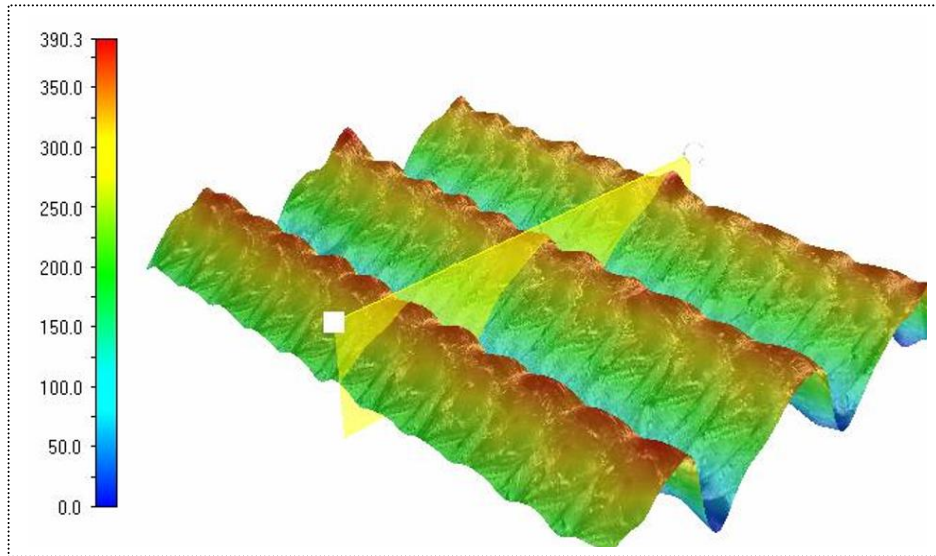




ISEL



Análise das condições de deposição na produção de componentes híbridos por impressão 3D

MARCELO KENDRICK DE PAIVA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão
Doutor Pedro Lúcio Maia Marques de Almeida
Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho

Vogais:

Doutor Miguel Ângelo Reis Pereira
Doutor Pedro Lúcio Maia Marques de Almeida

Dezembro de 2025

Análise das condições de deposição na produção de componentes híbridos por impressão 3D

MARCELO KENDRICK DE PAIVA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão, ISEL/IPL
Doutor Pedro Lúcio Maia Marques de Almeida, ISEL/IPL
Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão, UC

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor Miguel Ângelo Reis Pereira, UC
Doutor Pedro Lúcio Maia Marques de Almeida, ISEL/IPL

Agradecimentos

A realização deste trabalho contou com o apoio, incentivo e colaboração de muitas pessoas, às quais sou profundamente grato.

Em primeiro lugar, agradeço imensamente aos meus orientadores, Professor Ivan Galvão, por toda a sua orientação precisa, paciência, incentivo constante e valiosa contribuição durante o trabalho, ao Professor Pedro Marques Almeida, por sua orientação, contribuição e esclarecimentos precisos ao longo do trabalho, como também ao Professor Carlos Leitão por sua colaboração e toda ajuda. Sou profundamente grato à Professora Ana Teresa Abreu e ao Professor Rui Leal por sua ajuda, auxiliando-me em todas as etapas do trabalho.

Aos meus familiares, agradeço a paciência, compreensão e apoio incondicional em todos os momentos.

Agradeço a todos os professores do ISEL, com os quais tive imenso prazer em aprender, e que contribuíram significativamente para que eu chegasse até aqui, através dos seus ensinamentos e orientações. Agradeço também ao Instituto Politécnico de Lisboa por todo o apoio prestado sempre que precisei. Um agradecimento também à UnIRE, ao CEMMPRE e ao CENIMAT pela disponibilização de recursos necessários para o trabalho experimental.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

.....

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mas declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

Marcelo Kendrick de Paiva



Lisboa, 19 de dezembro de 2025

“Que ninguém se engane, só se consegue a simplicidade através de muito trabalho”.

Clarice Lispector

Análise das condições de deposição na produção de componentes híbridos por impressão 3D

Resumo

O desenvolvimento de juntas híbridas entre metais e polímeros tem ganhado destaque em aplicações estruturais leves, especialmente nas indústrias automotiva e aeroespacial. Esse tema é de grande importância, pois, com o surgimento de novas técnicas de ligação entre materiais, como soldadura por fricção e união mecânica, a união híbrida de materiais distintos possibilita a criação de novos materiais que combinam as características e qualidades de cada um, resultando em componentes cada vez mais leves, resistentes e confiáveis.

O objetivo deste trabalho destinou-se a analisar as condições de deposição na produção de componentes híbridos (metal-polímero) por modelação por deposição fundida (FDM). Em particular, foi estudada a ligação de chapa de alumínio (Al) a Ácido Polilático (PLA) impresso.

Por forma a estudar as condições de adesão na interface metal-polímero, foram testadas diferentes condições topográficas dos componentes de Al. Sobre estas superfícies foram depositadas, por prensagem a quente, películas poliméricas, que funcionarão como camadas intermédias facilitadoras da deposição de material polimérico por FDM, para se avaliar e comparar a resistência da adesão entre os materiais sob essas diferentes preparações superficiais. Foram produzidas amostras em três condições distintas, sem preparação, com lixamento, e com texturização superficial. A caracterização morfológica foi realizada por microscopia óptica e microscopia digital, se analisando as condições de deposição do material polimérico na topografia da placa de Al.

Os resultados mostraram que a texturização superficial melhorou as condições de adesão da junta, em comparação com as demais condições de preparação do substrato de Al, sugerindo uma melhor ancoragem mecânica da junta.

A preparação da superfície do Al demonstrou ser um fator crucial para a eficiência da junta híbrida Al/PLA, revelando a importância de se realizar um controlo topográfico neste tipo de aplicação para o fabrico aditivo pelo método de FDM.

Palavras-chave: Fabrico aditivo, Modelação por deposição fundida, peças multimaterial, metal/polímero

Analysis of deposition conditions in the production of hybrid components by 3D printing

Abstract

The development of hybrid joints between metals and polymers has gained prominence in lightweight structural applications, especially in the automotive and aerospace industries. This topic is of great importance because, with the emergence of new techniques for joining materials, such as friction welding and mechanical joining, the hybrid joining of different materials enables the creation of new materials that combine the characteristics and qualities of each, resulting in increasingly lighter, stronger, and more reliable components.

The objective of this work was to analyze the deposition conditions in the production of hybrid (metal-polymer) components by Fused Deposition Modeling (FDM). In particular, the bonding of aluminum (Al) sheet to printed Polylactic Acid (PLA) was studied.

