verificar que, em primeiro lugar, não existe diferença entre a dureza do material constituinte do preenchimento interno do provete perante as camadas externas e, em segundo lugar, é possível observar que não existe alteração da dureza do material relativamente ao número de camadas externas. Assim, a evolução da capacidade de resistir à deformação plástica e da ductilidade dos provetes não está dependente de variações da dureza entre os mesmos.

É possível reparar que, apesar de uma dispersão de resultados maior, os provetes de SLM ($181,713 \pm 60,380$ HV) possuem dureza superior comparativamente aos provetes de FFF ($129,803 \pm 32,571$ HV). Através desta análise é possível prever que os provetes de FFF possuam menor resistência mecânica à deformação permanente. Adicionalmente, ao comparar com os resultados de outros estudos, apresentados na Tabela , o valor médio da dureza dos provetes FFF é bastante próximo aos valores atribuídos, ao mesmo material, nos estudos de Kluczyński, et al. (2023) e Kedziora, et al. (2022).

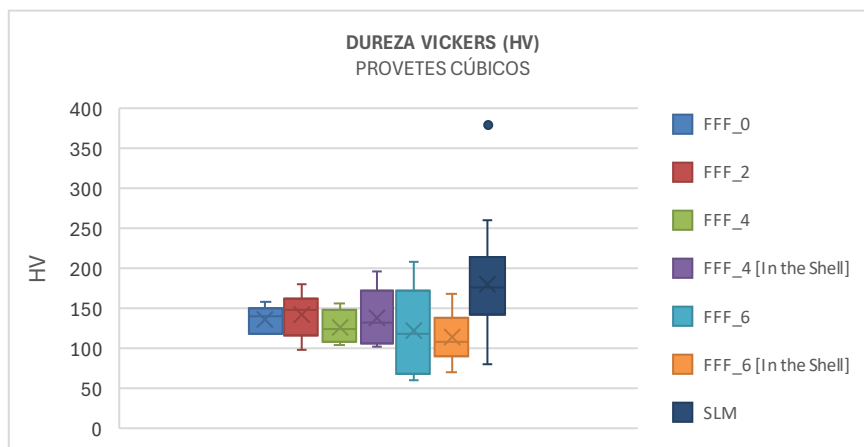


Figura 4.14: Gráfico da dureza Vickers (HV) dos provetes cúbicos.

4.5 Propriedades à tração

A análise das propriedades à tração dos provetes produzidos será efetuada em cinco fases. Primeiramente, averiguar-se-á o impacto da orientação de impressão, do número de camadas, da direção de impressão, identificar-se-ão falhas nos provetes, e, por fim, comparar-se-á os resultados entre tecnologias e com outros estudos. Os gráficos da Figura 4.15 e Figura 4.17 e respetivas tabelas de dados, com os valores médios dos dados para cada conjunto de parâmetros de impressão (Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4), servirão como apoio às diferentes análises e conclusões realizadas durante a presente secção, desta forma, não incluirão todos os provetes analisados, mas uma parte representativa dos mesmos. As curvas apresentadas são referentes a um dos provetes de cada conjunto, com o intuito de apresentar o comportamento representativo dos mesmos quando sujeitos à carga aplicada. Os restantes dados estão expostos na Tabela D.7 e Tabela D.8, em anexo.

4.5.1 Orientação de impressão

Tanto para os provetes de SLM, como para os provetes de FFF, a orientação de impressão promove diferenças significativas nas propriedades mecânicas. Ao observar o gráfico da Figura 4.15, é possível verificar que os provetes, produzidos por SLM, impressos de lado apresentam maior resistência mecânica relativamente aos provetes impressos deitados e, por fim, aos impressos em pé.

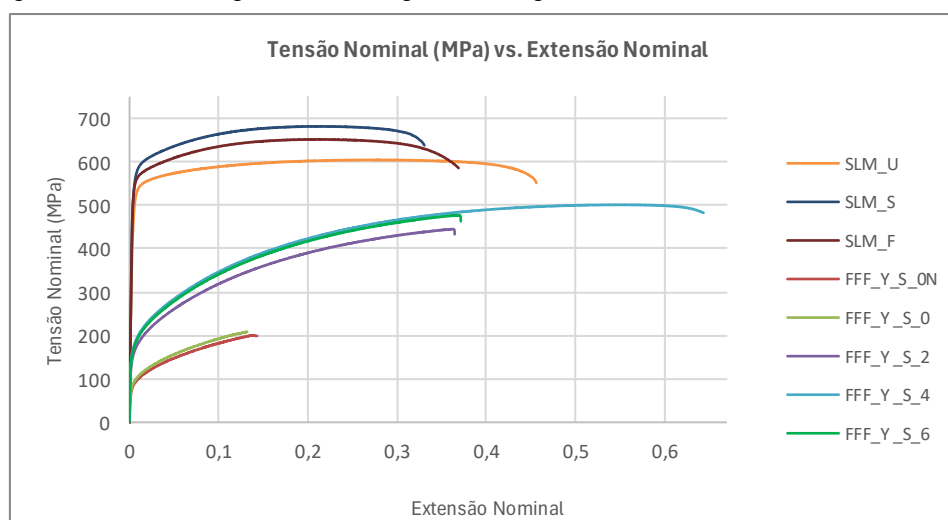


Figura 4.15: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaio de tração). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provetes SLM com diferentes orientações de impressão e provetes FFF com diferentes quantidades de camadas externas.

Contudo, o alongamento à fratura segue a ordem inversa, ou seja, os provetes com maior tensão limite de elasticidade, tensão de rotura e maior módulo de Young, registaram menor alongamento à fratura. Por sua vez, a disparidade média do coeficiente de anisotropia (r) à unidade, associada ao comportamento do provete em diferentes planos, é similar entre todos os provetes (Tabela 4.2). Sendo possível assinalar que os provetes impressos deitados, ao contrário dos restantes, tendem a obter reduções superiores no plano da espessura em relação ao plano da largura, isto é, obter valores de anisotropia inferiores a 1. Comportamento que seria de esperar, visto que, a direção que sofre maior redução está associada à secção impressa na direção Z, a qual, como verificado anteriormente, apresenta maior presença e distribuição de poros.

Tabela 4.2: Valores médios das propriedades de tração dos provetes SLM para diferentes orientações de impressão.

	Valores Médios		
	SLM_U	SLM_S	SLM_F
Tensão limite de elasticidade (MPa)	532,114	538,532	528,943
Tensão de Rotura (MPa)	608,315	681,522	639,440
Módulo de Young (GPa)	143,996	173,343	159,153
Alongamento à fratura (%)	43,009	34,038	36,342
Anisotropia (r)	1,160	1,244	0,721
Coefficiente de resistência mecânica (K)	855,173	972,665	905,277
Coefficiente de encruamento (n)	0,103	0,117	0,113

No caso dos provetes produzidos por FFF, o impacto da orientação de impressão é mais irregular e está sujeito aos restantes parâmetros de impressão (Tabela 4.3 e Tabela 4.4). Os dados permitem verificar que, para provetes sem nenhuma camada externa, a impressão deitada produz peças com maior resistência mecânica. Neste caso, para além do plano de deposição ser paralelo às forças impostas, a espessura, configuração de menor dimensão, é impressa na direção Z, reduzindo a probabilidade de surgirem poros que afetem, de forma significativa, a resistência mecânica à tração dos provetes.

Tabela 4.3: Valores médios das propriedades de tração dos provetes FFF impressos de lado e na direção Y para diferentes quantidades de camadas externas.

	Valores Médios				
	FFF_Y_S_0N	FFF_Y_S_0	FFF_Y_S_2	FFF_Y_S_4	FFF_Y_S_6
Tensão limite de elasticidade (MPa)	78,579	81,952	143,599	160,388	159,239
Tensão de Rotura (MPa)	204,510	206,924	327,462	503,258	476,890
Módulo de Young (GPa)	81,673	85,101	168,853	188,428	176,570
Alongamento à fratura (%)	14,987	13,247	19,503	53,034	42,245
Anisotropia (r)	0,152	0,152	0,779	0,935	0,957
Coefficiente de resistência mecânica (K)	418,380	425,560	655,860	1008,267	939,870
Coefficiente de encruamento (n)	0,312	0,307	0,277	0,382	0,362

A adição de camadas externas tende a mudar a orientação de impressão preferencial, esta alteração surge como um impacto direto da relação entre a quantidade de material no preenchimento e nas camadas externas, explorado em detalhe na secção 4.5.2. Desta forma, para um número de camadas externas igual ou superior a 1, as propriedades mecânicas são afetadas pela combinação entre ambas as variáveis, tornando difícil isolar o impacto de uma delas.

Tabela 4.4: Valores médios das propriedades de tração dos provetes FFF impressos na horizontal (deitados) e na direção Y para diferentes quantidades de camadas externas. Com adição dos valores médios associados aos provetes FFF impressos na vertical (em pé).

	Valores Médios					
	FFF_Y_F_0N	FFF_Y_F_0	FFF_Y_F_2	FFF_Y_F_4	FFF_Y_F_6	FFF_U_2
Tensão limite de elasticidade (MPa)	113,218	98,746	141,526	152,163	155,596	177,287
Tensão de Ruptura (MPa)	248,564	274,620	438,507	458,679	487,490	506,072
Módulo de Young (GPa)	97,659	105,016	154,454	169,218	187,024	145,805
Alongamento à fratura (%)	17,116	21,671	43,422	46,837	54,699	38,787
Anisotropia (r)	1,416	1,038	0,659	0,865	0,832	0,934
Coefficiente de resistência mecânica (K)	478,513	550,497	865,377	900,940	971,623	981,777
Coefficiente de encruamento (n)	0,293	0,340	0,371	0,372	0,380	0,352

4.5.2 Número de camadas externas

O aumento do número de camadas externas traduz-se no desaparecimento progressivo do material do preenchimento, o que não acontece na mesma proporção entre provetes com diferentes orientações de impressão. Assim, como se verifica na Figura 4.16, os provetes impressos de lado possuem a quantidade de material de preenchimento substancialmente reduzida pela adição de um menor número de camadas externas quando comparado aos provetes impressos deitados. Sendo possível identificar que, os provetes impressos de lado com 6 camadas são inteiramente constituídos por camadas externas, ou seja, a dimensão de impressão imposta pelo número de camadas é igual ou superior às dimensões totais do provete.

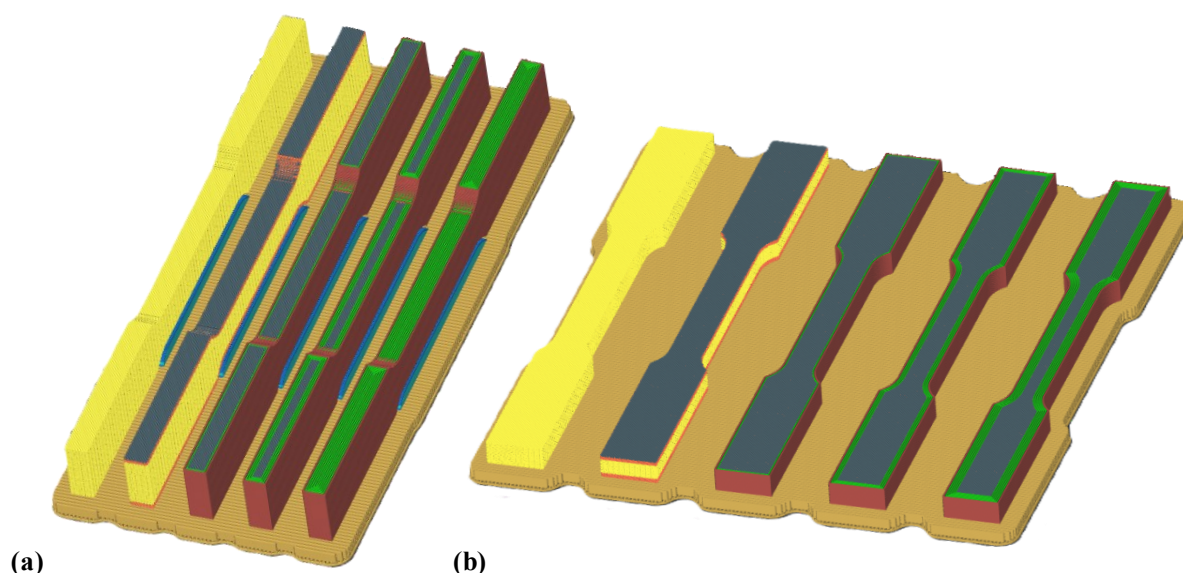


Figura 4.16: Distribuição crescente do número de camadas externas (representadas a verde e vermelho) para provetes FFF de tração impressos (a) de lado e (b) deitados.

Os dados apontam que, o aumento do número de camadas externas apresenta um impacto extremamente positivo em todas as propriedades dos provetes (Figura 4.17), inclusive na distribuição de tensões, o que, por sua vez, regula os valores associados à anisotropia. Adicionalmente, verifica-se que as configurações que exibem, no geral, as melhores propriedades mecânicas são FFF_S_4 e FFF_F_6, independentemente da direção de impressão (Tabela 4.3 e Tabela 4.4). Estas compreendem uma relação volumétrica percentual, na zona de referência, entre o material do preenchimento e o das camadas externas de 20% e 80%, respetivamente.

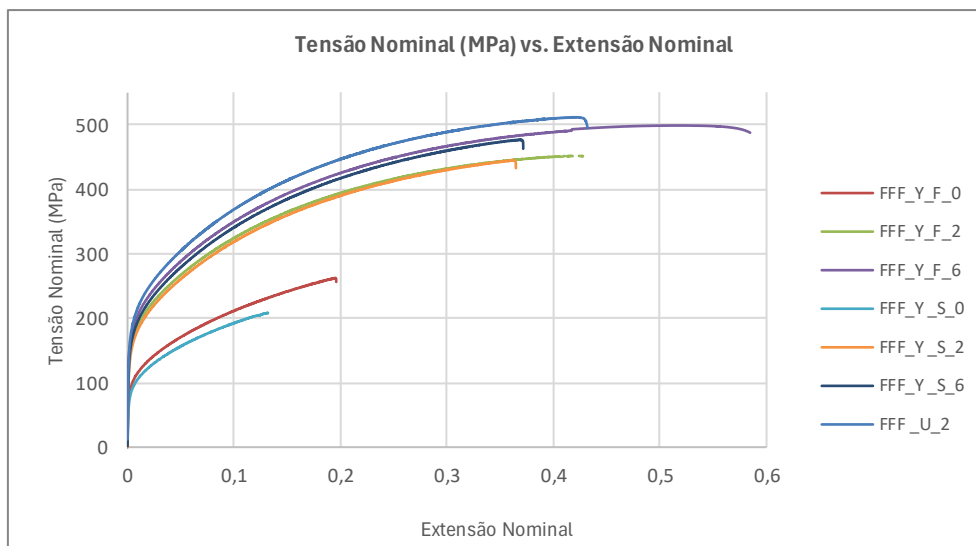


Figura 4.17: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaio de tração). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provete FFF com diferentes orientações de impressão e quantidades de camadas externas.

Ao averiguar os dados expostos na Tabela 4.5, nota-se que o presente estudo não possuiu uma análise de valores de material das camadas externas entre 80% a 100%. Seria necessário realizar-se uma análise que permitisse aferir se valores superiores a 80% possibilitam obter melhores propriedades mecânicas. Todavia, os dados permitem verificar que peças inteiramente constituídas por camadas externas (FFF_S_6), em adição à possível desagregação entre camadas, resultam na redução geral das propriedades à tração (Tabela 4.3). Adicionalmente, por vezes, o aumento do número de camadas pode influenciar negativamente, não só, a viabilidade econômica do processo, como as propriedades mecânicas das peças. Isto é, quanto maior for o número de camadas, maior é o tempo de fabrico e, o aumento da proporção de camadas externas, pode resultar num maior acúmulo de tensões residuais, devido à solidificação sucessiva, aumentando o risco de delaminação ou deformação. Assim, atingir maiores proporções de material associado às camadas externas é, naturalmente, mais simples e menos dispendioso, quanto menor for a dimensão da peça na direção de deposição das camadas, desta forma, é importante conjugar a orientação de impressão e o número de camadas, para satisfazer tanto os requisitos mecânicos, como os económicos. Não obstante, é importante realçar que, em termos de produção de componentes finais, salvo produtos muito específicos, as peças são sempre impressas com camadas exteriores.

Tabela 4.5: Relação volumétrica percentual, na zona de referência, dos provetes tração produzidos por FFF.

Provete	Volume de material das camadas externas (%)				
	0N	0	2	4	6
Impresso de lado (<i>sideways</i>)	0%	0%	40%	80%	100%
Impresso deitado (<i>flatwise</i>)	0%	0%	26,7%	53,3%	80%
Impresso em pé (<i>upright</i>)	2				
	56%				

Ao aplicar a mesma lógica de análise aos restantes provetes, verifica-se que os provetes impressos em pé com 2 camadas (56% de material das camadas externas na zona de referência) apresentam uma configuração similar aos provetes deitados com 4 camadas (53,3%) (Tabela 4.5) e, consequentemente, tensões limite de

elasticidade e rotura ligeiramente superiores (Tabela 4.4). Contudo, neste caso, é possível notar-se o impacto da orientação de impressão, visto que o módulo de Young e o alongamento dos provetes impressos deitados é superior.

Os dados associados aos provetes FFF_S_4 e FFF_F_6, independentemente da direção de impressão (Tabela 4.3 e Tabela D.8, Tabela 4.4 e Tabela D.7, respetivamente), permitem identificar que a orientação de impressão surte um leve impacto nas propriedades mecânicas. Apesar da diferença ser muito pequena, no geral, os provetes impressos de lado apresentam maiores tensões limite de elasticidade e rotura, e maior módulo de Young. Adicionalmente, à semelhança dos provetes produzidos por SLM, os provetes impressos deitados apresentam reduções superiores no plano da espessura quando comparados às restantes orientações com a mesma relação volumétrica percentual.

4.5.3 Direção de impressão

A comparação entre provetes teoricamente idênticos, impressos apenas com diferentes direções de impressão, indica que não existe impacto significativo dessa variável nas propriedades mecânicas. As pequenas variações observadas podem ser atribuídas a defeitos de fabrico ou ao comportamento anisotrópico do material. Assim, a direção de impressão, isoladamente, não demonstrou ser um fator crítico.

4.5.4 Fratura antecipada nos provetes

Durante a realização dos ensaios de tração, observou-se que havia um conjunto de provetes, produzidos por FFF, que apresentavam defeitos críticos, que prejudicaram a vida útil dos mesmos dentro da região plástica. Dentro destes provetes, foi determinado um erro de impressão crítico de 8,06%, ou seja, 5 provetes de um total de 62, apresentaram defeitos que reduziram a tensão de rotura e o respetivo alongamento. A distribuição destes provetes foi aleatória relativamente ao número de camadas externas, mas centralizou-se nos provetes impressos de lado, sendo que, nenhum provete impresso deitado apresentou este tipo de comportamento.

Identificou-se que estes provetes fraturaram próximo à secção das amarras em vez de na região de referência, podendo indicar problemas relacionados à impressão ou ao pós-processamento. A diferença geométrica entre a região de referência e a zona de fixação nas amarras pode gerar um efeito de entalhe, aumentando a concentração de tensões nessa área. A estratégia de deposição dificulta a produção de raios de curvatura (Figura 4.18), podendo originar transições bruscas onde se origina, antecipadamente, a fratura da peça devido à concentração de tensões. Uma segunda hipótese é existirem falhas na deposição do material, como delaminação, ou porosidade excessiva nessa região. Como as falhas ocorreram sistematicamente nesta região e para provetes impressos de lado, é possível que a combinação da estratégia de impressão com a orientação de impressão possua dificuldade na produção da curvatura em questão. Por fim, durante a sinterização, podem existir variações na contração da peça, originando tensões internas que favorecem fraturas nas regiões mais frágeis. No entanto, seria de se esperar que, neste caso, existissem deformações visíveis ou indícios de fraturas frágeis, o que não foi observado.