In order to study the adhesion conditions at the metal-polymer interface, different topographical conditions of the Al components were tested. Polymer films were deposited on these surfaces by hot pressing, which will act as intermediate layers facilitating the deposition of polymeric material by FDM, in order to evaluate and compare the adhesion strength between the materials under these different surface preparations. Samples were produced under three different conditions: without preparation, with sanding, and with surface texturing. Morphological characterization was performed by optical microscopy and digital microscopy, analyzing the conditions of polymer material deposition on the topography of the Al plate.

The results showed that surface texturing improved the adhesion conditions of the joint, compared to the other Al substrate preparation conditions, suggesting better mechanical anchoring of the joint.

Al surface preparation proved to be a crucial factor for the efficiency of the Al/PLA hybrid joint, revealing the importance of performing topographic control in this type of application for Additive Manufacturing using the FDM method.

Keywords: Additive manufacturing, Fused deposition modeling, Multimaterial parts, Metal/polymer

Lista de Símbolos e de siglas

Siglas

3D	Três dimensões
<i>AddJoining</i>	Fabricação aditiva de estruturas híbridas metal-polímero
AM	<i>Additive Manufacturing</i> (manufatura aditiva)
ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (sociedade americana para testes e materiais)
BJ	<i>Blinder Jet</i> (jateamento de ligante)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (desenho assistido por computador)
CC	Contornos
CJP	<i>Total Joint Penetration</i> (penetração total da articulação)
CLIP	<i>Continuous Liquid Interface Production</i> (produção contínua de interface líquida)
DED	<i>Direct Energy Deposition</i> (deposição direta de energia)
DMD	<i>Digital Micromirror Devices</i> (deposição direta de metal)
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i> (sinterização direta a laser de metal)
FA	Fabrico aditivo
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (modelação por deposição fundida)
FS	Fabrico subtrativo
HIPS	Poliestireno de alto impacto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (organização internacional de normalização)
LENS	<i>Laser Engineered Net Shopping</i> (modelação de rede projetada a laser)
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (manufatura de objetos laminados)
Lx	Amostra com lixamento
MABS	Metacrilato de metila-acrilonitrila-butadienoestireno
MJ	<i>Material Jetting</i> (jateamento de material)
MJP	<i>MultiJet Print</i> (impressão multiJet)
Ni-Cr	Nickel Chrome
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PEEK	Poliéter éter cetona
PET	Polietileno Tereftalato
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
PLA	Ácido polilático

PMC Compósito de matriz polimérica
SDL *Selective Deposition Lamination* (laminação por deposição seletiva)
SL/SLA *Stereolithography* (estereolitografia)
SLA-1 *Stereolithography Apparatus* (aparelho de estereolitografia)
SLM *Selective Laser Melting* (fusão seletiva a laser)
SLS *Selective Laser Sintering* (sinterização seletiva a laser)
Sp Amostra sem preparação
T0,1 Amostras com texturas de 0,1 mm
T0,2 Amostras com texturas de 0,2 mm
TPC *Thermoplastic Polyester* (poliéster termoplástico)

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	3
2	ESTADO DA ARTE	5
2.1	FABRICO ADITIVO	5
2.2	ETAPAS	6
2.3	HISTÓRIA	6
2.4	MÉTODOS E CLASSIFICAÇÃO E MATERIAIS DO FA	8
2.4.1	<i>Classificação quanto a sólidos</i>	11
2.4.2	<i>Classificação quanto a líquidos</i>	13
2.4.3	<i>Classificação quanto a pó</i>	14
2.5	MATERIAIS	16
2.6	MODELAÇÃO POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA (FDM)	18
2.6.1	<i>Parâmetros do processo</i>	19
2.6.2	<i>Métodos FDM baseados em Multimateriais</i>	25
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
3.1	MATERIAIS	30
3.2	PREPARAÇÃO TOPOGRÁFICA	31
3.3	DEPOSIÇÃO DA PELÍCULA INTERMÉDIA POR Prensagem a quente	32
3.4	PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS METAL-POLÍMERO POR IMPRESSÃO 3D	34
3.5	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS AMOSTRAS METAL-POLÍMERO	38
3.5.1	<i>Caracterização topográfica</i>	38
3.5.2	<i>Inspeção visual</i>	39
3.5.3	<i>Caracterização morfológica</i>	39
3.5.4	<i>Caracterização mecânica</i>	39
4	RESULTADOS	42
4.1	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS SUPERFÍCIES DE DEPOSIÇÃO	42
4.2	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS SUPERFÍCIES COM PELÍCULA	46
4.3	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA COM A DEPOSIÇÃO DO PLA	46
4.4	ENSAIOS DE TRAÇÃO/CORTE	50
5	CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO	54
5.1	CONCLUSÕES	54
5.2	TRABALHO FUTURO	55

Índice de Figuras

Figura 2.1. Setores de aplicação do FA, adaptado de (Vafadar et al. 2021).....	6
Figura 2.2. Modelo tridimensional de mapas topográfica, adaptado de (Volpato, 2017).....	7
Figura 2.3. Molde feito com a técnica de adição de camadas de DiMatteo (Volpato, 2017).	7
Figura 2.4. Classificação do FA quanto a sólido, líquido e pó, adaptado de (Coutinho, 2024).	8
Figura 2.5. Método de FDM <i>AddJoining</i> : (a) Placa de Al presa a plataforma, (b) Deposição de polímero, (c) Deposição das camadas subsequentes, adaptado de (Falck et al. 2018).	12
Figura 2.6. Diagrama esquemático do processo LOM, adaptado de (Elhadad et al. 2023).	13
Figura 2.7. Jateamento de ligante, adaptado de (Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris, 2015).....	14
Figura 2.8. Representação do processo DED, adaptado de (Elhadad et al. 2023).....	15
Figura 2.9. Fusão a laser, adaptado de (Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris, 2015).	15
Figura 2.10. PLA para impressão 3D: (a) No formato de filamento, (b) Em pellets (<i>filament2print</i> , 2025).....	17
Figura 2.11. Garrafas fabricadas com PE (<i>Plastics Today</i> , 2024).	18
Figura 2.12. Etapas do FDM, adaptado de (Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris, 2015).	19
Figura 2.13. Diminuição da a) resistência e b) porosidade, devido ao aumento da velocidade (Kamer et al. 2022).....	21
Figura 2.14. Efeito do parâmetro Temperatura (Ozlati et al. 2019).	22
Figura 2.15. Disposição do polímero depositado em diferentes diâmetros de bocal (Czyżewski, 2022).....	22
Figura 2.16. Módulo de elasticidade e resistência a tração a um ângulo de 90°, com diferentes espessuras da camada (Shashikumar e Sreekanth, 2023).	23
Figura 2.17. Padrão geométrico cilíndrico, para otimizar a ancoragem e união da junta (Ozlati et al. 2019).	24
Figura 2.18. Presença de vazios entre as camadas dos polímeros (Falk et al. 2018).	25
Figura 2.19. Comparativo da tensão de corte aparente de juntas híbridas Al/polímero, (Ozlati et al. 2019).....	26
Figura 2.20. Otimização da geometria do pino, (Abreu et al. 2024).	27
Figura 2.21. Análise de raio X superficial do polímero, evidenciando a presença de Al e MG, adaptado de (Alhmodi et al. 2023).	28
Figura 3.1. Filamento PLA Galaxy Silver (Prusa Research, 2025).	30
Figura 3.2. Preparações topográficas das amostras: sem preparação Sp, (b) por lixamento Lx.....	31
Figura 3.3. Preparação topográfica das amostras com texturas: (a) Visão geral amostra T0,1, (b) Visão geral amostra T0,2, (c) Visão ampliada amostra T0,2.	32
Figura 3.4. Texturização da superfície do Al com utilização de uma ponta de gravação de carboneto (Pereira et al. 2025).....	32
Figura 3.5. (a) Prensa hidráulica para conformação da película PLA, processo <i>Hot press</i> , (b) Pellets de PLA (<i>Filament2Print</i> , 2025).	33

Figura 3.6. Amostras com película na placa Sp e Lx: (a), (c) menor ampliação; (b), (d) maior ampliação.	34
Figura 3.7. Amostras texturizadas com película: (a) Amostra T0,1; (b) Amostra T0,2.	34
Figura 3.8. Impressora Prusa (Prusa Research, 2025).	35
Figura 3.9. Equipamentos de impressão: (a) Estufa de secagem Sunlu FilaDryer S4, (Sunlu, 2025): (b) Filamento através do condúite.....	35
Figura 3.10. Provetes para o teste de Tração/corte.....	37
Figura 3.11. Preparação da amostra na impressora: (a) Impressão da guia, (b) Fixação da amostra e deposição do PLA.	38
Figura 3.12 – Microscópio digital Hirox HRX-01 3D.	39
Figura 3.13. Fixação da amostra T0,1 para os testes de tração (Shimadzu AGS-X, 2025).	40
Figura 4.1. Aspeto da preparação superficial dos substratos de Al: (a) Amostra Sp, (b) Amostra Lx (c), Amostras T0,1, e (d) T0,2.	43
Figura 4.2. Aspeto do substrato de Al de uma amostra Lx (a) Imagens em 3D da dimensão dos picos (b) Curva de quantificação (valores em μm).	43
Figura 4.3. Aspeto de substrato de Al T0,1: (a) Imagens em 3D da dimensão dos picos (b) Curva de quantificação (valores em μm).	44
Figura 4.4. Aspeto de substrato de Al T0,2: Imagens em 3D da dimensão dos picos (b) Curva de quantificação (valores em μm).	45
Figura 4.5. Vista da secção transversal das amostras: (a) T0,1, (b) T0,2.	45
Figura 4.6. Morfologia das amostras com a deposição da película: (a) Sp, (b) Lx, (c) T0,1, (d) T0,2.	46
Figura 4.7. Falha de adesão interfacial das amostras; (a), (b), (c) Amostras Sp,(d) Lx, (e) T0,1 (f) T0,2.....	47
Figura 4.8. Comparativo entre as amostras com e sem preparação superficial: (a) Lx, sem evidência de falha, (b) Sp, (c) T0,1, (d) T0,2, ambos com levantamentos da película.	48
Figura 4.9. Falhas de adesão. (a) Amostra Sp, <i>Gap</i> interfacial, (b) Amostra Lx, <i>Gap</i> , (c) Amostra T0,1, descontinuidade, (d) Amostra To,2, levantamento da película.....	48
Figura 4.10. Curva força/deslocamento	50
Figura 4.11. Amostra T0,1, submetida ao teste de tração.	51
Figura 4.12. Mapas de deformação dos provetes de tração/corte, obtidos por correlação de imagens digitais.	51

Índice de tabelas

Tabela 2.1. Classificação do FA, adaptado de (Volpato, 2017)	10
Tabela 2.2. Parâmetros de impressão FDM (Argyros et al. 2023)	27
Tabela 3.1. Propriedades químicas do Al AA5754 (% pond.), (Hausöl et al. 2010)	30
Tabela 3.2. Geometria e número total de amostras por condições distintas.....	36
Tabela 3.3. Parâmetros de impressão	37

1 Introdução

Com o desenvolvimento da sociedade, surgiu a necessidade de criar e aperfeiçoar técnicas de união de materiais que pudessem satisfazer as exigências da humanidade ao longo dos anos. Tornou-se necessário desenvolver uniões que facilitassem a adaptação dos produtos às necessidades do mundo atual e da indústria em geral, tornando-os mais robustos, leves e fiáveis. Com o tempo, surgiram técnicas de produção mais avançadas e, com cada inovação, verificou-se uma tendência para o aprimoramento contínuo, trazendo melhorias e soluções para as fragilidades das tecnologias existentes na junção de materiais.

Nos tempos remotos, o uso de materiais como madeira e pedra, associado a técnicas de produção rudimentares e ferramentas básicas, era uma prática comum. No entanto, ao longo dos séculos, essas técnicas evoluíram significativamente. Desde o fabrico subtrativo (FS) até aos dias de hoje, com o fabrico aditivo (FA), ou *Additive Manufacturing* (AM), termo mais comumente utilizado na língua inglesa, tem-se assistido a um avanço notável nos métodos de fabrico, que se reflete no desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações industriais. o FA é considerado uma das tecnologias mais inovadoras, prometendo revolucionar o conceito de produção e fabrico de peças e objetos.

Neste contexto, o desenvolvimento tecnológico ocorreu devido à necessidade de produzir materiais mais avançados e fiáveis. Esta evolução surgiu naturalmente, impulsionada pela importância de componentes com melhor desempenho, como na indústria automóvel, onde se procuram materiais mais leves e deformáveis que, em caso de acidente, possam absorver parte da energia do impacto, minimizando os danos aos ocupantes do veículo.