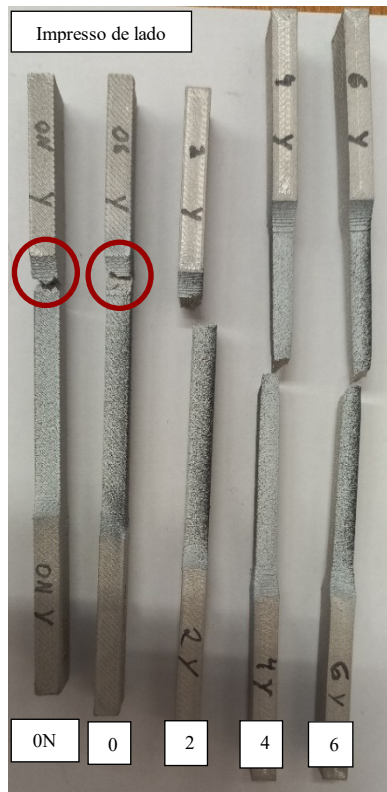


Figura 4.18: Distribuição crescente do número de camadas de provetes FFF impressos de lado e sinalização, a vermelho, da zona fraturada antes do previsto (curvatura associada à transição entre a região útil e a secção de fixação).

No entanto, não se apurou, nestes provetes, um impacto significativo dessas falhas no comportamento mecânicos na zona elástica, visto que, as propriedades e a respetiva curva de tensão nominal vs. extensão nominal seguiram os restantes provetes com as mesmas propriedades de impressão. Assim, caso os componentes sejam empregues numa função que se centralize, a nível de cargas impostas, na zona elástica dos mesmos, numa primeira instância, é possível afirmar que componentes com defeitos de fabrico produziram, à tração, os mesmos resultados que componentes em boas condições. Todavia, é impossível descartar que existe a possibilidade de em situações de esforços compostos ou de fadiga, o comportamento destes provetes seja díspar em relação aos restantes.

4.5.5 Comparação entre tecnologias (SLM vs. FFF) e com outros estudos

O conjunto de dados determinado permite, ao comparar os dois processos de fabrico, identificar a superioridade mecânica dos provetes produzidos por SLM a nível da tensão limite de elasticidade, rotura e do módulo de Young. Por sua vez, o alongamento à fratura das peças de FFF com maior resistência mecânica é significativamente superior. A nível das extensões verdadeiras no plano da espessura e da largura, o comportamento é muito similar, no entanto, em média, os provetes de FFF mais resistentes apresentam valores mais próximos à unidade, ou seja, um comportamento geral médio mais isotrópico.

Ao comparar os resultados obtidos perante outros estudos (Tabela 2.3 e Tabela C.7), verifica-se uma semelhança na evolução das propriedades mecânicas, perante a variação da orientação de impressão e do número de camadas externas, ao estudo de Pellegrini et al. (2022). Todavia, obtiveram-se valores superiores de tensão limite de elasticidade, rotura e de alongamento à rotura relativamente aos apresentados nesse estudo. Não obstante, os resultados do trabalho de Wang et al. (2023) são semelhantes aos obtidos no presente estudo.

Em relação os restantes trabalhos, os provetes produzidos para esta análise apresentaram resultados relativamente superiores, com exceção do estudo de Santamaria et al. (2022), que, com apenas três camadas externas e propriedades de impressão muito semelhantes ao estudo atual, foram capazes de obter valores superiores, nas quatro variáveis (tensão limite de elasticidade, tensão de rotura, módulo de elasticidade e alongamento à fratura), a qualquer um dos provetes FFF analisados anteriormente.

4.6 Propriedades à compressão

A análise das propriedades à compressão dos provetes produzidos iniciar-se-á com os provetes cúbicos e, posteriormente, estudar-se-ão os provetes cilíndricos. À semelhança da análise anterior, os gráficos das Figuras Figura 4.19 e Figura 4.20 e respetivas tabelas de dados (Tabela 4.6 e Tabela 4.7, para os provetes cúbicos, e Tabela 4.8, para os cilíndricos), contêm os valores médios das propriedades mecânicas determinadas para cada conjunto de parâmetros de impressão.

A anisotropia, a elevada porosidade do processo e a formação duma microestrutura orientada, ou seja, o desenvolvimento de grãos e orientações cristalográficas preferenciais, afetam as propriedades mecânicas de forma distinta, dependendo da direção da carga. Sob cargas compressivas, os poros tendem a reduzir de dimensão ou “fechar”, diminuindo a rigidez aparente. Recorrendo ao conhecimento prévio sobre as tecnologias de fabrico aditivo e sabendo que, durante a produção de componentes, a direção Z compreende o maior número e dimensão de poros, deduz-se que, naturalmente, as peças tenderão a exibir propriedades mecânicas inferiores quando comprimidas nessa direção.

4.6.1 Provetes cúbicos

Ao analisar os gráficos da Figura 4.19, identifica-se que os provetes cúbicos produzidos por SLM apresentam menor resistência mecânica quando comprimidos na direção Z de impressão, indo de encontro ao que foi anteriormente explorado. Ao executar o teste na direção X e Y, não se esperariam diferenças significativas nas propriedades mecânicas. Contudo, apesar da diferença realmente ser reduzida, é possível identificar que os provetes ofereceram maior resistência quando comprimidos em Y.

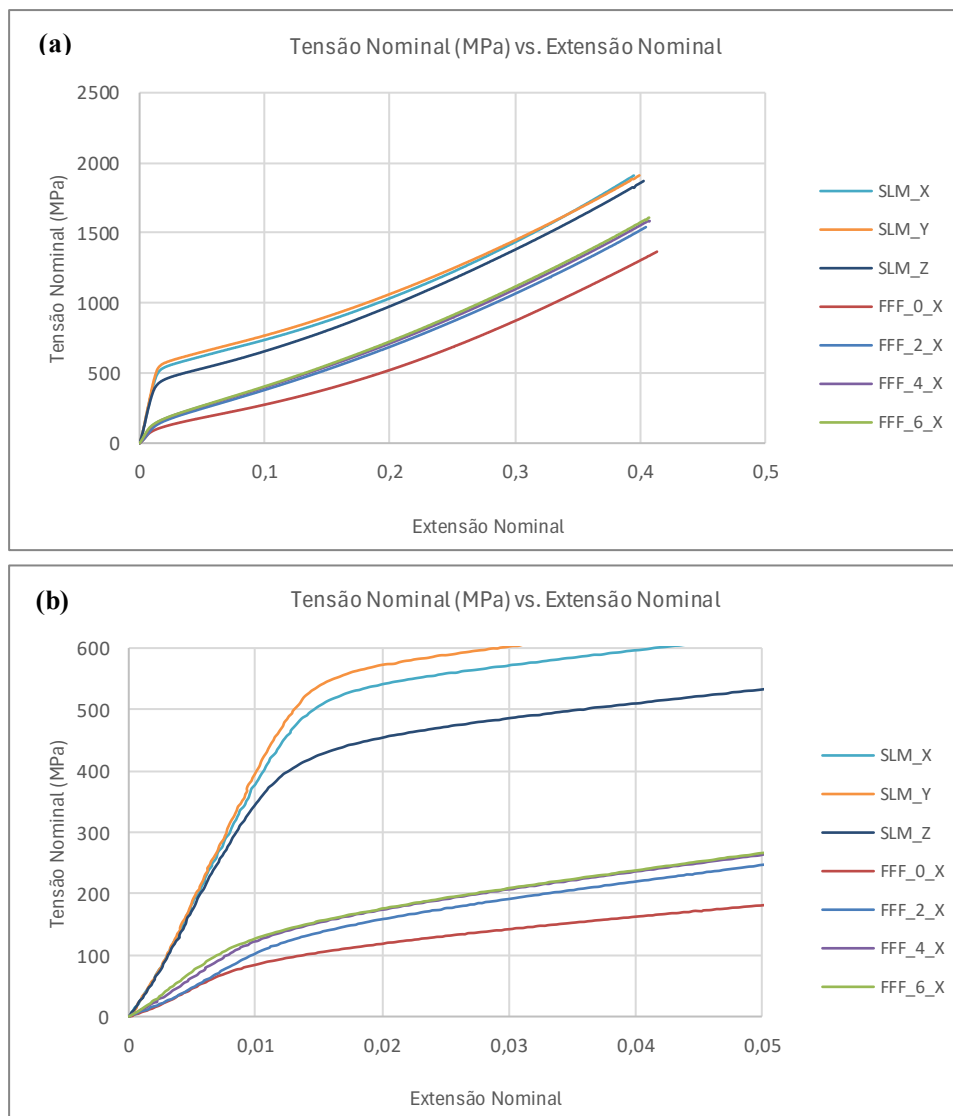


Figura 4.19: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaios de compressão). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provetes cúbicos SLM, com diferentes direções de compressão, e FFF com diferentes quantidades de camadas externas. (a) Gráfico completo e (b) concentração na zona elástica.

Segundo os dados expostos na Tabela 4.6, o impacto do número de camadas externas, nos provetes produzidos por FFF, apresenta-se satisfatoriamente significativo, sobretudo ao comparar as propriedades mecânicas para os provetes com e sem camadas externas. É notável que o efeito tende a reduzir consideravelmente ao longo dos restantes provetes, ou seja, o aumento do número de camadas externas traduz-se em variações pouco significativas, tanto na tensão limite de elasticidade, quanto no módulo de Young.

Contudo, como referido na análise à tração, por vezes, a implementação de um elevado número de camadas externas pode aumentar o acúmulo de tensões residuais, o que, por sua vez, afeta a resistência mecânica dos componentes. Os provetes FFF_6_X, FFF_4_Z e FFF_6_Z (Tabela 4.7) foram diretamente influenciados por este fator, assim, apesar de apresentarem módulos de Young superiores aos provetes comprimidos na mesma direção e com menor número de camadas externas, exibiram tensões de limite de elasticidade inferiores.

Tabela 4.6: Valores médios das propriedades à compressão dos provetes cúbicos SLM e FFF para diferentes direções de compressão e quantidades de camadas externas.

	Valores Médios						
	SLM_X	SLM_Y	SLM_Z	FFF_0_Z	FFF_2_Z	FFF_4_Z	FFF_6_Z
Tensão limite de elasticidade (MPa)	498,021	542,496	404,415	105,678	133,555	134,531	136,542
Módulo de Young (GPa)	37,942	40,419	38,551	10,790	15,025	15,906	16,012
Coefficiente de resistência mecânica (K)	1320,950	1310,300	1338,000	1185,750	1337,700	1332,033	1349,600
Coefficiente de encruamento (n)	0,264	0,243	0,293	0,572	0,544	0,535	0,533
	Provetes com comportamento típico						
	SLM_X	SLM_Y	SLM_Z	FFF_0_Z	FFF_2_Z	FFF_4_Z	FFF_6_Z
Tensão (Mpa) a 5 %	558,920	588,399	489,384	156,493	206,245	204,294	206,297
Tensão (Mpa) a 10 %	620,581	651,706	551,531	215,922	279,433	278,476	280,930
Tensão (Mpa) a 15 %	737,442	767,556	672,568	326,446	408,061	409,488	413,061
Tensão (Mpa) a 20 %	1034,224	1064,493	981,135	603,631	720,893	720,273	729,877
Tensão (Mpa) a 30 %	1434,819	1447,914	1370,581	959,222	1120,715	1113,078	1132,766
Tensão (Mpa) a 40 %	1937,451	1914,219	1828,772	1383,138	1613,907	1575,010	1609,645

Ao estudar o impacto da direção de compressão verifica-se que, ao contrário do que se identificou para os provetes de SLM, este fator não surte efeito nas propriedades mecânicas dos provetes. Observou-se uma elevada proximidade da tensão limite de elasticidade e do módulo de elasticidade associados a provetes com o mesmo número de camadas. Não obstante, a evolução da tensão em relação à extensão de cada provete é muito similar, apresentando valores próximos, tanto na zona elástica, como na zona plástica de deformação.

Tabela 4.7: Valores médios das propriedades à compressão dos provetes cúbicos FFF para diferentes direções de compressão e quantidades de camadas externas.

	Valores Médios							
	FFF_0_X	FFF_2_X	FFF_4_X	FFF_6_X	FFF_0_Y	FFF_2_Y	FFF_4_Y	FFF_6_Y
Tensão limite de elasticidade (MPa)	90,546	121,806	140,344	132,277	98,615	135,376	112,450	119,738
Módulo de Young (GPa)	9,692	11,910	13,364	15,016	11,747	12,341	16,292	15,136
Coefficiente de resistência mecânica (K)	1123,300	1328,600	1331,150	1344,800	1215,950	1300,000	1372,500	1336,350
Coefficiente de encruamento (n)	0,619	0,592	0,547	0,532	0,614	0,560	0,582	0,548
	Provetes com comportamento típico							
	FFF_0_X	FFF_2_X	FFF_4_X	FFF_6_X	FFF_0_Y	FFF_2_Y	FFF_4_Y	FFF_6_Y
Tensão (Mpa) a 5 %	176,764	191,444	193,458	174,454	182,215	176,026	189,339	176,764
Tensão (Mpa) a 10 %	247,326	263,622	266,610	245,314	248,608	244,131	260,263	247,326
Tensão (Mpa) a 15 %	379,951	399,160	405,799	378,243	373,262	374,047	393,560	379,951
Tensão (Mpa) a 20 %	687,058	712,900	724,719	683,011	676,315	685,798	704,783	687,058
Tensão (Mpa) a 30 %	1066,319	1097,492	1116,303	1063,018	1060,703	1078,338	1101,725	1066,319
Tensão (Mpa) a 40 %	1518,590	1554,322	1575,099	1517,222	1528,535	1547,294	1570,778	1518,590

A partir das curvas da Figura 4.19 e dos dados de ambas tabelas (Tabela 4.6 e Tabela 4.7), é possível identificar que os provetes produzidos por SLM apresentam melhores propriedades mecânicas que os provetes produzidos por FFF.

4.6.2 Provates cilíndricos

Em primeiro lugar, ao analisar os gráficos da Figura 4.20, observa-se, à semelhança dos provates de tração, que os provates cilíndricos horizontais (impressos deitados) produzidos por SLM apresentam maior capacidade de resistir às deformações impostas em comparação com os provates impressos em pé.

Em seguida, com o apoio da Tabela 4.8, observa-se que a evolução da tensão nominal relativamente à extensão nominal exibe um comportamento similar à dos provates cúbicos, no entanto, os provates cilíndricos, independentemente da tecnologia de fabrico, apresentam maior resistência à deformação elástica, fazendo com que os valores do módulo de elasticidade sejam significativamente superiores.

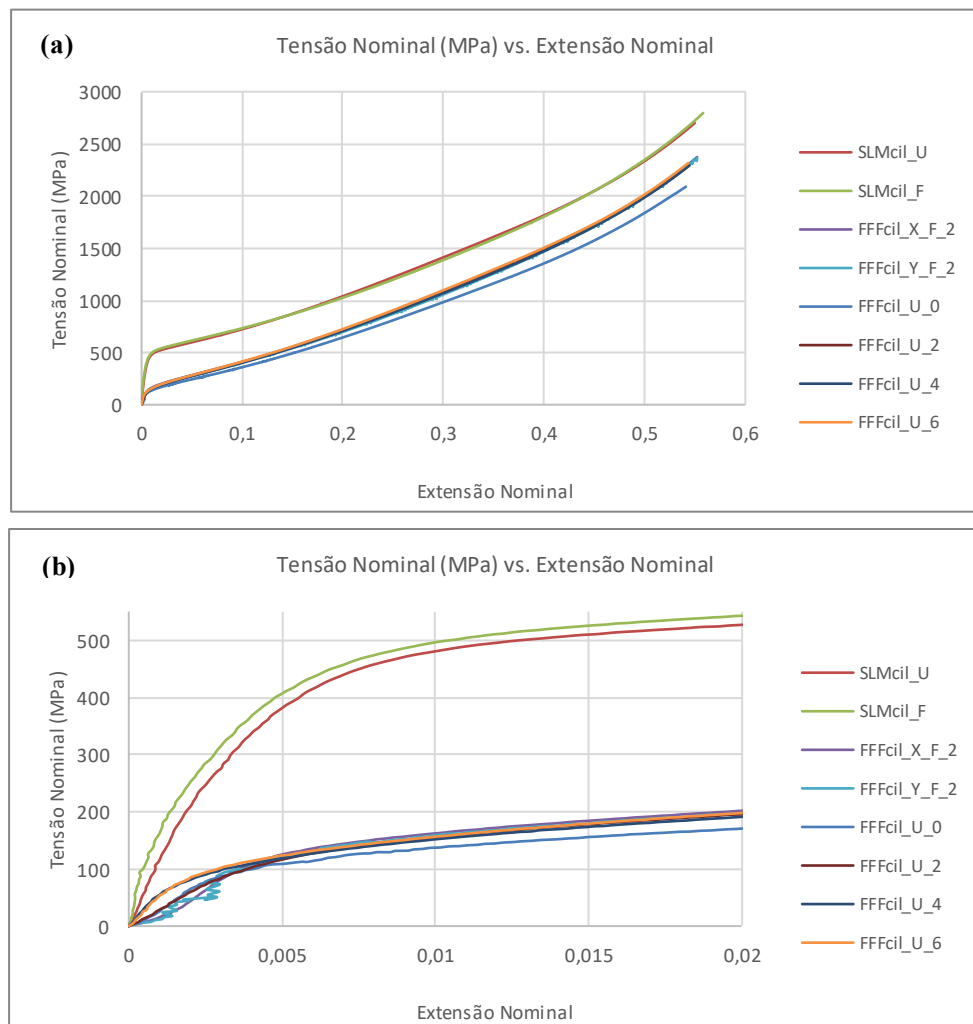


Figura 4.20: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaio de compressão). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provates cilíndricos SLM, com diferentes direções de compressão, e FFF com diferentes quantidades de camadas externas. (a) Gráfico completo e (b) concentração na zona elástica.

Ao avaliar o impacto da orientação de impressão nos provates produzidos por FFF, ao contrário do que se verificou para o SLM, os provates com o mesmo número de camadas externas exibiram propriedades mecânicas similares. No entanto, entre todos os provates impressos deitados, os provates produzidos na direção Y apresentaram valores do módulo de elasticidade inferiores à direção X, apesar de, no geral, exibirem tensões limite de elasticidade similares.

Tabela 4.8: Valores médios das propriedades à compressão dos provetes cilíndricos SLM e FFF para diferentes orientações de impressão e quantidades de camadas externas.

	Valores Médios							
	SLMcil_U	SLMcil_F	FFFcil_X_F_2	FFFcil_Y_F_2	FFFcil_U_0	FFFcil_U_2	FFFcil_U_4	FFFcil_U_6
Tensão limite de elasticidade (MPa)	360,040	428,124	121,865	139,178	107,536	130,726	113,190	117,417
Módulo de Young (GPa)	120,371	127,404	34,622	26,315	38,926	30,262	61,028	56,379
Coefficiente de resistência mecânica (K)	1286,700	1227,900	1172,133	1176,567	1086,533	1201,500	1188,967	1203,033
Coefficiente de encruamento (n)	0,225	0,240	0,442	0,447	0,507	0,452	0,445	0,439
	Provetes com comportamento típico							
	SLMcil_U	SLMcil_F	FFFcil_X_F_2	FFFcil_Y_F_2	FFFcil_U_0	FFFcil_U_2	FFFcil_U_4	FFFcil_U_6
Tensão (Mpa) a 5 %	540,671	557,354	217,340	213,354	186,415	211,381	207,580	214,425
Tensão (Mpa) a 10 %	600,418	616,251	283,673	279,985	243,972	279,501	273,789	283,595
Tensão (Mpa) a 15 %	724,985	734,226	410,920	403,683	359,364	408,319	403,252	414,202
Tensão (Mpa) a 20 %	1042,226	1026,985	709,990	699,562	646,310	719,265	709,113	726,295
Tensão (Mpa) a 30 %	1415,135	1388,839	1071,070	1055,128	984,206	1088,450	1072,690	1100,697
Tensão (Mpa) a 40 %	1817,268	1804,289	1484,128	1470,934	1355,932	1494,362	1475,826	1505,348
Tensão (Mpa) a 50 %	2338,276	2351,017	2005,644	1991,888	1840,309	2009,120	1990,460	2018,414

À semelhança dos dados obtidos para os provetes cúbicos, o efeito do número de camadas externas é positivo e evidente na evolução da capacidade de resistir à deformação elástica dos provetes analisados. Fazendo com que os provetes com 4 e 6 camadas apresentem valores do módulo de Young significativamente superiores aos provetes com menor número de camadas externas. Contudo, esta geometria foi fortemente afetada pelas consequências de um elevado número de camadas externas, fazendo com que, as propriedades mecânicas, nomeadamente a tensão limite de elasticidade, apresentassem valores irregulares e, por vezes, inferiores aos provetes com 2 camadas externas. A Figura 4.21 apresenta um exemplo visual do possível comportamento à compressão de um provete com um elevado número de camadas externas, neste caso, um provete com 4 camadas apresentou deformação excessiva numa das zonas, ao suceder-se a desagregação entre camadas, prejudicando a vida útil do componente.