O mesmo princípio aplica-se à indústria aeronáutica, onde a utilização de componentes mais leves permite reduzir o consumo de combustível, enquanto materiais mais rígidos e resistentes podem ser obtidos através da união de materiais dissimilares, criando compósitos com propriedades melhoradas. É neste segmento que o FA se destaca, sendo uma tecnologia recente que oferece inúmeros benefícios, tais como: flexibilidade no *design*, permitindo maior liberdade na conceção de peças; personalização em

massa, possibilitando a produção de componentes à medida das necessidades específicas do cliente; minimização da produção de resíduos, uma vez que praticamente todo o material utilizado no fabrico é aproveitado, além da possibilidade de fabricação rápida de estruturas complexas (prototipagem rápida), eliminando a necessidade de múltiplas etapas de produção.

Assim, a união de metais e polímeros apresenta-se como uma solução promissora para a manufatura de novos materiais. Através do conhecimento das propriedades de cada um, é possível potenciar as suas qualidades ou compensar as suas limitações, criando materiais híbridos mais eficientes e adaptáveis às exigências industriais. Entre as qualidades e limitações, os polímeros são materiais que apresentam boa capacidade de deformação, no entanto não suportam temperaturas elevadas. Em contraste, os metais são altamente resistentes e capazes de suportar altas temperaturas. O desenvolvimento de técnicas para a união de materiais distintos permitiu, ao longo da história, a criação de produtos mais eficientes em diversos setores. Contudo, a combinação desses materiais apresenta desafios consideráveis, especialmente no que se refere às suas propriedades químicas, metalúrgicas e térmicas, conforme atestado por Rajendran et al. (2023), em que a temperatura constitui uma barreira importante para materiais que necessitam de resistir a temperaturas maiores.

Neste contexto, o FA surge como uma solução promissora para a produção de materiais compósitos à base de metal, proporcionando uniões mais resistentes e uma maior tolerância a variações térmicas. A sua aplicação pode representar um avanço significativo na criação de estruturas inovadoras e altamente funcionais para a indústria. O grande desafio atual passa por investigar tecnologias que permitam uma junta eficaz entre estes dois materiais, de modo a tirar partido das suas propriedades distintas. Existem estudos e técnicas para a união destes materiais, como mecanismos mecânicos (aparafusamento e rebtagem), métodos de soldadura com o uso de adesivos de alto desempenho, entre outros. Cada técnica apresenta vantagens e desvantagens, os adesivos necessitam de uma boa adesão entre as partes a fim de serem eficazes, enquanto o aparafusamento exige uma boa fixação. A incorporação de polímeros com metais, Rajendran et al. (2023), resultou numa melhoria significativa das propriedades mecânicas dos materiais. Não há dúvidas de que o aperfeiçoamento destes materiais continuará a evoluir; no entanto, a escassez de estudos nesta área e a necessidade de investigação mais aprofundada evidenciam que ainda existe um vasto campo por explorar.

Portanto, o grande desafio reside na compreensão e no desenvolvimento de soluções que possibilitem a otimização e o aperfeiçoamento desses processos de ligação, de modo a tirar o máximo proveito das vantagens oferecidas pela união entre metais e polímeros.

1.1 Objetivos

A união de metais a materiais compósitos é tradicionalmente obtida através de juntas coladas ou rebitadas. Com o natural desenvolvimento tecnológico, têm surgido técnicas cuja utilização para esse efeito começa a ser ponderada. A modelação por deposição fundida (FDM, *Fused Deposition Modeling*), é uma técnica de fabrico aditivo que começa a destacar-se na produção de ligações permanentes, de forma eficiente e sem desperdício, através da promoção de ancoragem mecânica entre os materiais envolvidos. Porém, não raras vezes, ocorrem problemas na deposição do material, sobretudo quando se procura ligar materiais de natureza distinta. Neste sentido, o presente trabalho final de mestrado destinou-se a analisar as condições de deposição na produção de componentes híbridos (metal-polímero) por impressão 3D. Por forma a estudar as condições de adesão na interface metal-polímero, foram testadas diferentes condições topográficas dos componentes metálicos. Sobre estas superfícies foram depositadas, pelo processo de prensagem a quente (*hot press*), películas poliméricas, que funcionaram como camadas intermédias facilitadoras da deposição de material polimérico por impressão 3D.

1.2 Estrutura do documento

A estrutura deste documento está subdividida da seguinte forma: O capítulo 1, correspondente à Introdução, apresenta uma visão geral do trabalho, incluindo seus objetivos e motivações. Em seguida, no capítulo 2, Estado da Arte, desenvolve o estudo por meio de uma revisão crítica baseada na literatura científica sobre o tema, abordando os principais processos envolvidos, os métodos, os materiais do processo e os equipamentos. O capítulo 3 descreve o procedimento experimental, detalhando a metodologia aplicada, desde a preparação das amostras, calibração da impressora e introdução dos parâmetros, até a aplicação do ácido polilático (PLA) sobre o substrato de Al. As caracterizações morfológicas e mecânicas das amostras, incluindo as análises visuais a olho nu e por meio de microscopia óptica e digital, bem como os testes de tração e corte, foram apresentadas no Capítulo 4. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões referentes aos resultados, além de sugestões para trabalhos futuros que possam expandir e aprimorar o tema abordado.

2 Estado da arte

2.1 Fabrico aditivo

O FA, considerado um dos elementos fundamentais da indústria do futuro, é uma solução industrial que permite a produção de peças complexas de metal ou polímero e com a qual é possível obter um elevado nível de precisão e qualidade. Segundo a Sociedade Americana para Testes e Materiais (*ASTM, American Society for Testing and Materials*), a técnica é definida como um processo de unir materiais para criar objetos a partir de dados de modelos 3D, camada sobre camada, em oposição às metodologias de FS. Para Ragendram et al. (2023), a produção de materiais à base de polímeros através do FA, melhora as suas propriedades e expande as suas aplicações para vários sectores. Fibras naturais, como a lã ou o linho, e fibras vegetais, têm sido utilizadas como substitutos das fibras artificiais no FA. Este processo permite a criação de formas complexas com um desperdício reduzido de material e de tempo, sendo assim tido como uma tecnologia limpa, por não haver sobras de materiais ou desperdícios. Kharat et al. (2023), relatam que todo material empregado é utilizado na medida necessária para a construção da peça conforme é depositada camada a camada, minimizando os resíduos. No FS, é preciso desbastar a peça para se atingir a sua forma desejada, como uma certa perda de material, modificando, em alguns casos, suas propriedades originais. Barry e Berman 2011, dizem que no FA não há remoção ou perda de material por maquinagem, conforme na FS, pois todo o material é depositado de acordo com a sua necessidade, reduzindo os resíduos em 40%, e a reciclagem do material desperdiçado girando em torno 95 a 98 %.