Figura 4.21: Provette cilíndrico com quatro camadas externas que, ao ensaiado à compressão, exibiu delaminação.

4.7 Propriedades à flexão

À semelhança das análises anteriores, a presente secção tomará a Figura 4.22 e respetivas tabelas de dados (Tabela 4.9 e Tabela D.10 (em anexo)), com os valores médios das propriedades mecânicas para determinados conjuntos de parâmetros de impressão, como apoio primário às conclusões efetuadas. Os restantes dados estão expostos na Tabela 4.11, Tabela 4.12 e Tabela D.9 (em anexo).

4.7.1 Orientação de impressão

Ao analisar os dados dos provetes produzidos por SLM (Figura 4.22 e Tabela 4.9), é possível verificar que, dentro deste conjunto, as peças impressas de lado tendem a apresentar significativamente maior resistência mecânica relativamente aos provetes impressos deitados.

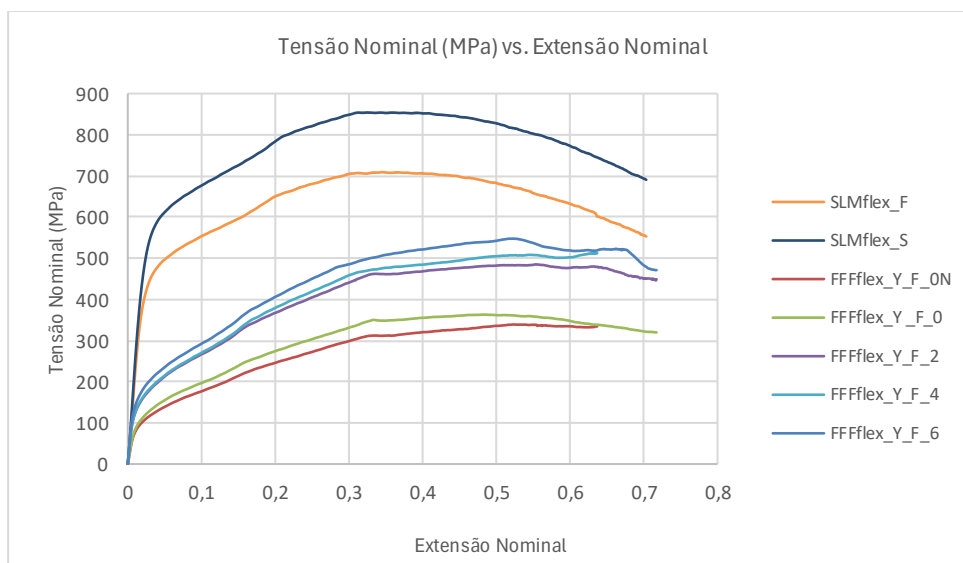


Figura 4.22: Gráfico da tensão nominal vs. extensão nominal (ensaio de flexão). Incluiu curvas com o comportamento típico de: Provetes de flexão SLM, com diferentes orientações de impressão, e FFF com diferentes quantidades de camadas externas.

Tabela 4.9: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes SLM para diferentes orientações de impressão.

	Valores Médios	
	SLMflex_F	SLMflex_S
Tensão limite de elasticidade (MPa)	366,871	438,384
Módulo de Young (GPa)	21,941	25,420
Coefficiente de resistência mecânica (K)	1718,900	1866,667
Coefficiente de encruamento (n)	0,361	0,345

À semelhança dos resultados à tração, o impacto da orientação de impressão, para os provetes produzidos por FFF, está sob influência direta do número de camadas externas, ou, por sua vez, da relação volumétrica entre o material do preenchimento e das camadas externas (Tabela 4.10 e Figura 3.7).

Tabela 4.10 Relação volumétrica percentual dos provetes de flexão produzidos por FFF.

Provetes	Volume de material das camadas externas (%)				
	0N	0	2	4	6
Impresso de lado (<i>sideways</i>)	0%	0%	41,2%	80,8%	100%
	0N	0	2	4	6
Impresso deitado (<i>flatwise</i>)	0%	0%	17,8%	45,1%	51,1%
	0N	0	2	4	6

Não obstante, para provetes sem nenhuma camada externa, sob o efeito de forças flexoras, os dados apontam que a impressão de lado produz peças com maior resistência mecânica (Tabela 4.11 e Tabela D.9, para os provetes de lado, e Tabela 4.12 e Tabela D.10, para os provetes deitados). Este resultado vai de encontro ao que

foi analisado anteriormente, visto que o plano de deposição destes provetes é paralelo às forças impostas, fazendo com que as peças consigam retardar a deformação plástica.

Tabela 4.11: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes FFF impressos de lado e na direção X para diferentes quantidades de camadas externas.

	Valores Médios				
	FFFflex_X_S_0N	FFFflex_X_S_0	FFFflex_X_S_2	FFFflex_X_S_4	FFFflex_X_S_6
Tensão limite de elasticidade (MPa)	90,894	85,975	147,830	150,312	143,310
Módulo de Young (GPa)	14,318	13,848	22,754	23,315	22,409
Resistência mecânica (K)	859,893	735,433	1374,867	1335,967	1406,000
Coefficiente de encruamento (n)	0,509	0,463	0,511	0,503	0,527

Tabela 4.12: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes FFF impressos na horizontal (deitados) e na direção X para diferentes quantidades de camadas externas.

	Valores Médios				
	FFFflex_X_F_0N	FFFflex_X_F_0	FFFflex_X_F_2	FFFflex_X_F_4	FFFflex_X_F_6
Tensão limite de elasticidade (MPa)	72,935	83,305	117,395	119,002	133,516
Módulo de Young (GPa)	9,856	10,537	16,203	19,378	19,803
Coefficiente de resistência mecânica (K)	795,550	905,850	1220,967	1248,033	1320,967
Coefficiente de encruamento (n)	0,546	0,563	0,551	0,536	0,541

Contudo, apesar dos ensaios não possuírem a intenção de atingir a fratura dos componentes analisados, observou-se que a enformabilidade das peças impressas de lado e sem camadas externas foi severamente afetada. De um total de 12 provetes com estas mesmas características, 7 demonstraram maior fragilidade e fraturaram durante os ensaios. O facto está associado à conjugação entre o padrão de preenchimento e orientação de impressão que, para estes provetes, facilita o começo e propagação de fraturas, visto que a zona de maior tensão tende a alinhar-se com as secções de adesão entre camadas (Figura 4.23). A figura permite visualmente identificar a razão para a fratura do provete, sobretudo ao comparar a estrutura e organização das camadas entre provetes com diferentes orientações de impressão (ambos sem camadas externas). Adicionalmente, notou-se que a capacidade de resistência na zona elástica foi diretamente afetada, ou seja, os provetes que fraturaram apresentaram tensões limite de elasticidade e módulos de elasticidade inferiores aos provetes semelhantes. Todavia, é importante reforçar que, como foi mencionado anteriormente, todos os provetes de lado, incluindo os que fraturaram antecipadamente, apresentaram resistência mecânica superior aos provetes impressos deitados.

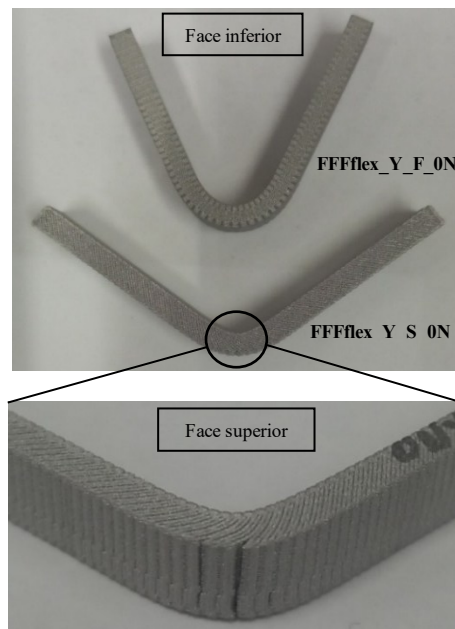


Figura 4.23: Exibição da estrutura e organização das camadas de provetes FFF, sem camadas externas, impressos com orientações distintas (deitado e de lado, respetivamente).

4.7.2 Número de camadas externas

Os dados apontam que o aumento do número de camadas externas apresenta um impacto positivo nas propriedades mecânicas dos provetes. Verifica-se que as configurações que exibem, no geral, as melhores propriedades mecânicas são FFFflex_Y_S_4 e FFFflex_X_S_4 (Tabela 4.11 e Tabela D.9). Estas compreendem uma relação volumétrica percentual de material das camadas externas de 80,8%.

À semelhança da análise à tração, o presente estudo não possuiu uma análise de valores de material das camadas externas de 80,8% e 100%. Sendo necessário futuros estudos que permitam compreender se concentrações superiores possibilitariam obter melhores resultados. Todavia, os dados permitem verificar que peças inteiramente constituídas por camadas externas (FFFflex_S_6), resultam na redução geral da resistência à deformação elástica sob esforços de flexão (Tabela 4.11 e Tabela D.9).

Ao aplicar a mesma lógica de análise aos restantes provetes, verifica-se que, apesar dos provetes FFFflex_F_4 e FFFflex_F_6 (Tabela 4.12 e Tabela D.10), independentemente da direção de impressão, apresentarem maior percentagem de material nas camadas externas em comparação com os provetes FFFflex_S_2, o impacto da orientação de impressão surge como fator determinante, fazendo com que os provetes impressos deitados apresentem propriedades mecânicas inferiores.

4.7.3 Direção de impressão

Ao contrário das conclusões retiradas à tração, os dados mostram que, no geral, a direção de impressão surte impacto, apesar de reduzido, nas propriedades mecânicas das peças. É possível observar que, tendencialmente, os provetes impressos na direção Y apresentam tensões limite de elasticidade e módulos de Young inferiores aos provetes, teoricamente semelhantes, impressos na direção X.

4.8 Custos de produção

A análise de custos desempenha um papel fundamental na seleção do processo de fabrico mais adequado para a produção de uma determinada peça, especialmente ao comparar tecnologias de fabrico aditivo. A escolha entre estas tecnologias pode ser desafiadora, pois o ponto de cruzamento de custos nem sempre é claro e depende de múltiplas variáveis, como, por exemplo, o volume de produção, o tamanho do lote e o investimento em infraestrutura.

Nesta secção, apresentam-se os resultados de três análises de sensibilidade conduzidas para investigar a influência de diferentes variáveis no custo final de cada peça:

1. **Impacto do tamanho do lote:** Ao considerar o volume de produção anual fixo e o preço do equipamento constante, a análise permite avaliar a evolução dos custos unitários conforme o aumento do número de peças por lote.
2. **Influência do preço do equipamento:** Ao manter fixo o volume de produção anual e o tamanho do lote, avalia-se a redução dos custos unitários resultante da diminuição do preço de compra do equipamento.
3. **Efeito do volume de produção anual:** Por fim, ao fixar o preço do equipamento e o tamanho do lote, determina-se a variação do custo unitário em função da alteração da produção anual.

Adicionalmente, realizar-se-á um estudo complementar, no qual, os três parâmetros são fixados, permitindo avaliar detalhadamente a distribuição percentual de cada componente de custo no preço de cada peça. Para melhor compreensão, utilizar-se-ão gráficos circulares para representar visualmente a distribuição.

4.8.1 Variáveis em análise

Para garantir uma análise coerente e representativa, os valores das variáveis foram selecionados de forma criteriosa, com base em considerações práticas, na viabilidade dos processos e nas suas implicações económicas. A seguir apresentam-se as justificações atribuídas à seleção dos valores fixos para cada variável da análise.

Número de peças por lote: No processo FFF, a dimensão do lote foi definida em 5 peças por impressão. Este valor foi selecionado pois resulta num tempo total de produção de 21,61 horas, o que compreende a maior quantidade de peças produzidas, numa só impressão, dentro de 24h. Para além disso, em caso de erro ou falha, esta configuração minimiza os desperdícios, uma vez que, paragens não previstas, podem afetar toda a produção de um lote, sendo difícil ou até impossível retomá-la a partir do ponto de interrupção. No entanto, caso o processo dentro da empresa esteja bem consolidado e exista conhecimento suficiente para minimizar o risco de falhas, ou caso exista justificação económica, é possível ampliar a duração de impressão e, consecutivamente, o número de peças por lote. Neste caso, o tamanho máximo de 12 peças, resulta num tempo total de produção de 51,86 horas. A capacidade de o processo operar continuamente, inclusive durante fins de semana e períodos noturnos, representa uma vantagem significativa. Esta característica permite um aproveitamento mais eficiente do tempo da máquina em relação às horas de trabalho do operador, um fator que favorece, tanto a tecnologia FFF, quanto o SLM, principalmente em comparação com processos de fabrico convencionais. Para o processo SLM, definiu-se a dimensão do lote ao igualar a razão atingida para o processo FFF, obtendo-se um valor de 70 peças por lote, o equivalente a 58,33 horas de produção contínua, a partir de um valor máximo de 168 peças, o que totalizaria 140 horas de fabrico. Neste caso, a tecnologia SLM permite o fabrico de um número significativamente superior de

peças por ciclo sem comprometer a sua qualidade. Assim, ao contrário do FFF, onde a duração prolongada da impressão pode ser um risco, no SLM este fator não é tão limitante. Adicionalmente, para peças de maiores dimensões, principalmente em altura, a velocidade de impressão e a capacidade de imprimir durante longos e contínuos períodos tornam-se vantagens significativas do SLM, permitindo otimizar o uso do equipamento e aumentar a eficiência do processo.

Preço do equipamento: No caso da tecnologia FFF, o preço do equipamento foi estimado em aproximadamente 10 000 euros, um valor alinhado com outros equipamentos disponíveis no mercado. Para o SLM, o custo do equipamento é significativamente mais alto, estimado em cerca de 800 000 euros, de acordo com a informação transmitida pelo CENTIMFE.

Volume de produção anual: Relativamente ao volume de produção anual, definiu-se o mesmo para 500 peças. Esta escolha baseia-se num volume de produção anual comum para a tecnologia FFF, que é, normalmente, inferior ao volume de produção do SLM.

4.8.2 Variáveis fixas

Os gráficos da Figura 4.24, ilustram a distribuição percentual dos diferentes componentes de custo no preço unitário da peça avaliada, considerando os valores fixos, mencionados previamente, para as variáveis em estudo. A representação visual facilita a comparação entre os processos e auxiliam na identificação das principais agravantes de custos para cada processo.

Neste caso, para o processo FFF, o custo do material representa 67,72% do custo total, sendo o fator com maior relevância na composição do preço final da peça. Em contraste, no SLM, o material possuiu um impacto significativamente menor, representando apenas 0,39% do custo total.

Outro aspeto notável é o impacto do custo do equipamento. No SLM, este custo é predominante, representando 95,51% do total. Este valor reflete o alto investimento inicial necessário para a tecnologias, que se diluiu quanto maior for a produção anual. Já no FFF, o custo da máquina tem uma representatividade muito menor, correspondendo a 8,14% do custo total. Esta diferença reforça a acessibilidade financeira do FFF em termos de investimento inicial, tornando-o uma alternativa mais viável para produções de menor escala.

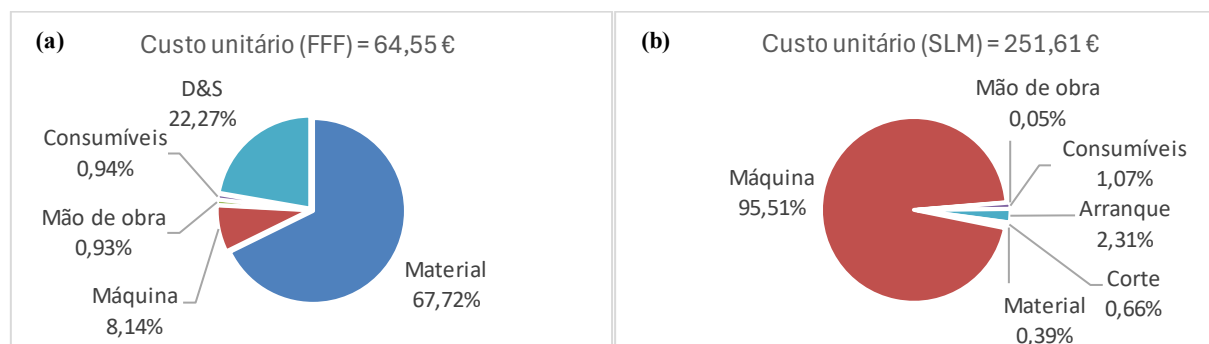


Figura 4.24: Custo unitário de fabrico por (a) FFF e (b) SLM e distribuição percentual dos componentes de custo com a dimensão do lote ((a) 5 peças / (b) 70 peças), o custo do equipamento ((a) 10 000 € / (b) 800 000 €) e o volume de produção anual (500 peças) fixos.

Além disso, no FFF, os custos associados ao D&S representam 22,27%, destacando o impacto destas etapas no custo final da peça. Caso se considere adquirir os equipamentos, para a realização das etapas de pós-processamento, seria necessário aumentar significativamente a produção anual, visto que, para produções de menor escala, o custo do equipamento iria sobressair e, presumidamente, a produção tornar-se-ia inviável. Tendo em consideração que o valor dos equipamentos de D&S são, de acordo com os dados disponíveis no mercado (Filright, 2025a; Filright, 2025b), muito superiores aos da impressora e a capacidade de produção é, igualmente, superior, o fabrico tornar-se-ia viável caso se adquirisse mais do que uma impressora. No SLM, os custos dos processos adicionais, como o corte (0,66%) e o arranque (2,31%), contribuem, em menor porção, quando comparados com o D&S, para a composição do custo total.

A influência dos custos de mão de obra apresentam-se como pouco significativos em ambas as tecnologias, reforçando o alto grau de automação dos dois processos. Complementarmente, os consumíveis possuem um impacto semelhante entre as tecnologias, sendo 1,07% (SLM) e 0,94% (FFF).

4.8.3 Número de peças por lote

A análise dos custos unitários evidencia que, à medida que o tamanho do lote aumenta, o custo por peça diminuiu (Tabela 4.13 e Tabela D.11, em anexo). Isto ocorre devido à forma como determinados custos são distribuídos ao longo da produção. Os custos fixos, como, por exemplo, o custo do equipamento, consumíveis, D&S e corte, são independentes em relação ao lote, uma vez que são definidos pelo número total unidades produzidas anualmente ou por tempo total de operação anual, variáveis que se mantêm inalteradas ao longo do ano (500 peças anuais e tempo de fabrico correspondente, ou seja, FFF → 2160,85 horas e SLM → 416,67 horas).

Por outro lado, os custos de mão de obra e de arranque apresentam comportamento decrescente com o aumento do lote de produção, visto que, o número total de ciclos necessários para contemplar a produção anual requerida diminuiu com o aumento do número de peças produzidas num único ciclo. Este efeito possuiu um impacto significativo na redução do custo unitário, especialmente para lotes menores, onde estes custos representam uma parcela maior do custo total. No entanto, a redução do custo unitário não ocorre, à mesma intensidade, indefinidamente. Após determinada dimensão do lote, a redução obtida, com a diluição dos custos de mão de obra e arranque estabiliza-se, pois, os custos encontram-se suficientemente diluídos. Isto significa que, além de determinado ponto, aumentar o lote traduz-se em ganhos menores.