A técnica não se limita apenas a protótipos, mas em peças em pequena escala, porque oferece produtos econômicos, mais fortes e mais leves, *designs* flexíveis, economia de materiais e produção rápida, entre outras vantagens. A Figura 2.1, ilustra uma ampla gama de aplicações em setores como indústria automobilística, aeroespacial, máquinas industriais, eletrônica, ciências médicas, defesa, instituições acadêmicas, arquitetura, entre outras como indústrias de aviação (Vafadar et al. 2021).

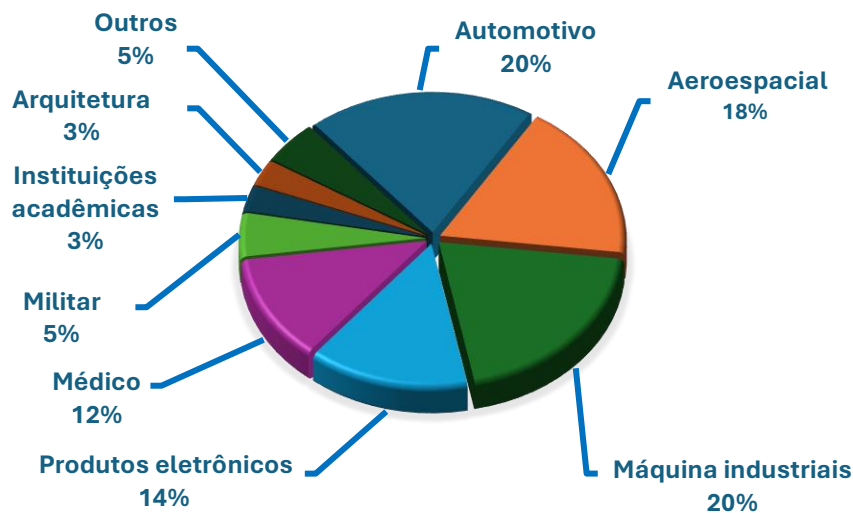


Figura 2.1. Setores de aplicação do FA, adaptado de (Vafadar et al. 2021).

Segundo (Gibson, 2015). No processo há adição sucessiva de material sobre camadas, através de uma impressora, com informações da peça obtidas através de um software Desenho Assistido por Computador (*CAD, Computer Aided Design*), sendo possível formar-se diversos tipos de componentes, com diferentes materiais, formas e dimensões. O processo é totalmente automatizado e rápido. De acordo com Barry e Berman (2011), as impressoras 3D usam software CAD 3D que dimensiona a secção transversal de cada produto para determinar a exata construção das camadas.

2.2 Etapas

O desenvolvimento do modelo, a impressão e o acabamento, são as três etapas principais durante o fabrico da peça. Inicialmente, se dá por um modelo 3D, em que a peça é fatiada eletronicamente em “curvas de nível 2D”, camada a camada e, através desse empilhamento, geram a forma final (Rakesh, 2022). Por ser automatizado, a intervenção do operador é pequena, a não ser para a inserção do material na impressora 3D, a introdução dos parâmetros no CAD, e ao final da operação, com a retirada e a limpeza da peça, caso necessário. Devido às características do processo, consegue-se formar geometrias complexas, uma vez que transforma uma geometria 3D em uma sequência de camadas 2D, mais simples (Volpato, 2017).

2.3 História

Esta tecnologia atual, surgiu após Charles Hull desenvolver a estereolitografia (SLA/SL, *Stereolithography*) em 1986 e, desde então, surgiram novas variantes como fusão em leito de pó, modelação por deposição fundida, (FDM, *Fused Deposition Modeling*), impressão a jato de tinta e criação de contornos (CC). Com o tempo, a impressão 3D

expandiu-se com novas variantes e métodos, materiais e equipamentos, alterando significativamente a dinâmica da produção e distribuição de peças de forma radical, (Kharat et al. 2023). Este conceito de construção por meio de camadas sucessivas não é novo, remontando a construções antigas como a construção das pirâmides do Egito, pela sobreposição dos blocos de pedras. Outro exemplo é na área da topografia, em que Blantner (Volpato, 2017) idealizou o método de construção de moldes para mapas de relevo topográfico em três dimensões, através da construção de discos sobrepostos por camadas, formando um contorno topográfico (curvas de nível), das cartas topográficas, reproduzindo assim uma superfície tridimensional, conforme Figura 2.2.

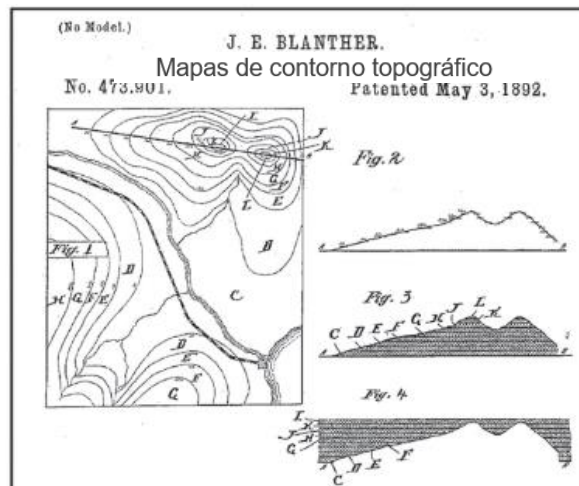


Figura 2.2. Modelo tridimensional de mapas topográfica, adaptado de (Volpato, 2017).

Matsubara, da Mitsubishi Motors, propôs um método de construção a partir de uma resina fotopolimerizável, coberta com partículas refratárias (pó de grafite ou areia) e curada pela emissão de uma fonte luz de lâmpada de vapor de mercúrio, provocando seu endurecimento. As camadas eram sobrepostas sequencialmente, constituindo-se um molde de fundição. Posteriormente em 1974, DiMatteo observou a importância da técnica na construção de superfícies complexas, conforme Figura 2.3 (Volpato 2017).

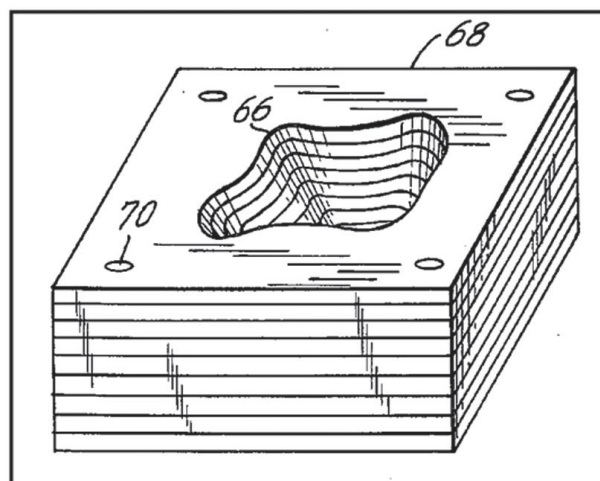


Figura 2.3. Molde feito com a técnica de adição de camadas de DiMatteo (Volpato, 2017).