Tabela 4.13: Número de peças por lote → Variação do custo por peça produzida por FFF.

Lote	Mão de obra (por peça)	Custo por peça
1	3,01 €	66,96 €
2	1,51 €	65,45 €
3	1,00 €	64,95 €
5	0,75 €	64,70 €
6	0,60 €	64,55 €
7	0,50 €	64,45 €
8	0,43 €	64,38 €
9	0,38 €	64,32 €
10	0,33 €	64,28 €
11	0,30 €	64,25 €
12	0,27 €	64,22 €

4.8.4 Preço do equipamento

À semelhança da análise anterior, a redução do custo do equipamento, demonstra que, à medida que o preço de compra da máquina diminuiu, o custo por peça também apresenta uma redução (Tabela 4.14 e Tabela D.12, em anexo).

No caso do FFF, quando o preço da máquina variar de 100 000 € para 40 000 €, o custo por peça diminuiu de 109,55 € para 79,55 €. A razão de variação do custo unitário para o FFF é, portanto:

$$\text{Razão de variação FFF} = \frac{\Delta \text{Custo unitário}}{\Delta \text{Custo do equipamento}} = \frac{30 \text{ €}}{60 000 \text{ €}} = 0,0005 \text{ € por unidade de custo da máquina} \quad (28)$$

Para o SLM, quando o preço diminuir de 800 000 € para 200 000 €, o custo por peça varia de 251,61 € para 71,61 €. A razão de variação do custo unitário para o SLM é:

$$\text{Razão de variação SLM} = \frac{\Delta \text{Custo unitário}}{\Delta \text{Custo do equipamento}} = \frac{180 \text{ €}}{600 000 \text{ €}} = 0,0003 \text{ € por unidade de custo da máquina} \quad (29)$$

Tabela 4.14: Preço do equipamento → Variação do custo por peça produzida por FFF.

Preço de compra do equipamento	Equipamento (por peça)	Custo por peça
100 000,00 €	50,25 €	109,55 €
90 000,00 €	45,25 €	104,55 €
80 000,00 €	40,25 €	99,55 €
70 000,00 €	35,25 €	94,55 €
60 000,00 €	30,25 €	89,55 €
50 000,00 €	25,25 €	84,55 €
40 000,00 €	20,25 €	79,55 €
30 000,00 €	15,25 €	74,55 €
20 000,00 €	10,25 €	69,55 €
10 000,00 €	5,25 €	64,55 €
8 000,00 €	4,25 €	63,55 €
6 000,00 €	3,25 €	62,55 €
4 000,00 €	2,25 €	61,55 €

Assim, as razões de variação revelam que, no FFF, a redução do custo da máquina possuiu um impacto mais acentuado no custo unitário por peça, ou seja, para o FFF, a depreciação da máquina possuiu um efeito mais significativo no custo final por peça, mesmo que o valor do equipamento seja muito inferior.

4.8.5 Produção anual

Ao investigar os dados da Tabela D.13 e da Tabela D.14, os custos unitários, nos processos FFF e SLM, mostram uma tendência clara de redução do custo por peça à medida que a produção anual aumenta. Em ambos os processos, o crescimento da produção permite reduzir os custos fixos, como a depreciação do equipamento e a matéria-prima (FFF), contribuindo para a redução do custo unitário. Embora os custos de manutenção aumentem com o uso mais intensivo do equipamento, a distribuição dos custos da maquinaria, ao longo de um maior número de peças, compensa esta variação. Excluindo os custos de manutenção, que crescem linearmente após um fator de uso de 50%, os custos de energia, consumíveis e etapas de pós-processamento aumentam proporcionalmente ao volume de produção anual, fazendo com que, por peça, tenham valores idênticos. Além disso, a Figura 4.25 (Tabela

D.13 e da Tabela D.14) permite identificar um ponto de cruzamento entre os custos unitários dos dois processos. Este ponto ocorre quando a produção atinge 1000 peças no FFF e 2500 no SLM, resultando em um custo unitário de, aproximadamente, 59,6 euros.

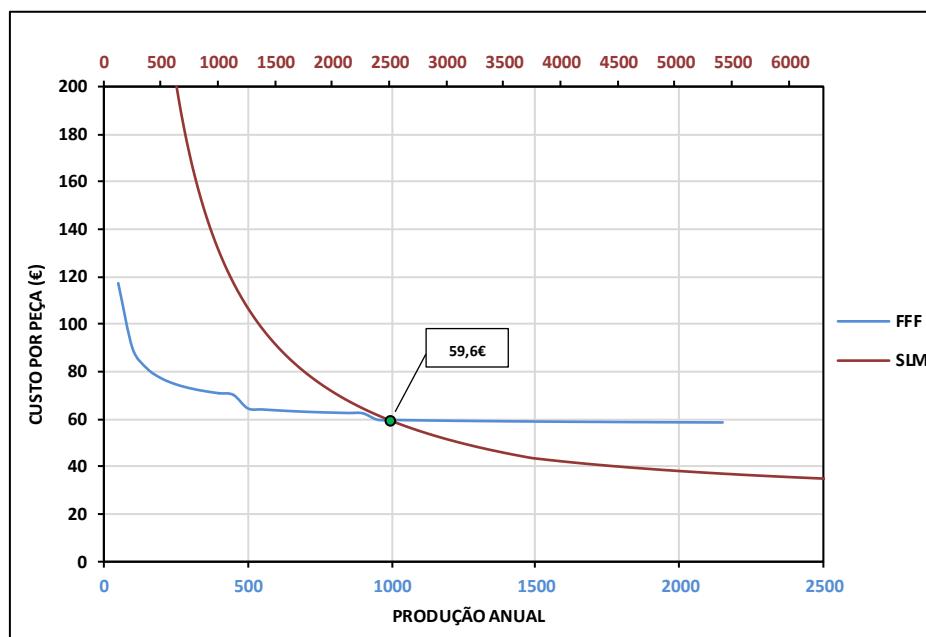


Figura 4.25: Relação entre a produção anual e o custo unitário para os processos FFF e SLM.

No entanto, vale destacar que o modelo apenas considera a redução do custo da matéria-prima (FFF) e do material de suporte em função do volume adquirido a um fornecedor. O mesmo princípio se aplica a outros custos, como o gás (SLM), peças de reposição e demais consumíveis. Assim, em uma situação realista, a redução do custo unitário com o aumento da produção anual seria ainda mais acentuada, pois um maior número de componentes de custo sofreria reduções conforme o volume adquirido. Além disso, ao subcontratar serviços, como o D&S no FFF ou, possivelmente, a separação das peças no SLM, dependendo da escala de produção, seria viável estabelecer acordos com empresa especializadas, que, potencialmente, resultariam em preços mais vantajosos conforme o volume de produção aumentasse, reforçando, ainda mais, a tendência de queda do custo unitário.

5. Conclusões e trabalho futuro

O estudo reforça o potencial do processo FFF como alternativa viável e estratégica para a produção de peças metálicas, especialmente em cenários onde o custo, a facilidade de operação e a flexibilidade de projeto são fatores decisivos.

A partir da análise da precisão e exatidão dimensional da tecnologia, observou-se que o aumento do número de camadas externas contribuiu para a redução do erro dimensional na fase de impressão. Nas etapas subsequentes, desvinculação e sinterização (D&S), foram registradas contrações lineares médias de $17,147 \pm 1,284$ % nas direções X e Y e de $19,247 \pm 1,067$ % na direção Z, traduzindo-se em fatores de escala, a aplicar nos componentes, de $20,696 \pm 1,527$ % e $23,834 \pm 1,336$ %, respetivamente. Além disso, verificou-se que o sistema de guias da impressora induz a ligeiros aumentos dos erros dimensionais nas peças fabricadas segundo Y. No final, o erro médio entre os provetes FFF e as dimensões de design pretendidas foi de $1,184 \pm 0,679$ %, um valor muito semelhante ao obtido com o SLM ($1,182 \pm 1,670$ %) e passível de redução caso se ajuste o sobredimensionamento.

Complementarmente, a densidade revelou-se fortemente dependente do número de camadas externas. Até ao limite estudado de 6 camadas externas, o aumento da proporção de material associado às mesmas elevou a densidade de $7,240 \rightarrow 7,458$ g/cm³ em provetes cilíndricos e de $7,114 \rightarrow 7,592$ g/cm³ em provetes cúbicos. A orientação de impressão também causou impacto, fazendo com que os provetes impressos deitados apresentassem densidades superiores às peças impressas em pé com a mesma geometria e o mesmo número de camadas externas. Tal como na análise dimensional, as peças impressas segundo Y exibiram densidades ligeiramente inferiores. Em ambos os conjuntos, as amostras de SLM mantiveram-se mais próximas do valor nominal (7,98 g/cm³).

Do ponto de vista da qualidade superficial, a elevada rugosidade das peças produzidas por FFF, especialmente nas fases superiores, ainda representa um obstáculo para aplicações de alta exigência (grau de rugosidade: N8/N9). No entanto, este aspeto pode ser mitigado por tratamentos superficiais, aplicáveis pré ou pós D&S, e, em contextos específicos, pode ser funcionalmente vantajoso.

Os ensaios de tração revelaram que, para o FFF, o comportamento dos componentes está dependente da combinação entre a orientação de impressão e o número de camadas externas. Os provetes impressos deitados, especialmente entre os sem camadas externas, apresentaram maior resistência mecânica, beneficiando do plano de deposição paralelo ao esforço aplicado e da menor espessura impressa na direção Z. Contudo, à medida que o número de camadas externas aumentou, a relação volumétrica entre o material do preenchimento e das camadas externas controlou as propriedades mecânicas de cada provete. Determinou-se que as configurações que permitiam atingir, na zona de referência, 80% do material presente nas camadas externas apresentavam, não só maior resistência à tração, como também melhor distribuição das tensões, fazendo com que os provetes exibissem comportamentos mais isotrópicos. Ainda assim, o excesso de camadas externas pode ser contraproducente, afetando a resistência por desagregação entre camadas, aumentando os custos e tempos de produção.

Nos ensaios de compressão, os provetes SLM exibiram menor resistência mecânica quando comprimidos na direção Z de impressão. Por outro lado, nos provetes FFF, a direção de compressão não apresentou um efeito significativo nas propriedades mecânicas, destacando uma resposta mais isotrópica. O número de camadas externas influenciou positivamente as propriedades à compressão, particularmente em termos do módulo de

elasticidade, embora um número elevado de camadas externas, em certos casos, tenha contribuído para a redução tensão limite de elasticidade devido à desagregação entre camadas.

Os resultados dos ensaios de flexão dos provetes FFF mostram que, à semelhança do comportamento à tração, peças com planos de deposição paralelos aos esforços impostos (neste caso, provetes impressos de lado), sobretudo entre as sem camadas externas, exibiram maior resistência mecânica. O aumento do número de camadas externas melhorou significativamente as propriedades mecânicas, tendo-se destacado as peças com cerca de 80% do seu volume presente nas camadas externas. Contudo, peças inteiramente constituídas por camadas externas apresentaram redução na resistência à deformação elástica. Ao contrário dos restantes ensaios, a orientação de impressão surte um maior impacto na resistência à flexão, tendo-se identificado que, provetes impressos de lado com baixa porção do seu volume nas camadas externas (41,2%), apresentaram melhores resultados comparativamente a provetes impressos deitados com maiores porções (45,1% e 51,1%). Além disso, a direção de impressão também afetou a resistência mecânica dos componentes, nos quais, provetes impressos na direção Y apresentaram tensões limite de elasticidade e módulos de elasticidade inferiores aos impressos na direção X.

Embora o SLM continue como referência em termos de desempenho mecânico, nomeadamente, à tração, compressão e flexão, o FFF metálico demonstrou avanços notáveis, apresentando maior ductilidade e uma resposta mais isotrópica em determinadas configurações de impressão. Adicionalmente, a análise de falhas do presente estudo reforça a importância da compatibilidade entre a geometria, orientação de impressão e parâmetros de deposição, destacando o papel fundamental do desenvolvimento do design especializado para o processo.

No que diz respeito aos custos de produção, os dados obtidos evidenciam o forte apelo económico do FFF. O modelo de custos demonstrou que, para baixas e médias produções, o FFF apresenta custos unitários significativamente reduzidos, posicionando o FFF como uma solução promissora para empresas emergentes, centros de prototipagem e aplicações finais com exigências dimensionais e mecânicas moderadas. A tendência de crescimento reforça o potencial do FFF para alcançar maior competitividade frente a tecnologias mais estabelecidas.

Por fim, apesar do forte apelo, o FFF metálico ainda enfrenta barreiras técnicas significativas que devem ser superadas para que possa alcançar a maturidade tecnológica e competir diretamente com tecnologias mais consolidadas. As seguintes direções de pesquisa são fundamentais para ampliar o domínio técnico desta tecnologia:

- **Resistência à fadiga:** Realizar estudos extensivos sobre a resistência à fadiga, tendo em consideração que os esforços cíclicos são comuns em muitas aplicações industriais e que a pesquisa neste campo é limitada.
- **Otimização do ciclo de produção:** Investigar a interação entre a modelação, desvinculação, sinterização e tratamentos pós-sinterização para reduzir a porosidade, minimizar as retrações e distorções, aumentar a repetibilidade e melhorar a consistência dimensional.
- **Avanço da matéria-prima:** Desenvolver ligantes mais eficientes e fáceis de processar, reduzindo a necessidade de equipamentos dedicados e enfrentando os desafios de densificação e deformação.
- **Precisão e detalhe geométrico:** Melhorar a resolução de detalhes e o tamanho máximo de peças produzíveis, aproximando o desempenho dimensional ao obtido por SLM.

- **Acabamento e defeitos:** Explorar estratégias de refino macroestrutural e tratamentos de superfície, tornando as peças mais adequadas para aplicações finais mais exigentes.
- **Sustentabilidade e produtividade:** Promover melhorias na produtividade e eficiência energética, enquanto se procura reduzir o impacto ambiental e o desperdício de material.
- **Normalização e padronização:** Estabelecer diretrizes e padrões internacionais que facilitem a certificação e aceitação do FFF metálico em contextos industriais regulados.

Ao endereçar estes pontos críticos e explorar as possibilidades de melhoria, o FFF tem potencial para ocupar um espaço significativo no mercado, não apenas como alternativa econômica, mas como uma solução eficaz na produção de peças metálicas para uma ampla variedade de aplicações.

Referências

- Bullseye Calibration. (2024). *Struers Duramin Digital Vickers/Knoop Hardness Tester – Calibrated*. Obtido de <https://bullseyecalibration.com/shop/struers-duramin-digital-vickers-knoop-hardness-tester-calibrated/> (Acessado a 02/11/2024)
- Forward AM. (2024d). *Ultrafuse 316L Technical Data Sheet v1.1. [PDF file]*. Obtido de https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Metal%20Filaments/316L/TDS/Ultrafuse_316L_TDS_EN_v1.1.pdf (Acessado a 7/08/2024)
- Hogentogler & Co. (2024). *Mettler Toledo ML204 Analytical Balance*. Obtido de <https://www.hogentogler.com/mettler-toledo/ml204-analytical-balance.asp> (Acessado a 02/10/2024)
- UltiMaker. (2025). *Comparing FFF, SLA, and SLS technologies*. Obtido de <https://ultimaker.com/learn/comparing-fff-sla-and-sls-technologies/> (Acessado a 06/04/2025)
- 3D Matter. (2019). *Advantages and disadvantages of FFF printing*. Obtido de <https://3dmatters.co.uk/articles/advantages-and-disadvantages-of-fff-printing/> (Acessado a 06/04/2025)
- 3DFUSION. (2023). *Process. 3D Fusion*. Obtido de <https://3dfusion.ro/process/> (Acessado a 05/08/2024)
- Ait-Mansour et al. (2020). Design-dependent shrinkage compensation modeling and mechanical property targeting of metal FFF. *Progress in Additive Manufacturing*, 5(1), 51–57. <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00124-8>.
- Alghamdi et al. (2021). Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges. *Polymers*, 13(5), 753. <https://doi.org/10.3390/polym13050753>.
- AM Material. (25 de setembro de 2023a). *Complete guide to SLM equipment*. Obtido de <https://am-material.com/news/complete-guide-to-slm-equipment/> (Acessado a 22/08/2024)
- AM Material. (21 de setembro de 2023b). *SLM additive manufacturing*. Obtido de <https://am-material.com/news/slm-additive-manufacturing/> (Acessado a 22/08/2024)
- AM Material. (21 de julho de 2023c). *SLM additive manufacturing: 10 key advantages and applications*. Obtido de <https://am-material.com/news/slm-additive-manufacturing10-key-advantages-and-applications/> (Acessado a 22/08/2024)
- AM Printing. (2025). *316L Stainless Steel Powder*. Obtido de <https://am-printing.com/316l-stainless-steel-powder/> (Acessado a 05/03/2025)
- Ambrosi, A., & Bonanni, A. (2021). How 3D printing can boost advances in analytical and bioanalytical chemistry. *Microchimica Acta*, 188, 265. <https://doi.org/10.1007/s00604-021-04901-2>.
- Ansari et al. (2021). Selective Laser Melting of 316L Austenitic Stainless Steel: Detailed Process Understanding Using Multiphysics Simulation and Experimentation. *Metals*, 11(7), 1076. <https://doi.org/10.3390/met11071076>.
- Armstrong et al. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1001-1029. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060>.
- ASM International. (2024). *Stainless Steel 316L (UNS S31603) material data sheet*. Obtido de <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq316q> (Acessado a 25/08/2024)

- ASTM. (4 de dezembro de 2015). *ASTM F2792-12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015)*. <https://www.astm.org/f2792-12a.html>.
- ASTM International. (2022). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (Designation: E8/E8M – 22)*. Obtido de https://store.astm.org/e0008_e0008m-22.html (Acessado a 29/09/2024)
- ASTM standard. (2014). *Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility (Designation: E290 – 14)*. Obtido de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/88607/3b3da1a017cc49daa9a35a117fb8da17/ASTM-E290-14.pdf> (Acessado a 19/11/2024)
- ASTM standard. (2018). *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature (Designation: E9 – 09)*. Obtido de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/99203/da6e0998e590414a9cd185129b218ca5/ASTM-E9-09-2018-.pdf> (Acessado a 29/09/2024)
- Autodesk. (2024). *AutoCAD overview*. Obtido de <https://www.autodesk.com/pt/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (Acessado a 18/08/2024)
- Azlin, M. N., Ilyas, R. A., Zuhri, M. Y., Sapuan, S. M., Harussani, M. M., Sharma, S., . . . Afifah, A. N. (2022). 3D printing and shaping polymers, composites, and nanocomposites: A review. *Polymers*, 14(1), 180. <https://doi.org/10.3390/polym14010180>.
- Bento, C. C. (2022). Evaluation of mechanical properties of fused filament fabrication 3D printed parts. Instituto Politécnico de Leiria - Escola Superior de Tecnologias e Gestão.
- BOC. (2025). *Pureshield Argon - Manifolded Cylinder Pallet*. Obtido de <https://www.boconline.co.uk/shop/en/uk/gas-a-z/argon-gas-cylinders/pureshield-argon-manifolded-cylinder-pallet> (Acessado a 12/03/2025)
- Carminati et al. (2022). Mechanical Characterization of AISI 316L Samples Printed Using Material Extrusion. *Applied Sciences*, 12(3), 1433. <https://doi.org/10.3390/app12031433>.
- Chaudhary et al. (2023). Additive manufacturing by digital light processing: A review. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(3), 331–351. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00336-0>.
- Cojocarui et al. (2022). The influence of the process parameters on the mechanical properties of PLA specimens produced by fused filament fabrication—A review. *Polymers*, 14(5), 886. <https://doi.org/10.3390/polym14050886>.
- COTU. (2025a). *BASF Ultrafuse 316L Filament*. Obtido de <https://shop.cotu.eu/en/material/875-6432-basf-ultrafuse-316l-filament.html> (Acessado a 05/03/2025)
- COTU. (2025b). *BASF Ultrafuse Support Layer Filament*. Obtido de <https://shop.cotu.eu/en/material/877-6440-basf-ultrafuse-support-layer-filament.html> (Acessado a 05/03/2025)
- Dantec Dynamics. (2024). *eduDIC: Digital Image Correlation for Education and Training*. Obtido de <https://www.dantecdynamics.com/solutions/digital-image-correlation-dic/edudic/> (Acessado a 25/11/2024)
- Desktop Metal. (2024). *Studio System 2*. Obtido de <https://www.desktopmetal.com/products/studio> (Acessado a 04/08/2024)