Em 1982, na área de fotopolimerização, Herbert da empresa 3M, propôs o novo sistema *Ultraviolet (UV)*, em que de o laser polimerizava uma camada de polímero fotossensível por meio de um sistema de prismas em um *plotter X-Y*, onde um computador comandava os movimentos do feixe de laser no plano X-Y. Após a polimerização da camada, esta era baixada aproximadamente em 1 mm, e nova quantidade de polímero líquido era adicionada para a construção da próxima camada. Os trabalhos de pesquisas, técnicas e processos desenvolvidos para a foto escultura e para a topografia deram origem às atuais técnicas do FA. Todavia, passaram a ser empregadas de forma mais intensa após o aparecimento de equipamentos comerciais, sendo o primeiro denominado aparelho de estereolitografia (SLA-1, *Stereolithography Apparatus*), apresentado pela empresa americana 3D Systems em 1987, (Volpato, 2017).

2.4 Métodos e classificação e materiais do FA

Durante o desenvolvimento da tecnologia do FA, foram utilizados termos e definições diferentes, ligados a áreas de aplicação e até marcas comerciais, dificultando a comunicação e uma aplicação maior da tecnologia. De forma a se padronizar a nomenclatura, com uma só classificação aos setores ligados à área a nível mundial, acadêmico, da indústria e pesquisas, foi implementada a norma organização internacional de normalização (ISO, *International Organization for Standardization*)/ASTM 52900:2021 (Fabrico aditivo, princípios gerais e Terminologias). Os métodos e a classificação empregado, tem relação com o estado da matéria-prima aplicada. A norma propõe um enquadramento em sete categorias principais, divididas em três grupos de estados do material. Na Figura 2.4, pode-se ver a classificação quanto ao estado da matéria em sólido, líquido ou pó.

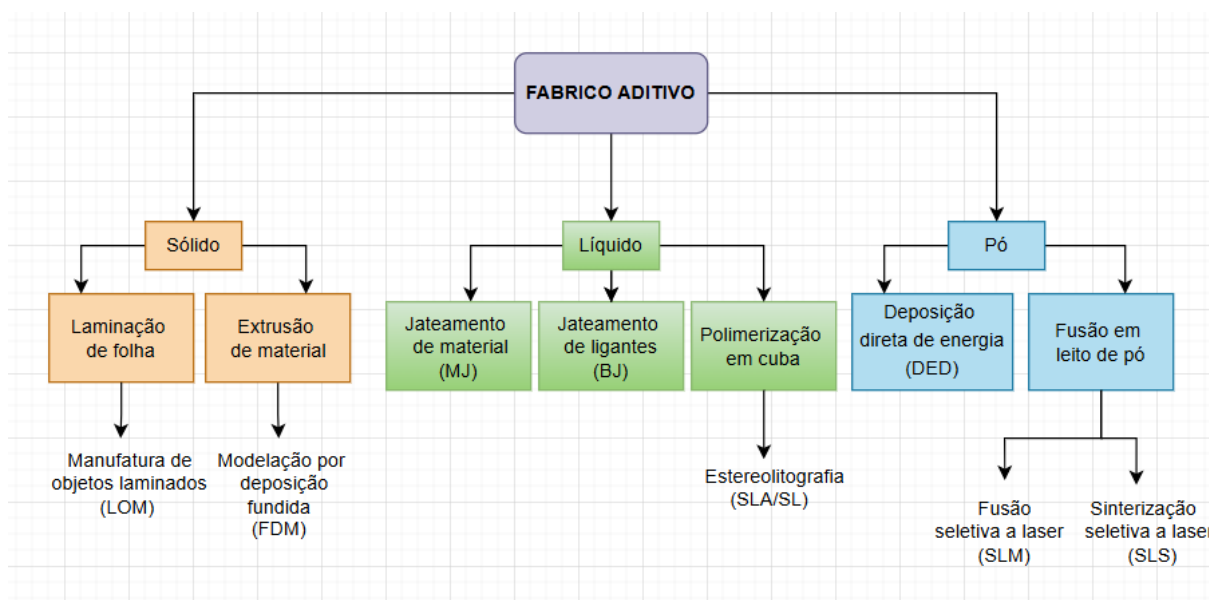


Figura 2.4. Classificação do FA quanto a sólido, líquido e pó, adaptado de (Coutinho, 2024).

Na Tabela 2.1, são representadas as classificações da norma ISO/ASTM , com a descrição resumida dos princípios de cada processo, dividido em 7 grupos e as tecnologias por cada categoria do FA aplicada (Volpato, 2017).

Na adição de lâminas, ou laminação de folhas, há a união de finas folhas metálicas por soldadura a laser ou ultrassônica. Utiliza técnicas como manufatura de objetos laminados, (LOM, *Laminated Object Manufacturing*) e laminação por deposição seletiva (SDL, *Selective Deposition Lamination*). Na extrusão de material, tecnologia do FA por FDM, o material utilizado é um polímero, extrudido por um bocal injetor, patenteada pela empresa *Stratasys* (Memarzadeh et al. 2023). No jateamento de material (MJ, *Material Jet*), o produto é depositado em gotas, com técnica impressão multiJet (*MJP, MultiJet Print*), enquanto o jateamento de ligante (BJ, *Blinder Jet*) utiliza um produto líquido para aglutinar materiais em pó, através da técnica penetração total da junta (*CJP, Total Joint Penetration*). No processo de foto polimerização em cuba, a norma diz que o polímero é curado por processo de polimerização e dá exemplos de técnicas como estereolitografia (SLA/SL) e produção contínua de interface líquida (*CLIP, Continuous Liquid Interface Production*). A deposição direta de energia (DED, *Direct Energy Deposition*) pode ser alimentada por pó ou por filamento, em que ambos são depositados sobre a peça e um laser funde o material para se atingir a forma desejada, através de técnicas como modelação de rede projetada a laser (*LENS, Laser Engineered Net Shoping*) e deposição direta de metal (*DMD, Digital Micromirror Devices*). E por fim, a fusão do leito de pó utiliza um laser ou feixe de elétrons para fundir o material, dando origem a uma peça específica, através de tecnologias como sinterização seletiva a laser (*SLS, Selective Laser Sintering*), sinterização direta a laser de metal (*DMLS, Direct Metal Laser Sintering*) e fusão seletiva a laser (*SLM, Selective Laser Melting*).

Tabela 2.1. Classificação do FA, adaptado de (Volpato, 2017)

Tecnologia do FA	Descrição dos princípios	Algumas tecnologias na categoria
Fotopolimerização em cuba	Polímero fotossensível líquido curado seletivamente em cuba por polimerização ativada por luz*	Estereolitografia (<i>stereolithography</i> – SL), Produção contínua com interface líquida (<i>continuous liquid interface production</i> - CLIP), tecnologia da empre -sa Invision-TEC, outros
Extrusão de material	Material extrudado por bocal ou orifício, depositado seletivamente	Modelação por fusão e deposição (<i>fused deposition modeling</i> – FDM), MakerBot, RepRap, Fab@Home, outros
Jateamento de material	Material depositado seletiva- mente em pequenas gotas	PolyJet, impressão por múltiplos jatos (<i>MultiJet printing</i> – MJP), tecnologia da Solidscape, outros
Jateamento de aglutinante	Agente aglutinante líquido depositado seletivamente para unir materiais em pó	Impressão colorida por jato (<i>ColorJet Printing</i> – CJP), tecnologia da VoxelJet
Fusão de leito de pó	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó	Sinterização seletiva a laser (<i>selective laser sintering</i> – SLS), Fusão seletiva a laser (<i>selective laser melting</i> – SLM), Sinterização direta de metal a laser (<i>direct metal laser sintering</i> – DMLS), Laser CUSING, Fusão por feixe de elétrons (<i>electron beam melting</i> – EBM), outros
Adição de lâminas	Lâminas recortadas de material são unidas (coladas) para formar um objeto	Manufatura laminar de objetos (<i>laminated object manufacturing</i> – LOM), Tecnologia da Sólido, deposição seletiva de laminados (<i>selective deposition lamination</i> – SDL), outros
Deposição com energia direcionada	Energia térmica funde materiais ao serem depositados	Forma final obtida com laser (<i>laser engineered net shaping</i> – LENS), Deposição direta de metal (<i>direct metal deposition</i> – DMD), Revestimento a laser tridimensional (<i>3D laser cladding</i>), outros

Os métodos do FA surgiram para atender à demanda de impressão por estruturas complexas e resoluções finas e pequenas. O termo conhecido como “prototipagem rápida” refere-se à capacidade de imprimir grandes estruturas, de forma rápida, precisa e econômica, sendo estes um dos principais fatores que impulsionaram o desenvolvimento do FA. O método mais comum é o método FDM, que utiliza filamento de base polimérica como material de deposição (Tuan et al. 2018). Muitos outros materiais vão surgindo para o processo do FA, com melhores qualidades, e com a necessidade de materiais mais leves ou mais resistentes, como compósitos poliméricos, que podem ter seus materiais modificados, melhorados e reforçados e, por meio da mistura destes se obter um outro melhorado (Gajbhiye et al. 2024).

Há várias formas de classificar os processos de FA quanto ao estado da matéria prima usada para a concepção das peças elaboradas, nomeadamente, classificação quanto a sólidos, líquidos e quanto a pó.

2.4.1 Classificação quanto a sólidos

A forma de impressão 3D se dá por um material de filamento sólido, normalmente polímeros, ou misturas destes com materiais com propriedades distintas.

Modelação por deposição fundida (FDM)

É um método do FA, em que há a extrusão do material polimérico na medida e dosagem necessária através de um bocal para a construção de um produto com determinada geometria (Czyżewski et al. 2022). Na extrusão, segundo Memarzadeh et al. (2023), um fio de polímero passa por uma plataforma aquecida para construir a geometria do componente camada a camada, produzindo peças 3D diretamente a partir de um modelo CAD. Os materiais mais empregados são compósitos poliméricos, termoplásticos Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS), ácido polilático (PLA) (Czyżewski et al. 2022).

AddJoining

A técnica baseada na FDM, denominada *AddJoining* (fabricação aditiva de estruturas híbridas metal-polímero), combina os princípios do FA e da união de diferentes materiais, resultando em uma configuração em camadas.

No estudo de Falck et al. (2018), foram utilizados diversos materiais para a construção sucessiva das camadas de reforço, como Al e polímeros sob a forma de filamento de impressão, e também o uso de polímeros com reforço de fibras de carbono. A união em camadas desses materiais permite a formação de uma estrutura híbrida com alta resistência mecânica. Por meio da Figura 2.5a um substrato metálico é fixado em uma

plataforma de construção. Em seguida, o filamento polimérico é fundido por meio da cabeça de extrusão e depositado, formando uma camada sobre o substrato metálico, (Figura 2.5b). As camadas subsequentes são depositadas, na sequência de empilhamento planeada, para os materiais de reforço, como ilustrado na Figura 2.5c.

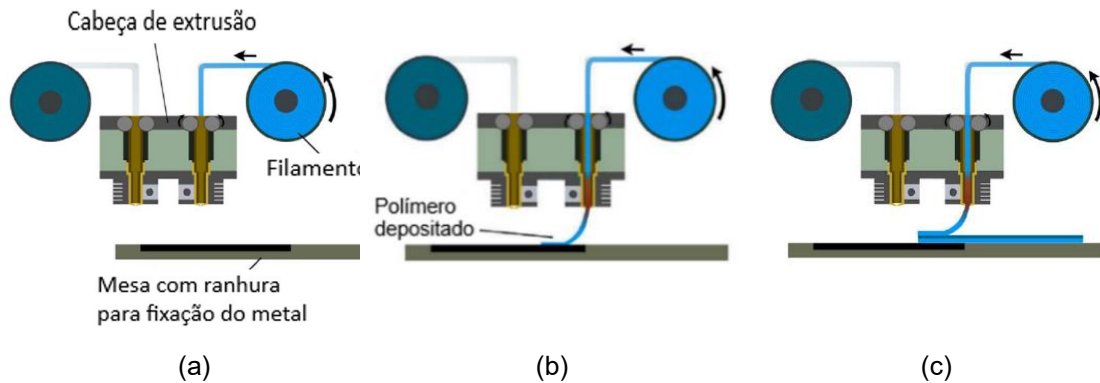


Figura 2.5. Método de FDM *AddJoining*: (a) Placa de Al presa a plataforma, (b) Deposição de polímero, (c) Deposição das camadas subsequentes, adaptado de (Falck et al. 2018).