- Deterco Inc. (2024). *MarSurf M300 Mobile Roughness Measurement*. Obtido de <https://detercoonline.com/product/marsurf-m300-mobile-roughness-measurement/> (Acessado a 05/10/2024)
- Dubrov et al. (2019). On the dendrite growth simulation during multitrack selective laser melting process. *Journal of Physics: Conference Series*, 1410, 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012026>.
- Elnik Systems. (2024). *High-Temperature Sintering and Debinding Solutions*. Obtido de <https://www.elniksystems.com/>
- Farfán-Cabrera et al. (2017). *Determination of creep compliance, recovery and Poisson's ratio of elastomers by means of digital image correlation (DIC)*. *Polym Test* 59:245–252. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.02.010>.
- Filament2Print. (2025). *Raise3D Forge1*. Obtido de <https://filament2print.com/en/metal-fff/2234-raise3d-forge1-6970240723820.html> (Acessado a 06/03/2025)
- Filamet, *The Virtual Foundry*. (2024). Obtido de <https://thevirtualfoundry.com/products/> (Acessado a 04/08/2024)
- Filright. (2025a). *Raise3D D200-E*. Obtido de <https://www.filright.com/us/raise3d-d200-e.html> (Acessado a 21/03/2025)
- Filright. (2025b). *Raise3D S200-C*. Obtido de <https://www.filright.com/us/raise3d-s200-c.html> (Acessado a 21/03/2025)
- Forward AM. (2024). *Ultrafuse 316L metal filaments*. Obtido de <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/ultrafuse-316l/> (Acessado a 17/06/2024)
- Forward AM. (2024a). *Ultrafuse 316L - Metal Filaments for Fused Filament Fabrication (FFF)*. Obtido de <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/ultrafuse-316l/> (Acessado a 21/08/2024)
- Forward AM. (2024b). *Ultrafuse Metal filaments*. Obtido de <https://forward-am.com/materialportfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/> (Acessado a 28/07/2024)
- Forward AM. (2024c). *Ultrafuse Metal User Guideline*. Obtido de https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Metal%20Filaments/Ultrafuse_metal_User_Guideline.pdf (Acessado a 21/07/2024)
- Forward AM. (2024d). *Ultrafuse Support Layer – Technical Data Sheet. BASF 3D Printing Solutions GmbH*. Obtido de https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Metal%20Filaments/Support%20Layer/TDS/Ultrafuse_Support_Layer_TDS_EN.pdf
- Forward AM. (2024e). *DS Services by Elnik and DHS*. Obtido de <https://forward-am.com/wp-content/uploads/2024/12/DS-Services-by-Elnik-and-DHS.pdf>. (Acessado a 07/03/2025)
- Gao et al. (2023). A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM). *Micromachines*, 14(1), 57. <https://doi.org/10.3390/mi14010057>.
- Gonabadi et al. (2020). *The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer*. *Int J Adv Manuf Technol* 111:695–709. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06138->.

- Gong et al. (2019). Comparison of stainless steel 316L parts made by FDM- and SLM-based additive manufacturing processes. *JOM*, 71(3), 880–885. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3207-3>.
- Gong et al. (2019). Comparison of stainless steel 316L parts made by FDM- and SLM-based additive manufacturing processes. *JOM*, 71(3), 880–885. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3207-3>.
- Hernandez Korner, M. E., Lamban, M. P., Albajez, J. A., Santolaria, J., Ng Corrales, L. C., & Royo, J. (2024). *Cost model framework for pieces additively manufactured in fused deposition modeling for low to medium batches*. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 11(1), 287–298. <https://doi.org/10.1089/3dp.2022.0044>.
- Instron. (2012). *2810 Series Flexure Fixture Technical Data Sheet [PDF]*. Obtido de https://www.instron.com/en/products/testing-accessories/flexure-fixtures/-/media/literature-library/products/2012/10/2810-series-flexure-fixture-2810400.pdf#page=2?sc_lang=en&ch=115 (Acessado a 09/11/2024)
- Instron. (2024a). *Electromechanical Testing Systems – Discontinued Models*. Obtido de <https://www.instron.com/es-es/products/testing-systems/out-of-production-systems/electromechanical> (Acessado a 25/11/2024)
- Instron. (2024b). *Bluehill Universal Materials Testing Software*. Obtido de <https://www.instron.com/pt-br/products/materials-testing-software/bluehill-universal> (Acessado a 25/11/2024)
- ISO. (2012). *ISO 22068:2012 – Sintered-metal injection-moulded materials — Specifications*. *International Organization for Standardization*. Obtido de <https://www.iso.org/standard/50373.html> (Acessado a 24/08/2024)
- ISO. (dezembro de 2021 (a)). *ISO 21920-3:2021. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 3: Specification operators*. Obtido de <https://www.iso.org/standard/72228.html> (Acessado a 06/10/2024)
- ISO. (2021 (b)). *ISO 21920-2:2021 - Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 2: Terms, definitions, and surface texture parameters*. Obtido de <https://www.iso.org/standard/72196.html> (Acessado a 5/01/2025)
- ISO/ASTM. (2015). *International Organization for Standardization & ASTM International*. Obtido de Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology: <https://www.iso.org/standard/69669.html>
- ISO/ASTM. (2021). *International Organization for Standardization & ASTM International. Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology, (ISO/ASTM 52900:2021)*. West Conshohocken, PA, USA. Obtido de <https://www.iso.org/standard/74514.html>
- Jacob et al. (2024). *A Review of Fused Filament Fabrication of Metal Parts (Metal FFF): Current Developments and Future Challenges*. *Technologies*, 12(12), 267. <https://doi.org/10.3390/technologies12120267>.
- Jia, Q., & Gu, D. (2014). Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 585, 713–721. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.171>.
- Kedziora, S., Decker, T., Museyibov, E., Morbach, J., Hohmann, S., Huwer, A., & Wahl, M. (2022). Strength properties of 316L and 17-4 PH stainless steel produced with additive manufacturing. *Materials*, 15(18), 6278. <https://doi.org/10.3390/ma15186278>.
- Kluczyński et al. (2023). A comparative investigation of properties of metallic parts additively manufactured through MEX and PBF-LB/M technologies. *Materials*, 16, 5200. <https://doi.org/10.3390/ma16145200>.

- Kumar et al. (2021). Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes. *Materials Today: Proceedings*, 46(Part 17), 7907-7920. <https://doi.org/10.1016/j.matp>.
- Kuo et al. (2017). Effects of build direction and heat treatment on creep properties of Ni-base superalloy built up by additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 129, 74-78. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.035>.
- Kurose, T., Abe, Y., Santos, M., Kanaya, Y., Ishigami, A., Tanaka, S., & Ito, H. (2020). Influence of the layer directions on the properties of 316L stainless steel parts fabricated through fused deposition of metals. *Materials*, 13(11), 2493. <https://doi.org/10.3390/ma13112493>.
- Magigoo. (2024). *Magigoo Pro Metal*. Obtido de <https://magigoo.com/products/magigoo-pro-metal/> (Acessado a 25/08/2024)
- Magigoo. (2025). *Magigoo Pro Metal – Build plate adhesive for Ultrafuse 316L metal filament*. Obtido de <https://magigoo.myshopify.com/collections/all/products/magigoo-pro-metal-build-plate-adhesive-for-ultrafuse-316l-metal-filament> (Acessado a 12/03/2025)
- Mahr GmbH. (2024). *Official Shop – Mahr Metrology Solutions*. Obtido de <https://shop.mahr.com/DE-en/> (Acessado a 04/10/2024)
- Manfredi et al. (2013). From Powders to Dense Metal Parts: Characterization of a Commercial AlSiMg Alloy Processed through Direct Metal Laser Sintering. *Materials*, 6(3), 856-869. <https://doi.org/10.3390/ma6030856>.
- Markforged. (2024a). *3D printing process*. Obtido de <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/how-do-3d-printers-work/3d-printing-process> (Acessado a 20/08/2024)
- Markforged. (2024b). *MetalX Systems, Markforged*. Obtido de <https://markforged.com/3d-printers/metal-x> (Acessado a 04/08/2024)
- Markforged. (2025). *Metal additive manufacturing process*. Obtido de <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/metal-additive-manufacturing-process> (Acessado a 02/04/2025)
- Mettler-Toledo. (2024). *NewClassic ML Operating Instructions*. Obtido de https://www.mt.com/us/en/home/library/operating-instructions/laboratory-weighing/NewClassicML_E.html (Acessado a 02/10/2024)
- Moreira Montuori et al. (2020). Additive manufacturing of 316L stainless steel by selective laser melting. *Soldagem & Inspeção*, 25, e2530. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.30>.
- Moreno Nieto et al. (2021). Design for additive manufacturing: Tool review and a case study. *Applied Sciences*, 11(4), 1571. <https://doi.org/10.3390/app11041571>.
- MPiF. (2024). *Metal Powder Industries Federation, Standard 35*. Obtido de <https://www.mpif.org/Resources/Standards.aspx>
- Obadimu et al. (2022). *Shrinkage behaviour of material extrusion steel 316L: Influence of primary 3D printing parameters*. *Rapid Prototyping Journal*, 28(11), 92-101. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2022-0224>.
- Palová et al. (2023). *Measuring Procedures for Evaluating the Surface Roughness of Machined Parts*. *Applied Sciences*, 13(16), 9385. <https://doi.org/10.3390/app13169385>.
- Panwisawas, C., Perumal, B., Ward, R. M., Turner, N., Turner, R. P., Brooks, J. W., & Basoalto, H. C. (2017). Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium

- alloys: Experimental and modelling. *Acta Materialia*, 126, 251-263.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.062>.
- Pellegrini et al. (2022). Evaluation of anisotropic mechanical behaviour of 316L parts realized by metal fused filament fabrication using digital image correlation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120, 7951–7965. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09303-z>.
- Pellegrini, A., Palmieri, M. E., & Guerra, M. G. (2022). *Evaluation of anisotropic mechanical behaviour of 316L parts realized by metal fused filament fabrication using digital image correlation. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(11), 7951–7965. . Obtido de <https://doi.org/10.1007/s00170-022-0>
- Pereira et al. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, 30, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003>.
- Placek, M. (10 de janeiro de 2024). *STATISTA. Additive manufacturing and 3D printing*. Obtido de Statista: <https://www.statista.com/topics/1969/additive-manufacturing-and-3d-printing/#statisticChapter> (Acessado a 09/08/2024)
- Popkova et al. (2021). *The effect of the selective laser melting mode on second phases precipitation in 316L steel during subsequent heat treatment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1029, 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012053>.
- Prabhakar, M. M., Saravanan, A. K., Lenin, A. H., Leno, I. J., Mayandi, K., & Ramalingam, P. S. (2021). A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. *Materials Today: Proceedings*, 45(7), 6108-6114. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.225>.
- Prusa3D. (19 de setembro de 2024). *PrusaSlicer*. . Obtido de https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/ (Acessado a 18/08/2024)
- Raeburn, A. (4 de fevereiro de 2024). *O processo de desenvolvimento de produtos. Asana*. Obtido de <https://asana.com/pt/resources/product-development-process> (Acessado a 6/08/2024)
- Raise3D. (2023). *Raise3D Forge1 Technical Specifications V2.5*. Obtido de https://s1.raise3d.com/2023/11/Raise3D_Forge1-Technical-Specifications_V2.5-1.pdf?_gl=1*1exkiz5*_gcl_au*MTMzODU4MzA4NS4xNzMxNzk5MTA0 (Acessado a 28/09/2024)
- Raise3D. (7 de setembro de 2024a). *3D Printing Settings and Parameters*. Obtido de <https://www.raise3d.com/blog/3d-printing-settings-and-parameters/> (Acessado a 22/08/2024)
- Raise3D. (2024c). *IdeaMaker*. Obtido de <https://www.raise3d.com/ideamaker/> (Acessado a 18/08/2024)
- RAISE3D. (2024d). *Forge1, RAISE3D technologies, Inc*. Obtido de <https://www.raise3d.com/raise3d-forge1-a-metal-fff-3d-printer/> (Acessado a 24/07/2024)
- Raise3D. (2024e). *ideaMaker User Manual (V.5.1.2) [Manual de usuário]*. Obtido de <https://support.raise3d.com/ideaMaker/download-manual-15-524.html> (Acessado a 24/08/2024)
- Raise3D. (2025). *Brass nozzle V3 0.4mm – Pro3 HS Series, Pro3 Series, Pro2 Series, and E2*. Obtido de <https://www.raise3d.com/products/brass-nozzle-v3-0-4mm-pro3-hs-series-pro3-series-pro2-series-and-e2-only/> (Acessado a 12/03/2025)
- Raza, A., Altaf, K., Ahmad, F., Hussain, G., Alkahtani, M., & Wei, H. (2024). Experimental study and characterisation of 316L stainless steel parts fabricated with metal fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.034>.

- Remédios, S. C. (2021). *Cost Model for Additive Manufacturing of Metals in Aeronautics*. Instituto Superior Técnico.
- REN - Redes Energéticas Nacionais. (2025). *Mercado de eletricidade. Preço Médio Anual de eletricidade*. Obtido de <https://datahub.ren.pt/pt/eletricidade/mercado/> (Acessado a 12/03/2025)
- Rijeza. (21 de junho de 2023). *Rugosidade e sua importância na durabilidade de peças*. Obtido de <https://rijeza.com.br/blog/rugosidade-e-sua-importancia-na-durabilidade-de-pecas/> (Acessado a 06/01/2025)
- Sadaf et al. (2021). A simple route for additive manufacturing of 316L stainless steel via fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Processes*, 67, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.055>.
- Sæterbø, M., & Solvang, W. D. (2023). *Evaluating the cost competitiveness of metal additive manufacturing – A case study with metal material extrusion*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 45, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.06.005>.
- Santamaria et al. (2022). Microstructure and mechanical behaviour of 316L stainless steel produced using sinter-based extrusion additive manufacturing. *Journal of Materials Science*, 57, 9646–9662. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06828-8>.
- Sartini, M., Bianchi, I., Vita, A., Germani, M., & Mandolini, M. (2024). *An analytic cost model for bound metal deposition*. *Proceedings of the Design Society*, 4, 1819–1828. <https://doi.org/10.1017/pds.2024.184>.
- Schneider, M. S. . (2014). *Análise do comportamento mecânico de aços rápidos M2 com tratamento duplex: Influência da rugosidade sobre a adesão do revestimento*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Obtido de https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10200/3/CT_COEME_2014-2_24.pdf (Acessado a 06/01/2025)
- Sequeira, D. S. (2019). *Metal Additive Manufacturing in Aeronautics: a Life Cycle Cost Perspective*. Instituto Superior Técnico.
- Siddique, T., Sami, I., Nisar, M., Naeem, M., Karim, A., & Usman, M. (2019). Low cost 3D printing for rapid prototyping and its application. In 2019 International Conference on Innovative Computing (ICIC) (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/INTELLECT47034.2019.8954983>.
- Silva, M. A. (2020). *Análise de rugosidade em amostras metálicas para fins de caracterização [Master's thesis, Universidade Federal de Uberlândia]*. Repositório Institucional da UFU. Obtido de <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/23944/3/AnaliseRugosidadeAmostras.pdf> (Acessado a 6/01/2025)
- Silva, R. A., & Almeida, L. A. (2017). *Tecnologia da soldagem*. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Obtido de <https://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf> (Acessado a 6/01/2025)
- SLM Solutions Group AG. (abril de 2023). *Material data sheet: 316L (Version EN)*. Obtido de https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/MDS_316L_2023-04_EN.pdf (Acessado a 25/08/2024)
- SolidWorks. (2024). *SOLIDWORKS Software Products: Design & Collaboration Tools*. Obtido de <https://www.solidworks.com/> (Acessado a 18/08/2024)
- Somireddy et al. (2019). *Analysis of the Material Behavior of 3D Printed Laminates Via FFF*. *Exp Mech* 59, 871–881. <https://doi.org/10.1007/s11340-019-00511-5>.

- STEMpedia. (2024). *Getting started with 3D printing*. Obtido de <https://ai.thestempedia.com/docs/3d-printing/getting-started-with-3d-printing/> (Acessado a 15/08/2024)
- Steuben et al. (2015). Design for Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing. Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE). <https://doi.org/10.1115/DETC2015-46355>.
- Struers. (2024). *Ensuring Certainty*. Obtido de <https://www.struers.com/> (Acessado a 03/10/2024)
- Suwanpreecha, C., & Manonukul, A. (2022). A review on material extrusion additive manufacturing of metal and how it compares with metal injection moulding. *Metals*, 12(3), 429. <https://doi.org/10.3390/met12030429>.
- Talent.com. (2025). *Salário de operador de máquinas em Portugal*. Obtido de <https://pt.talent.com/salary?job=operador+de+m%C3%A1quinas> (Acessado a 12/03/2025)
- Tan, C., Zhou, K., Ma, W., Attard, B., Zhang, P., & Kuang, T. (2018). Selective laser melting of high-performance pure tungsten: parameter design, densification behavior and mechanical properties. *Science and Technology of Advanced Materials*, 19(1), 370–380. <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1455154>.
- Thakur et al. (2023). 4D printing of thermoresponsive materials: a state-of-the-art review and prospective applications. *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, 17, 2075–2094. <https://doi.org/10.1007/s1200>.
- Thompson et al. (2019). Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel. *Additive Manufacturing*, 30, 100861. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100861>.
- Tinkercad. (2024). *3D design*. Obtido de <https://www.tinkercad.com/3d-design> (Acessado a 16/08/2024)
- Tosto et al. (2021). Hybrid metal/polymer filaments for fused filament fabrication (FFF) to print metal parts. *Applied Sciences*, 11(4), 1444. <https://doi.org/10.3390/app11041444>.
- Ultimaker. (2024). *Ultimaker Cura*. . Obtido de <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/> (Acessado a 18/08/2024)
- Wagner, M. A., Engel, J., Hadian, A., Clemens, F., Rodriguez-Arbaizar, M., Carreño-Morelli, E., . . . Spolenak, R. (2022). Filament extrusion-based additive manufacturing of 316L stainless steel: Effects of sintering conditions on the microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 59, 103147. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103147>.
- Wang et al. (2023). Effect of Printing Parameters on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 316L Stainless Steel Fabricated by Fused Filament Fabrication. *J. of Materi Eng and Perform*. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08848-8>.
- Yang et al. (2024). Application of additive manufacturing in the automobile industry: A mini review. *Processes*, 12(6), 1101. <https://doi.org/10.3390/pr12061101>.
- Yolton, C. F., & Froes, F. H. (2015). Conventional titanium powder production. In M. Qian & F. H. (Sam) Froes (Eds.), *Titanium Powder Metallurgy* (pp. 21-32). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800054-0.00002-2>.
- Zhang et al. (2017). Defect formation mechanisms in selective laser melting: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30, 515–527. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0121-5>.

Anexo A – Processos de fabrico aditivo de metais

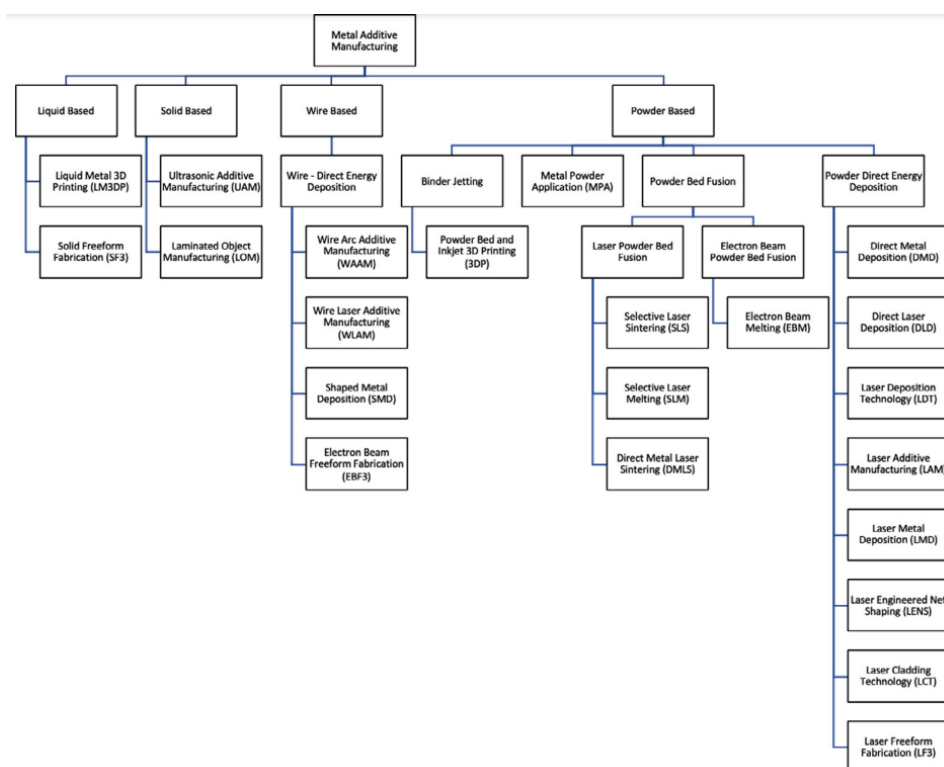


Figura A.1: Classificação dos processos de MAM segundo a matéria-prima (retirado de Kumar et al. (2021)).

Anexo B – Parâmetros de impressão

Tabela B.1: Sintetização dos parâmetros de impressão e respectivos valores, recomendados pela BASF, para o material Ultrafuse 316L (Forward AM, 2024c).

Parâmetro	Valores Típicos (BASF – FFF, Ultrafuse 316L)
<i>Bed temperature</i>	90-105 °C
<i>Nozzle temperature</i>	230-250 °C
<i>Cooling</i>	Nenhum
<i>Shell/Outlines</i>	1-3
<i>Infill density (solid part)</i>	100-105%
<i>Infill type (solid part)</i>	Linhas
<i>Infill line directions</i>	[45, -45]
<i>Infill overlap</i>	20-35%
<i>Top/Bottom layers</i>	Opcional, mas, no geral, é utilizado, no mínimo, uma camada
<i>Layer height</i>	0,10-0,25 mm
<i>Extrusion rate</i>	Max. 25 cm ³ /h
<i>Print speed</i>	25 mm/s
<i>Retraction speed</i>	45 mm/s
<i>Retraction distance</i>	1,5 mm – <i>Direct extruder</i> 5,0 mm - <i>Bowden extruder</i>
<i>Adherence</i>	Plataforma de vidro + cola + estruturas adicionais (<i>raft</i> + <i>skirt</i>)
<i>Nozzle size</i>	0,3 – 0,8 mm
<i>Line width</i>	±10-20% da dimensão do bocal
<i>Printing orientation</i>	Opcional
<i>Scaling</i>	XY – 120%; Z – 124%

Anexo C – Propriedades mecânicas

Tabela C.1: Propriedades mecânicas normalizadas para o material 316L para as tecnologias MIM, SLM e FFF.

Parâmetros de impressão	MIM – 316L MPIF Standard 35; ISO 22068	MIM – 316L ISO 6507-1	SLM – 316L Nikon SLM - ASTM A276		FFF – Ultrafuse 316L BASF Forward AM		AISI type 316L ASM Inc.
			Flat	Upright	Flat	Upright	
Densidade (g/cm ³)	7,60	7,90	7,88		7,85		7,98
Rugosidade superficial - R _a (µm)	-	-	6		-		-
Dureza Vickers - HV	120	120	215		128	128	155
Limite Elast. R _{p0.2} -YS (MPa) (Tração)	140	180	515	455	251	234	205
Rotura - UTS (MPa) (Tração)	450	540	640	565	561	521	515
Módulo de elasticidade - E (GPa) (Tração)	-	-	-		-		193
Alongamento à fratura (%) (Tração)	40	60	35	37	53	36	60

Tabela C.2: Precisão e exatidão dimensional.

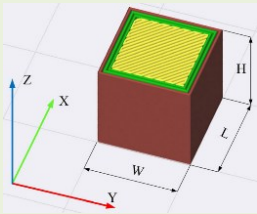
Parâmetros de impressão	Propriedades mecânicas							
Tabela C.8 – N.º 5 (Wang et al., 2023) 	N.º	Parâmetros				ΔL (%)	ΔW (%)	ΔH (%)
	1	0,1	+45°/-45°	0,40	100%	-0,050	0,170	0,150
	5	0,1	0°	0,40	100%	0,020	-0,010	-1,200
	6	0,1	90°	0,40	100%	0,480	0,230	0,080
	9	0,1	+45°/-45°	0,35	100%	0,350	0,390	0,270
	13	0,1	+45°/-45°	0,40	90%	-0,170	-0,050	0,040

Tabela C.3: Contração.

Parâmetros de impressão	Propriedades mecânicas		
Tabela C.8 – N.º 9 (Ait-Mansour et al., 2020)	Provete cilíndrico	XY	16,8 ± 0,10 %
		Z	20,5 ± 0,20 %
	Provete Tração Horizontal	XY	16,57 ± 1,14 %
		Z	24,86 ± 2,69 %
	Provete Tração Vertical	XY	15,79 ± 1,83 %
		Z	23,39 ± 3,96 %
	Provete Tração a 90º da mesa (sideways)	XY	18,40 ± 0,33 %
		Z	19,20 ± 0,13 %
Tabela C.8 – N.º 8 (Kurose, et al., 2020)	XY		Z
	14-15%		15-17%
Tabela C.8 – N.º 5 (Wang et al., 2023)	XY		Z
	18,87%		19,66%
Tabela C.8 – N.º 7 (Gong et al., 2019)	FOI's		XY Z
	#1	14%	23%
	#2	18%	20%
	#3	18%	-
	#4	13%	22%
	#5	16%	22%
	#6	17%	19%
	#7	13%	23%
	#8	13%	23%
	#9	13%	23%
	#10	-	18%
	#11	-	15%
Tabela C.8 – N.º 6 (Tosto et al., 2021)	Horizontal	Y	19,73%
		Z	25,20%
		X	19,72%
	Vertical	X	17,81%
		Y	8,57%
		Z	20,70%

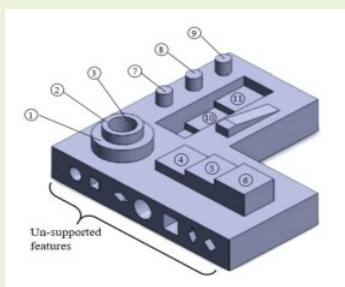


Tabela C.4: Densidade/Porosidade (parte 2).

Parâmetros de impressão	Propriedades mecânicas	
Tabela C.8 – N.º 11 (Kluczyński et al., 2023)	7,67 ± 0,020 g/cm ³	
Tabela C.8 – N.º 1 (Santamaria et al., 2022)	7,430 ± 0,070 g/cm ³	
Tabela C.8 – N.º 3 (Thompson et al., 2019)	Porosidade relativa	Densidade
	5%	7,581 g/cm ³

Tabela C.5: Rugosidade superficial média.

Parâmetros de impressão	Propriedades mecânicas		
Tabela C.8 – N.º 2 (Suwanpreecha & Manonukul, 2022)	FFF	Top	$18,06 \pm 1,86 \mu\text{m}$
		Bottom	$12,47 \pm 0,29 \mu\text{m}$
		Side	$13,43 \pm 0,50 \mu\text{m}$
	MIM	Top	$0,87 \pm 0,05 \mu\text{m}$
		Bottom	$1,25 \pm 0,10 \mu\text{m}$
Tabela C.8 – N.º 11 (Kluczyński et al., 2023)	FFF	XY	$5,61 \mu\text{m}$
		YZ	$3,90 \mu\text{m}$
	SLM	XY	$5,66 \mu\text{m}$
		YZ	$7,02 \mu\text{m}$

Tabela C.6: Dureza.

Parâmetros de impressão	Propriedades mecânicas	
Tabela C.8 – N.º 7 (Gong et al., 2019)	107 HV	
Tabela C.8 – N.º 13 (Wagner, et al., 2022)	$2,60\text{-}3,60 \text{ GPa} \rightarrow 265\text{-}367 \text{ HV}$	
Tabela C.8 – N.º 14 (Raza, et al., 2024)	Max. 200 HV	
Tabela C.8 – N.º 15 (Sadaf et al., 2021)	$285,50 \pm 5,50 \text{ HV}$	
Tabela C.8 – N.º 16 (Kedziora, et al., 2022)	$126,00 \pm 6,20 \text{ HV}$	
Tabela C.8 – N.º 11 (Kluczyński et al., 2023)	XY	$129,50 \pm 10,11 \text{ HV}$
	YZ	$130 \pm 9,00 \text{ HV}$

Tabela C.7: Propriedades à tração (parte 2).

Parâmetros de impressão						Propriedades mecânicas			
						Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (GPa)
Tabela C.8 – N.º 4 (Wang et al., 2023)	N.º	Layer height (mm)	Infill direction	Line width (mm)	Infill density				
	1	0,1	+45°/-45°	0,40	100%	173,45	499,42	46,61	-
	4	0,4	+45°/-45°	0,40	100%	143,56	427,31	38,00	-
	5	0,1	0°	0,40	100%	159,74	476,82	49,50	-
	6	0,1	90°	0,40	100%	173,27	505,60	53,45	-
	7	0,1	0°/90°	0,40	100%	166,84	493,60	52,00	-
	9	0,1	+45°/-45°	0,35	100%	168,10	497,20	52,50	-
	10	0,1	+45°/-45°	0,45	100%	165,50	494,50	57,50	-
	11	0,1	+45°/-45°	0,40	70%	79,47	135,27	10,17	-
	13	0,1	+45°/-45°	0,40	90%	163,00	325,00	18,00	-
Tabela C.8 – N.º 8 (Kurose, et al., 2020)		De lado (W)		0,1 mm	-	440,00	36,00	-	
				0,3 mm	-	350,00	29,00	-	
		Horizontal (T)		0,1 mm	-	453,00	48,00	-	
				0,3 mm	-	420,00	44,00	-	
		Vertical (L)		0,1 mm	-	100,00	4,00	-	
				0,3 mm	-	130,00	5,00	-	
Tabela C.8 – N.º 1 (Santamaria et al., 2022)						166,00 ± 2,00	524,00 ± 1,00	96,00 ± 1,00	196,00 ± 28,00
Tabela C.8 – N.º 9 (Ait-Mansour et al., 2020)		Vertical				92,76 ± 2,76	218,72 ± 5,59	6,27 ± 0,94	-
		De lado				95,02 ± 6,38	229,58 ± 35,14	7,9 ± 2,37	-
		Horizontal				104,77 ± 6,97	311,81 ± 36,96	12,48 ± 2,81	-
Tabela C.8 – N.º 12 (Carminati et al., 2022)						141,90 ± 14,10	426,60 ± 23,70	36,40 ± 3,15	-
Tabela C.8 – N.º 13 (Wagner, et al., 2022)						-	561,00 ± 10,00	64,00 ± 2,00	-
Tabela C.8 – N.º 15 (Sadaf et al., 2021)						252,00 ± 7,00	521,00 ± 16,00	-	198,00
Tabela C.8 – N.º 16 (Kedziora, et al., 2022)						152,90 ± 61,30	314,00 ± 41,70	10,20 ± 5,00	160,00 ± 22,00

Tabela C.8: Propriedades de impressão dos estudos mencionados.

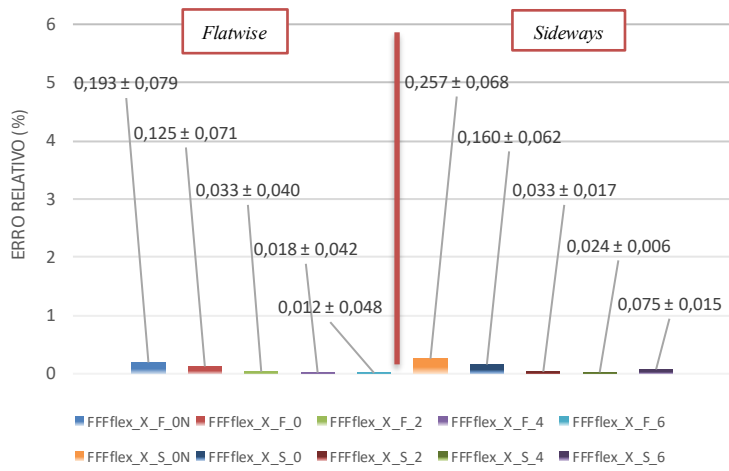
Numeração	Propriedades de impressão										Referência
	<i>Bed Temp.</i> (°C)	<i>Nozzle Temp.</i> (°C)	<i>N.º Shell</i>	<i>Infill density</i> (%)	<i>Infill type and direction</i>	<i>Layer height</i> (mm)	<i>Extrusion rate</i> (mm/s)	<i>Nozzle size</i> (mm)	<i>Line width</i> (mm)	<i>Printing</i>	
N.º 1	65	175	3	100	Linhas e +45°/-45°	0,15	30	0,4	0,5	P. de tração	(Santamaria et al., 2022)
N.º 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P. de tração	(Suwanprecha & Manonukul, 2022)
N.º 3	-	-	2	105	Linhas e +45°/-45°	0,2	-	0,6	-	P. de flexão	(Thompson et al., 2019)
N.º 4	-	-	-	Variável (70, 80, 90, 100)	Variável (0°, 90°, 0°/90°, +45°/-45°)	Variável (0,1; 0,2; 0,3; 0,4)	-	0,4	Variável (0,3; 0,35; 0,4; 0,45)	P. de tração	(Wang et al., 2023)
N.º 5	-	-	-	Variável (70, 80, 90, 100)	Variável (0°, 90°, 0°/90°, +45°/-45°)	Variável (0,1; 0,2; 0,3; 0,4)	-	0,4	Variável (0,3; 0,35; 0,4; 0,45)	P. cubico 10x10x10	(Wang et al., 2023)
N.º 6	90	240	-	100	-	0,14	-	0,4	-	P. de tração	(Tosto et al., 2021)
N.º 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P. de tração e peça personalizada	(Gong et al., 2019)
N.º 8	80	170	2	100	-	0,1; 0,3	10	0,4	-	P. de tração	(Kurose, et al., 2020)
N.º 9	90	235	2,5	Variável (25, 50, 75, 100, 125)	-	0,2	30	0,4	-	P. de tração e cilíndrico	(Ait-Mansour et al., 2020)
N.º 10	130	250	2	100	Linhas e +45°/-45°	0,15	35	0,4	-	P. de tração	(Pellegrini et al., 2022)
N.º 11	100	250	5	100	-	-	-	0,4	-	Peça personalizada	(Kluczyński et al., 2023)
N.º 12	-	170	-	100	Linhas	0,1	20	-	-	P. de tração	(Caminati et al., 2022)
N.º 13	60	230	-	-	Linhas (0°/90°)	0,16	4,67	0,25	-	P. de tração	(Wagner, et al., 2022)
N.º 14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P. de tração	(Raza, et al., 2024)
N.º 15	60	220	2	100	Linhas (0°/90°)	0,2	80	0,6	0,6	P. de tração	(Sadaf et al., 2021)
N.º 16	100	250	-	100	-	0,15	-	0,4	0,4	P. de tração	(Kedziora, et al., 2022)

Tabela C.9: Dados, respetivas referências e métodos de cálculo para determinar os custos de produção.

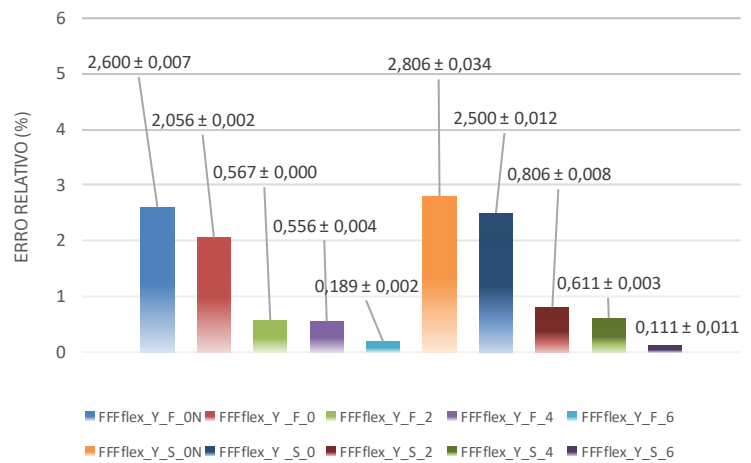
Variável	Valor		Referência / Método de cálculo	
	FFF	SLM	FFF	SLM
Volume dos provetes	11,710 cm ³	6,778 cm ³	-	
Volume do suporte	11,723 cm ³	-	(Raise3D, IdeaMaker, 2024c)	-
Densidade da matéria-prima	4,666 g/cm ³	4,500 g/cm ³	Em contacto com o fornecedor do material → Foward AM	(AM Printing, 2025)
Massa de POM por peça	1,460 g	-	-	
Dimensão da mesa de impressão	255x300 mm	300x400 mm	(Raise3D, 2023)	Em contacto com o → CENTIMFE
Número de peças por lote	1 a 12	1 a 168	Combinar a dimensão de impressão das peças, com folga, e a dimensão da mesa de impressão.	
Tempo de impressão por peça	4,322 h	0,833 h	(Raise3D, IdeaMaker, 2024c)	Em contacto com o → CENTIMFE
Preço da matéria-prima	0 a 10 kg → 468,27 €/kg 10 a 50 kg → 444,86 €/kg 50 a 100 kg → 398,03 €/kg >100 kg → 374,62 €/kg	30 €/kg	(COTU, 2025a)	Em contacto com o → CENTIMFE
Preço do POM	0 a 10 kg → 131,89 €/kg 10 a 50 kg → 124,30 €/kg 50 a 100 kg → 112,11 €/kg >100 kg → 105,51 €/kg	-	(COTU, 2025b)	-
Preço de venda do <i>scrap</i>	-	0,1 €/kg	-	(Remédios, 2021)
Preço do equipamento	10 000 €	800 000 €	(Filament2Print, 2025)	(Sequeira, 2019)
Potência do equipamento	0,6 kW	4 kW	(Raise3D, 2023)	Em contacto com o → CENTIMFE
Preço da eletricidade	0,09718 €/kWh		(REN - Redes Energéticas Nacionais, 2025)	
Preço de manutenção (percentagem do preço anual do equipamento)	Fator de uso < 50% → 5% Fator de uso > 50% → $\frac{\% \text{Fator de uso}}{10} \%$		(Sæterbø & Solvang, 2023) + ajuste do custo de manutenção de acordo com a intensidade de uso do equipamento.	
Expectativa de vida do equipamento	5 anos	10 anos	(Sæterbø & Solvang, 2023) + (Hernandez Korner, et al., 2024)	(Sequeira, 2019)
Ordenado do operador	9,03 €/h		(Talent.com, 2025) (salário bruto anual de 14 040 €) + encargos sociais (23,75% do salário bruto) + custos indiretos (10% do salário bruto)	
Tempo do operador por impressão	0,33 h	1 h	(Sartini, Bianchi, Vita, Germani, & Mandolini, 2024) + (Hernandez Korner, et al., 2024) + (Sæterbø & Solvang, 2023)	(Sequeira, 2019)
Preço do bocal de extrusão	20 € a cada 200 h (estimativa)	-	(Raise3D, 2025)	-
Preço da cola	41 € a cada 1000 h (estimativa)	-	(Magigoo, 2025)	-
Quantidade de argónio utilizado	-	3 L/min	-	Em contacto com o → CENTIMFE
Preço do argónio	-	0,018 €/L	-	(BOC, 2025)
D&S	230 € por 2kg ou por <i>shelf</i> (300x200 mm)	-	(Forward AM, 2024e)	-
Arranque da máquina	-	116 € (requer o uso de 5000 L de gás inerte)	-	Em contacto com o → CENTIMFE
Preço da separação de peças	-	0,536 €/cm ²	-	Em contacto com o → CENTIMFE
Número de dias de trabalho disponíveis ao ano	260 dias → 6240 h ao ano		-	

Anexo D – Resultados experimentais

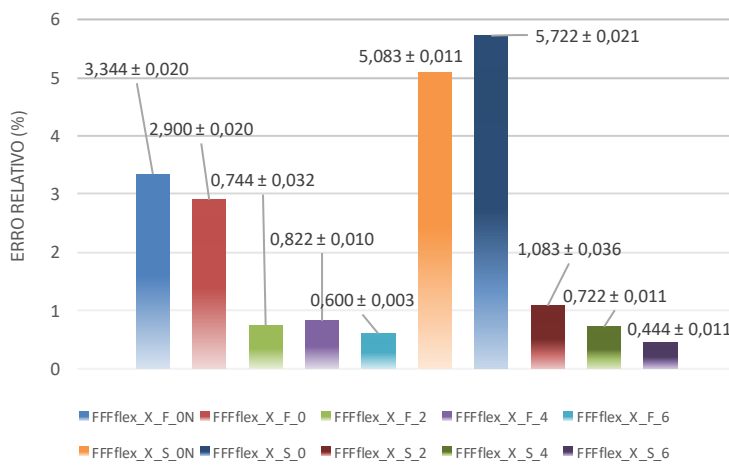
PROVETES DE FLEXÃO - DIREÇÃO X
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



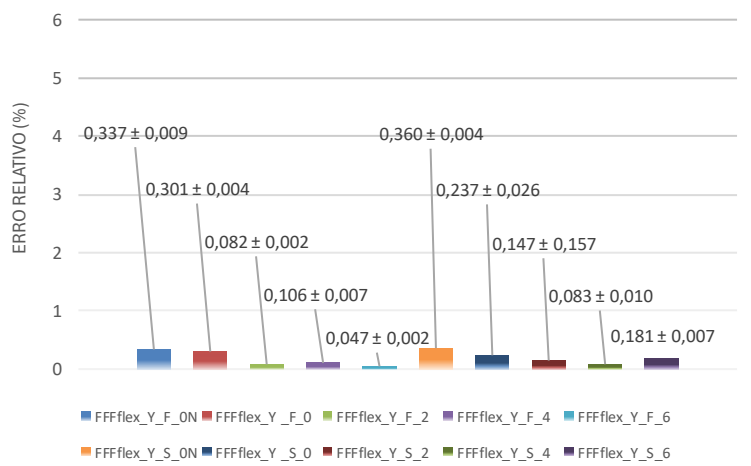
PROVETES DE FLEXÃO - DIREÇÃO X
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



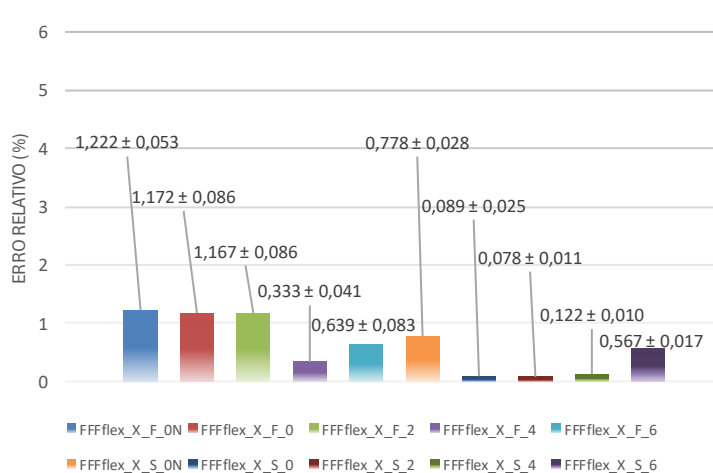
PROVETES DE FLEXÃO - DIREÇÃO Y
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



PROVETES DE FLEXÃO - DIREÇÃO Y
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



PROVETES DE FLEXÃO - DIREÇÃO Z
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



PROVETES DE FLEXÃO - DIREÇÃO Z
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN

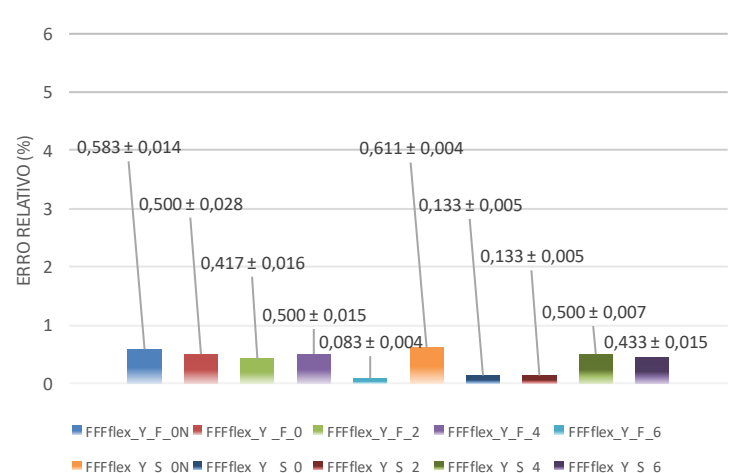


Figura D.1: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo para impressão e os provetes de flexão verdes.

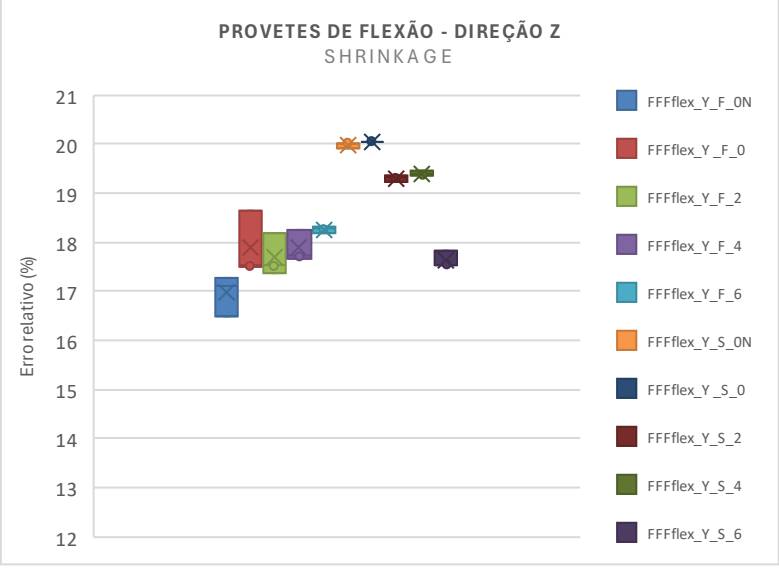
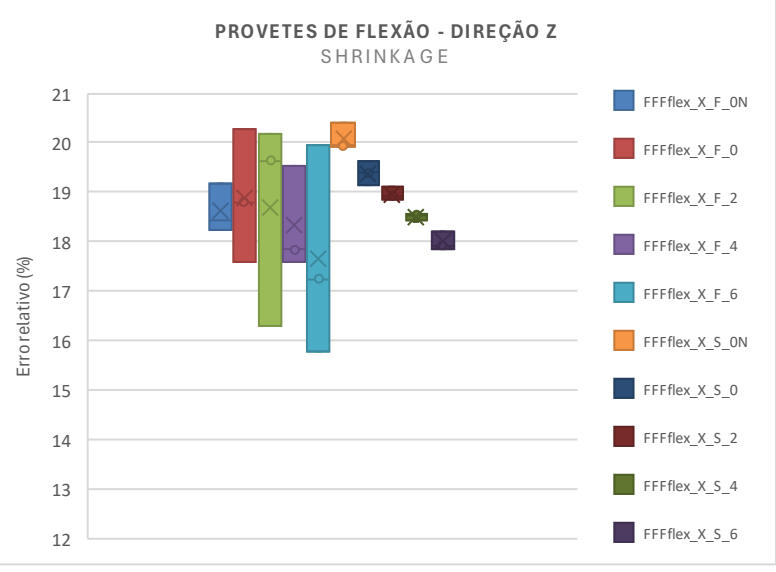
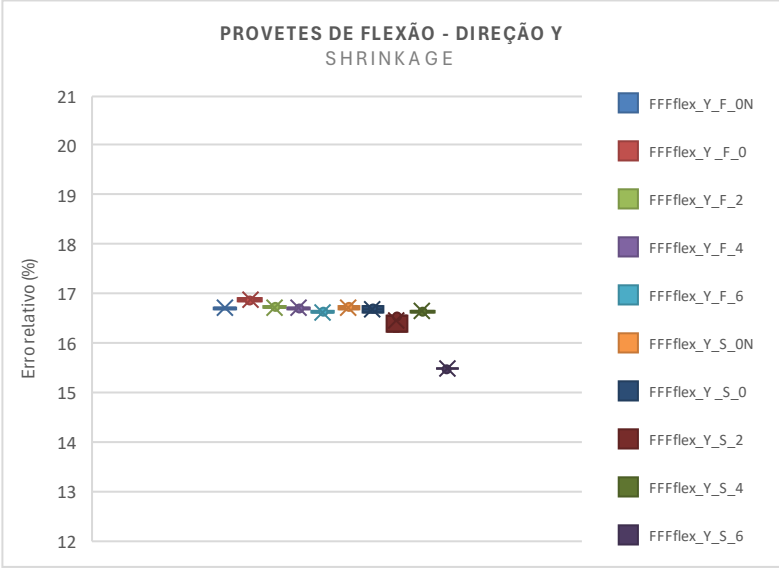
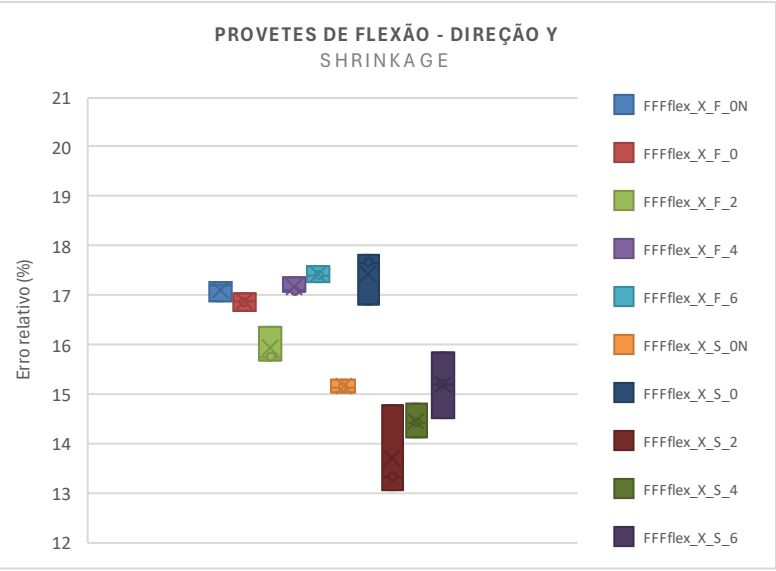
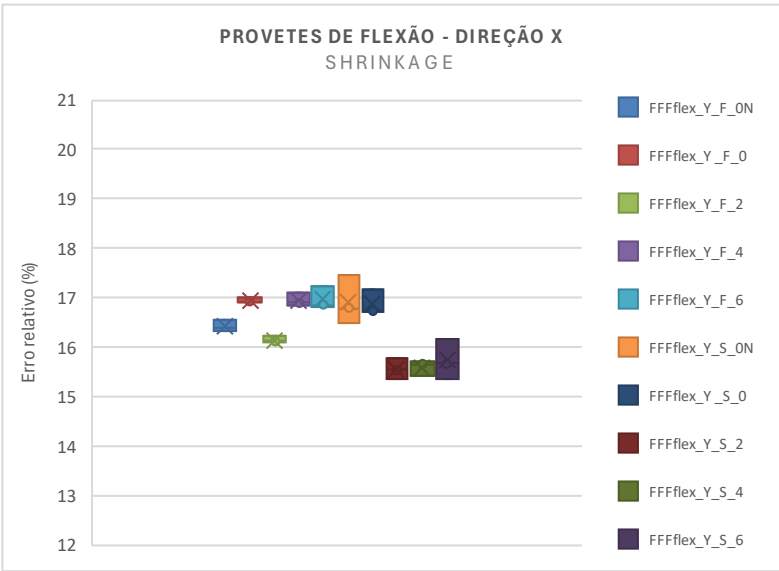
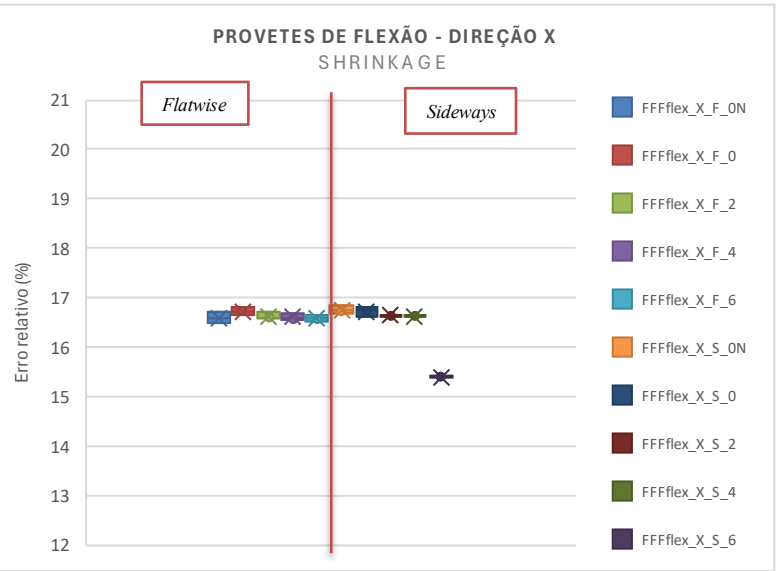
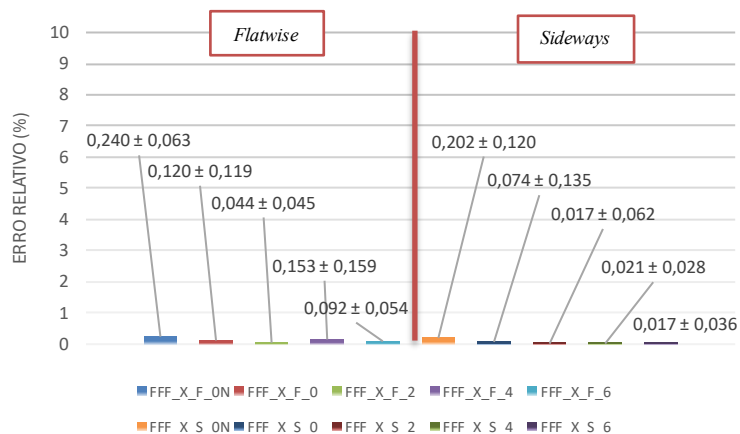
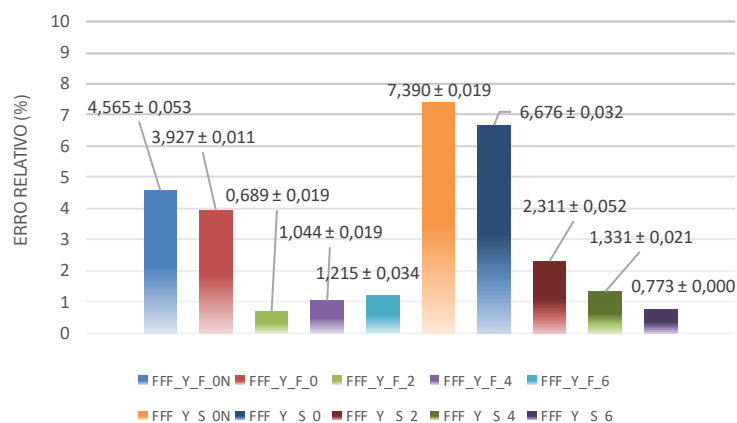


Figura D.2: Erro relativo percentual entre as dimensões dos provetes de flexão verdes e brancos.

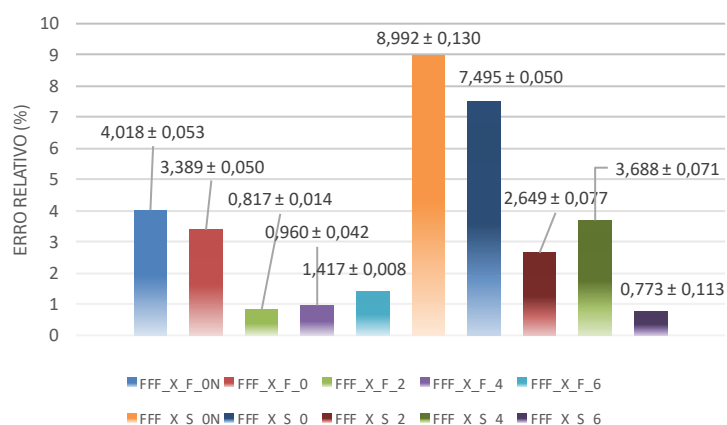
PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO X
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



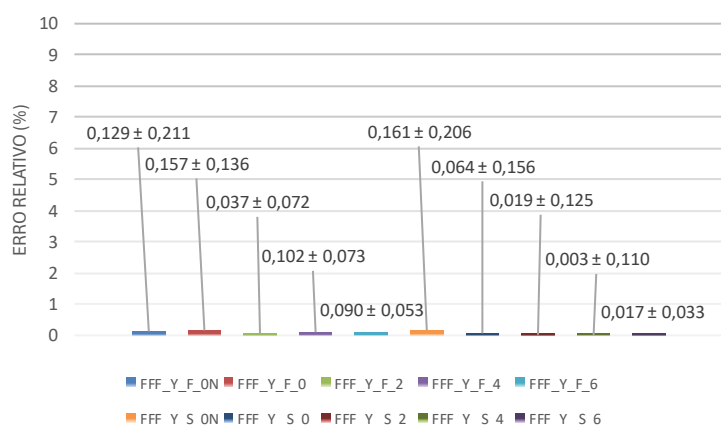
PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO X
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



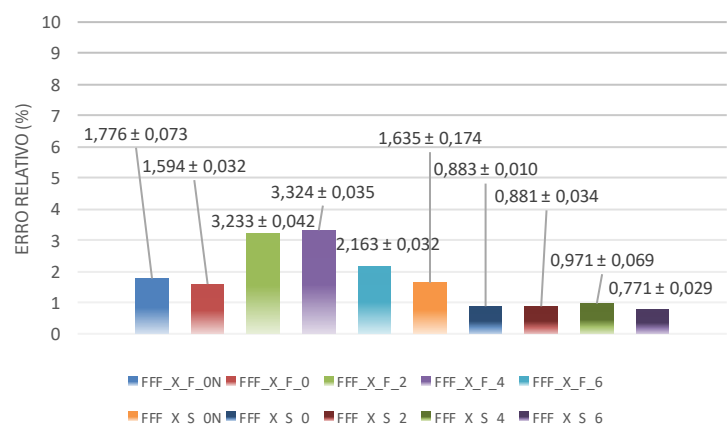
PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO Y
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO Y
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO Z
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN



PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO Z
IMPRESSÃO (DESIGN+SCALING) VS. GREEN

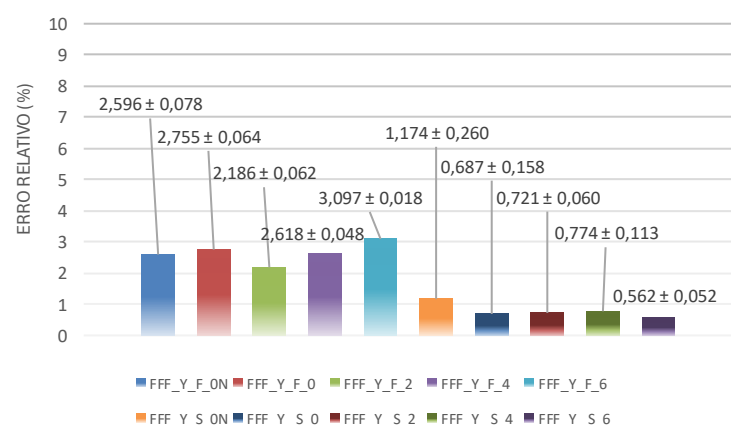
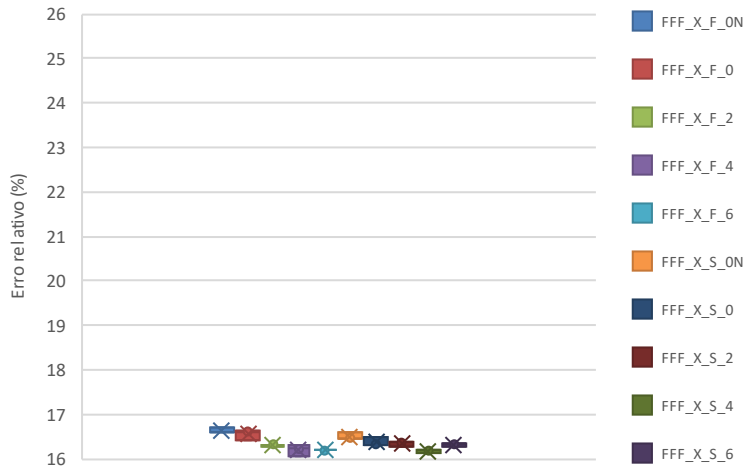
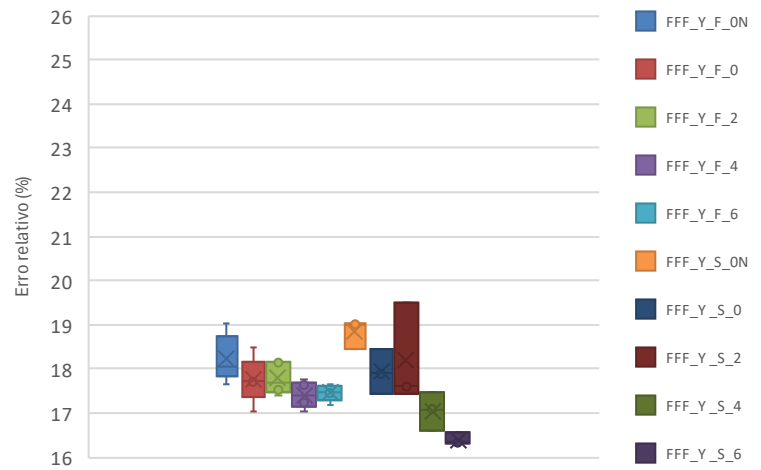


Figura D.3: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo para impressão e os provetes de tração verdes.

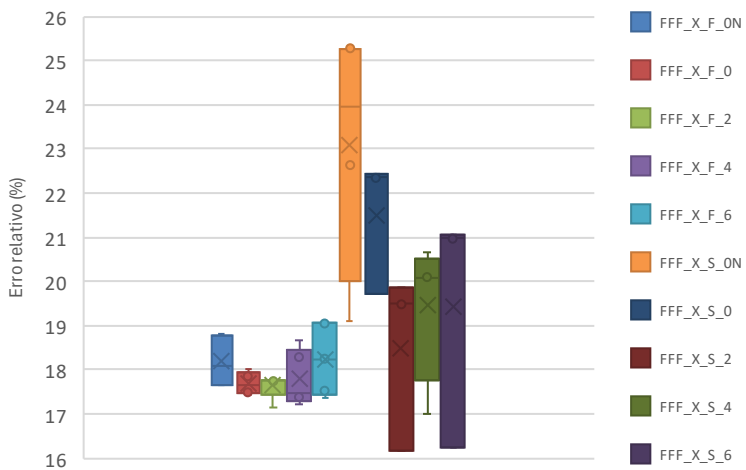
PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO X
SHRINKAGE



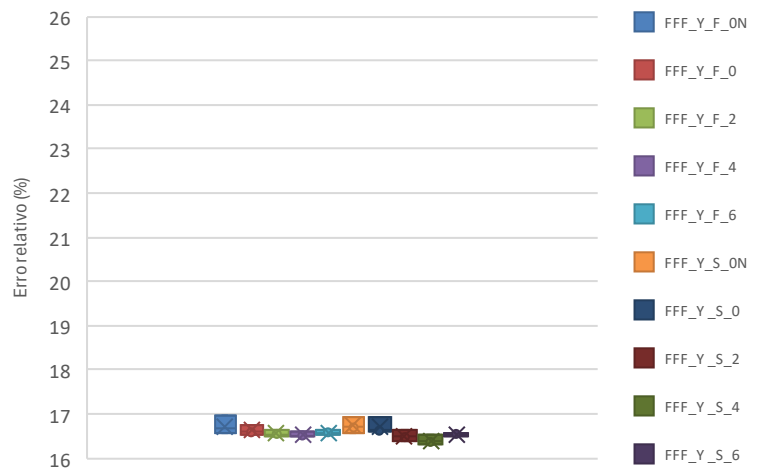
PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO X
SHRINKAGE



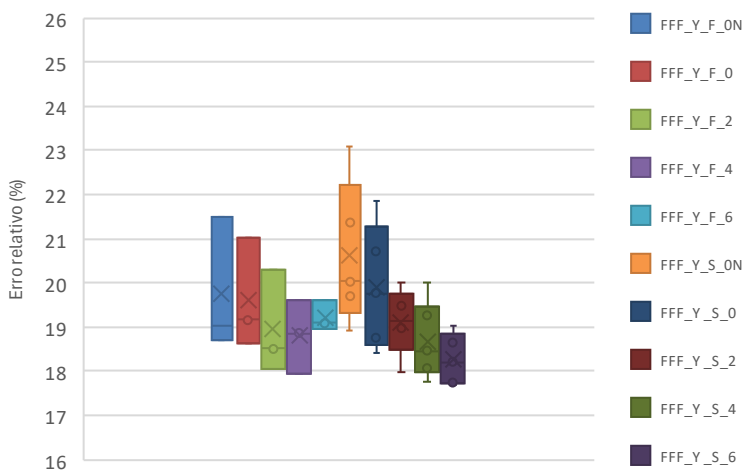
PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO Y
SHRINKAGE



PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO Y
SHRINKAGE



PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO Z
SHRINKAGE



PROVETES DE TRAÇÃO - DIREÇÃO Z
SHRINKAGE

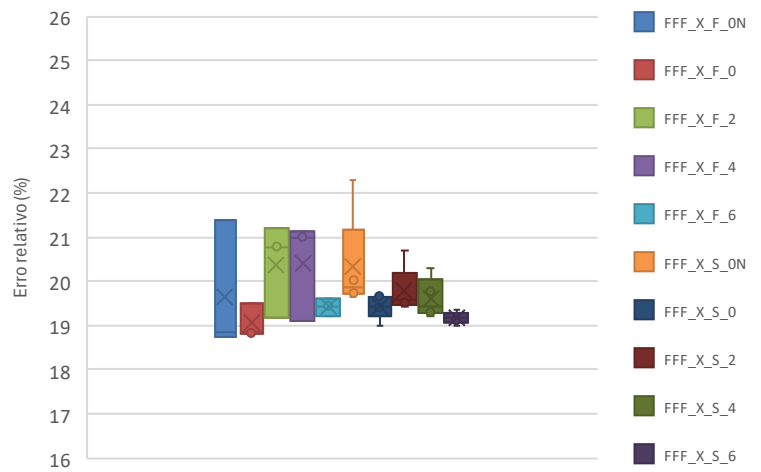


Figura D.4: Erro relativo percentual entre as dimensões dos provetes de tração verdes e brancos.

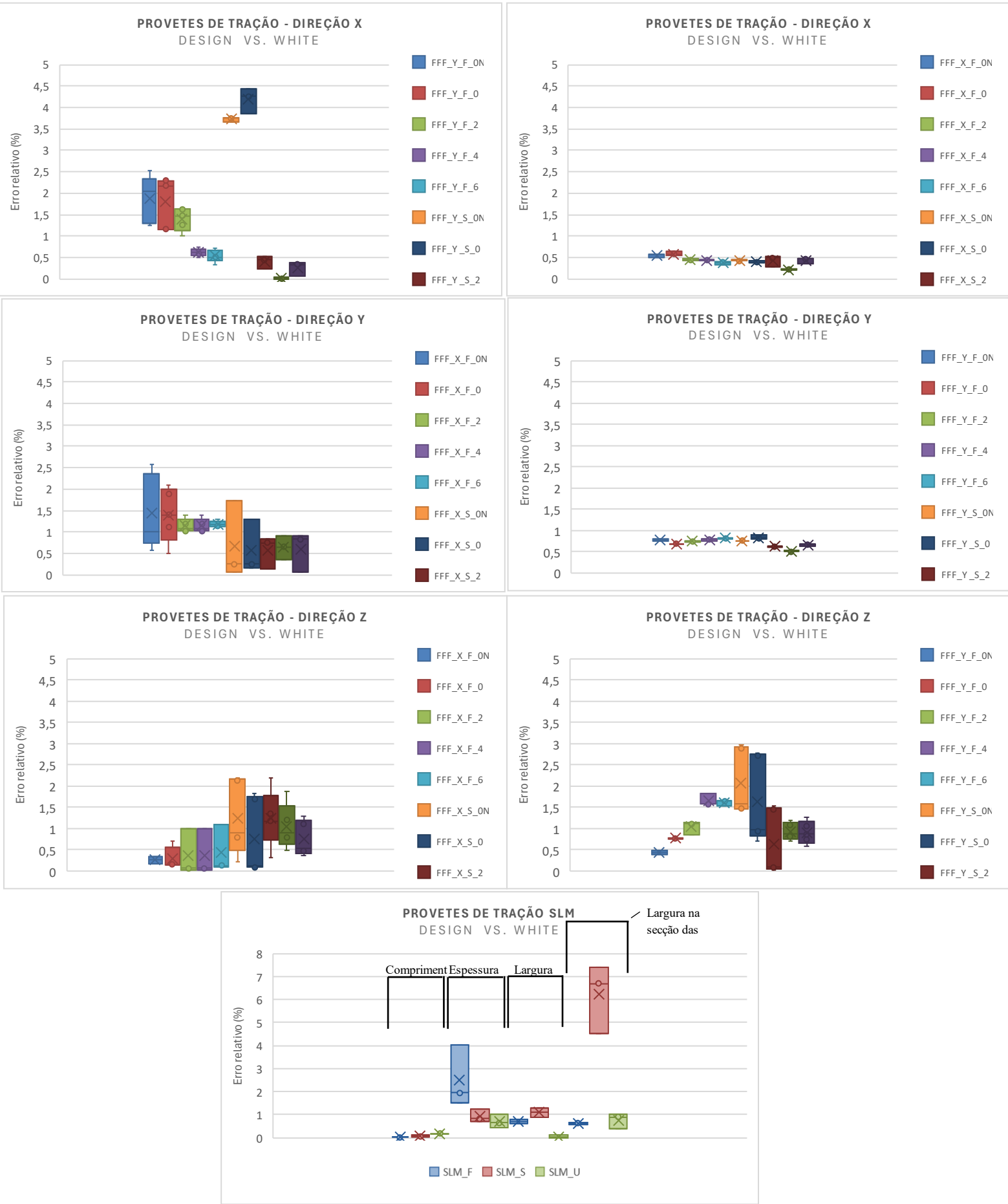


Figura D.5: Erro relativo percentual entre as dimensões do modelo 3D e dos provetes de tração brancos.

Tabela D.6: Rugosidade superficial dos provetes cúbicos analisados (parte 2).

Variáveis	SLM				FFF			
	Topo		Lateral		Topo		Lateral	
	1 (μm)	2 (μm)	1 (μm)	2 (μm)	1 (μm)	2 (μm)	1 (μm)	2 (μm)
Raiz Quadrada da Média dos Quadrados (Rq ou RMS)	8,39	7,83	4,51	4,56	8,36	9,31	5,19	5,36
Rugosidade Total (Rz)	29,00	27,41	17,83	17,24	28,90	33,94	20,41	26,90
Rugosidade Total de Jones (Rzj)	22,68	17,27	-	12,53	26,65	29,98	14,44	16,50
Perfil de Altura de Pico (Rp)	15,50	15,25	-	9,06	15,85	14,94	10,37	14,71
Perfil Médio (Rpm)	15,50	15,25	8,84	9,06	15,85	14,94	10,37	14,71
Rugosidade do Vale (Rv)	13,50	12,16	8,99	8,19	13,05	19,00	10,03	12,20
Perfil de Altura do Pico (RpK)	9,87	8,60	4,70	6,33	10,18	2,43	5,18	5,04
Altura do Pico (Rk)	16,39	21,95	10,98	10,06	21,08	29,68	12,66	12,79
Rugosidade do Vale do Pico (Rvk)	15,03	13,62	5,06	5,53	7,56	7,59	5,44	6,10

Tabela D.7: Valores médios das propriedades de tração dos provetes FFF impressos na horizontal (deitados) e na direção X para diferentes quantidades de camadas externas.

	Valores Médios				
	FFF_X_F_0N	FFF_X_F_0	FFF_X_F_2	FFF_X_F_4	FFF_X_F_6
Tensão limite de elasticidade (MPa)	87,986	91,469	140,643	148,940	159,869
Tensão de Rotura (MPa)	242,680	254,529	444,338	467,165	494,265
Módulo de Young (GPa)	106,535	105,904	178,675	167,500	206,827
Alongamento à fratura (%)	20,458	20,867	46,728	50,183	55,074
Anisotropia (R)	2,149	0,880	0,875	0,764	0,897
Coefficiente de resistência mecânica (K)	483,267	505,983	878,953	900,730	987,240
Coefficiente de encruamento (n)	0,329	0,332	0,373	0,375	0,378

Tabela D.8: Valores médios das propriedades de tração dos provetes FFF impressos de lado e na direção X para diferentes quantidades de camadas externas.

	Valores Médios				
	FFF_X_S_0N	FFF_X_S_0	FFF_X_S_2	FFF_X_S_4	FFF_X_S_6
Tensão limite de elasticidade (MPa)	79,394	88,205	155,388	164,380	161,027
Tensão de Rotura (MPa)	211,988	240,653	446,796	506,303	448,600
Módulo de Young (GPa)	82,260	91,667	171,431	180,181	177,041
Alongamento à fratura (%)	16,843	17,792	30,382	64,420	27,722
Anisotropia (R)	-0,377	0,492	0,848	0,991	0,904
Coefficiente de resistência mecânica (K)	427,983	488,077	864,070	1014,067	871,235
Coefficiente de encruamento (n)	0,321	0,331	0,345	0,384	0,342

Tabela D.9: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes FFF impressos de lado e na direção Y para diferentes quantidades de camadas externas.

	Valores Médios				
	FFFflex_Y_S_0N	FFFflex_Y_S_0	FFFflex_Y_S_2	FFFflex_Y_S_4	FFFflex_Y_S_6
Tensão limite de elasticidade (MPa)	83,116	82,540	143,963	152,993	136,086
Módulo de Young (GPa)	13,090	13,527	21,721	21,244	21,685
Coefficiente de resistência mecânica (K)	804,607	710,743	1455,733	1364,533	1359,567
Coefficiente de encruamento (n)	0,494	0,455	0,541	0,513	0,523

Tabela D.10: Valores médios das propriedades de flexão dos provetes FFF impressos na horizontal (deitados) e na direção Y para diferentes quantidades de camadas externas.

	Valores Médios				
	FFFflex_Y_F_0N	FFFflex_Y_F_0	FFFflex_Y_F_2	FFFflex_Y_F_4	FFFflex_Y_F_6
Tensão limite de elasticidade (MPa)	72,181	79,338	109,064	118,082	133,314
Módulo de Young (GPa)	9,141	10,341	16,598	17,015	19,718
Coefficiente de resistência mecânica (K)	811,823	908,153	1226,900	1258,000	1280,900
Coefficiente de encruamento (n)	0,567	0,564	0,558	0,547	0,533

Tabela D.11: Número de peças por lote → Variação do custo por peça produzida por SLM.

Lote	Mão de obra (por peça)	Arranque (por peça)	Custo por peça
12	0,75 €	9,67 €	260,24 €
24	0,38 €	4,83 €	255,03 €
36	0,25 €	3,22 €	253,30 €
48	0,19 €	2,42 €	252,43 €
60	0,15 €	1,93 €	251,91 €
70	0,13 €	1,66 €	251,61 €
72	0,13 €	1,61 €	251,56 €
84	0,11 €	1,38 €	251,31 €
96	0,09 €	1,21 €	251,13 €
108	0,08 €	1,07 €	250,98 €
120	0,08 €	0,97 €	250,87 €
132	0,07 €	0,88 €	250,77 €
144	0,06 €	0,81 €	250,69 €
156	0,06 €	0,74 €	250,63 €
168	0,05 €	0,69 €	250,57 €

Tabela D.12: Preço do equipamento → Variação do custo por peça produzida por SLM.

Preço de compra do equipamento	Equipamento (por peça)	Custo por peça
800 000,00 €	240,32 €	251,61 €
750 000,00 €	225,32 €	236,61 €
700 000,00 €	210,32 €	221,61 €
650 000,00 €	195,32 €	206,61 €
600 000,00 €	180,32 €	191,61 €
550 000,00 €	165,32 €	176,61 €
500 000,00 €	150,32 €	161,61 €
450 000,00 €	135,32 €	146,61 €
400 000,00 €	120,32 €	131,61 €
350 000,00 €	105,32 €	116,61 €
300 000,00 €	90,32 €	101,61 €
250 000,00 €	75,32 €	86,61 €
200 000,00 €	60,32 €	71,61 €

Tabela D.13: Produção anual → Variação do custo por peça produzida por FFF.

Produção anual	Material (por peça)	Equipamento (por peça)	Mão de obra (por peça)	Consumíveis (por peça)	D&S (por peça)	Custo por peça
100	48,83 €	25,25 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	89,67 €
200	48,83 €	12,75 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	77,17 €
300	48,83 €	8,59 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	73,00 €
400	48,83 €	6,50 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	70,92 €
500	43,71 €	5,25 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	64,55 €
600	43,71 €	4,42 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	63,71 €
700	43,71 €	3,82 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	63,12 €
800	43,71 €	3,44 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	62,74 €
900	43,71 €	3,17 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	62,46 €
1000	41,15 €	2,94 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	59,68 €
1100	41,15 €	2,76 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	59,50 €
1200	41,15 €	2,61 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	59,35 €
1300	41,15 €	2,48 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	59,22 €
1400	41,15 €	2,37 €	0,60 €	0,61 €	14,38 €	59,11 €

Tabela D.14: Produção anual → Variação do custo por peça produzida por SLM.

Produção anual	Material (por peça)	Equipamento (por peça)	Mão de obra (por peça)	Consumíveis (por peça)	Arranque (por peça)	Corte (por peça)	Custo por peça
298	0,99 €	403,01 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	414,29 €
596	0,99 €	201,67 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	212,95 €
894	0,99 €	134,55 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	145,84 €
1192	0,99 €	101,00 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	112,28 €
1490	0,99 €	80,86 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	92,15 €
1788	0,99 €	67,44 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	78,72 €
2086	0,99 €	57,85 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	69,14 €
2384	0,99 €	50,66 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	61,95 €
2682	0,99 €	45,07 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	56,35 €
2980	0,99 €	40,59 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	51,88 €
3278	0,99 €	36,93 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	48,22 €
3576	0,99 €	33,88 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	45,17 €
3874	0,99 €	31,66 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	42,94 €
4172	0,99 €	30,18 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	41,47 €
4470	0,99 €	28,90 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	40,19 €
4768	0,99 €	27,79 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	39,07 €
5066	0,99 €	26,80 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	38,09 €
5364	0,99 €	25,92 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	37,21 €
5662	0,99 €	25,14 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	36,42 €
5960	0,99 €	24,43 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	35,72 €
6258	0,99 €	23,79 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	35,08 €
6556	0,99 €	23,21 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	34,50 €
6854	0,99 €	22,68 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	33,97 €
7152	0,99 €	22,19 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	33,48 €
7450	0,99 €	21,75 €	0,13 €	2,70 €	5,81 €	1,66 €	33,03 €