Fabrico de objetos laminados (LOM)

As lâminas de um material são unidas (coladas) para se formar um objeto. As camadas após feitas, são coladas e cortadas mecanicamente ou a laser, usando-se o calor como método de formação e união de peças. Segundo Elhadad et al. (2023), conforme ilustrado na Figura 2.6, o processo conecta e empilha materiais em folhas camada a camada, e cada camada é colada a de baixo por meio de um adesivo. Após colada é cortada a laser ou faca, de acordo com o projeto, os materiais mais empregados são polímeros, metais, cerâmicos e compósitos poliméricos. Menos eficazes do que as tecnologias de leito de pó e maior tempo a fabricar, pela remoção do laminado adicional após o fabrico. Conforme o material utilizado e o produto elaborado, podem ser necessárias altas temperaturas ou outras etapas (Kharat et al. 2023). Segundo Gajbhiye et al. (2022), um rolo de material epóxi aquecido desce a adere uma folha metálica, sendo em seguida, cortada e unida através de um laser ou cortador mecânico, e o processo é repetido conforme a necessidade.

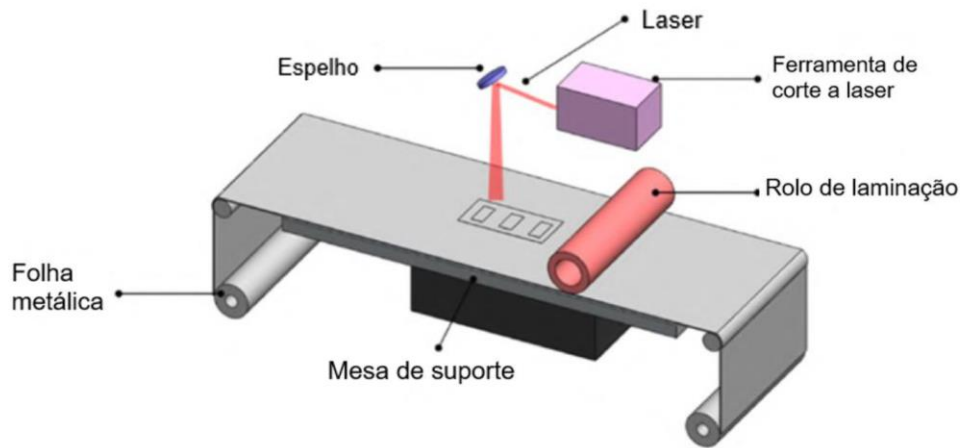


Figura 2.6. Diagrama esquemático do processo LOM, adaptado de (Elhadad et al. 2023).

2.4.2 Classificação quanto a líquidos

O FA é realizado utilizando um material líquido, aplicado sob a forma de gotejamentos ou polímeros no estado líquido.

Jateamento de material (MJ)

O material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva. Usado na construção de estruturas cerâmicos complexas avançadas. Como as tintas de cerâmico têm um alto ponto de fusão, elas funcionam melhor em temperaturas mais baixas e secam mais rápido quando usadas em superfícies de alta qualidade. Os materiais mais empregados são metais, materiais compósitos, e polímeros com resinas termoendurecíveis fotocuráveis (Volpato, 2017). O material constituído de suspensão cerâmica estável, como pó de óxido de zircônio em água, é bombeado e depositado no substrato, na forma de gotículas, através do bocal de injeção, (Tuan et al. 2018).

Polimerização em cuba (VP)

O conceito fundamental é expor um polímero fotossensível líquido a luz UV, que é curado seletivamente em uma cuba por polimerização (foto polimerização), que o torna sólido. De acordo com Kharat et al. (2023), a projeção de luz UV sobre uma camada de resina, altera suas propriedades químicas e a solidifica. Compósitos de cerâmico-polímero podem ser impressos quando partículas de cerâmico são adicionadas a monômeros termináveis (esferas feitas de polímeros), como o oxicarboneto de silício. A velocidade da reação de cura e o tempo de exposição a luz, são parâmetros que afetam a espessura da camada. A técnica usa materiais como polímeros fotocuráveis (Elhadad et al. 2023).

2.4.3 Classificação quanto a pó

Na classificação em pó, os materiais utilizados no FA apresentam-se sob a forma de pó, podendo ser misturados com um agente aglutinante ou fundidos por laser.

Jateamento de ligantes (BJ)

Um agente aglutinante líquido é depositado seletivamente para se unir materiais em pó, (Figura 2.7), com princípio de operação muito semelhante aos processos de fusão a laser, no entanto não ocorre a mudança de fase através da fusão ou sinterização, devido ao ligante manter as partículas de pó unidas. Utiliza bocais finos para "pulverizar", controladamente, o material fundido ou um ligante (adesivo) para unir o pó a um objeto sólido, (Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris, 2015). Os materiais mais empregados são polímeros, cerâmicos, metais ou compósitos (Elhadad et al. 2023).

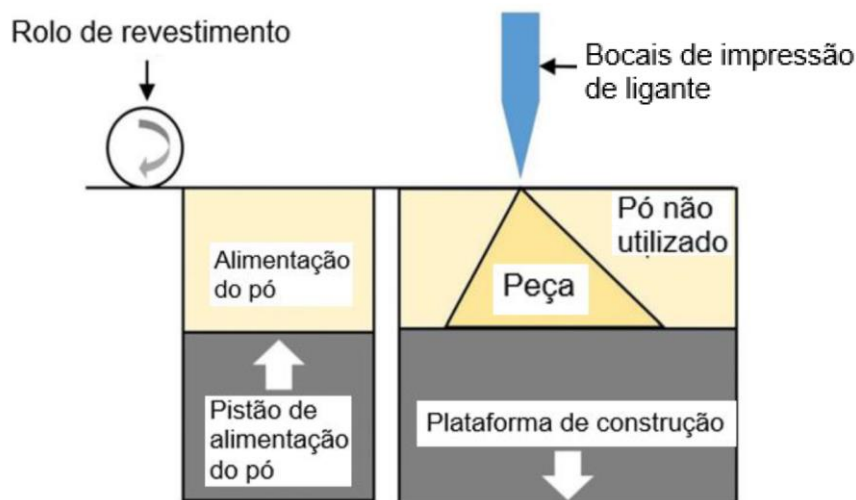


Figura 2.7. Jateamento de ligante, adaptado de (Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris, 2015).

Deposição de energia direcionada (DED)

A energia térmica é utilizada para se fundir os materiais à medida que são depositados. Usada na concepção de superligas de alto desempenho. Um laser ou feixe de elétrons é focado em uma pequena área de substrato, de matéria-prima em pó ou fio, fazendo com que seja fundida. A diferença entre os métodos DED e SLM é que nenhum leito de pó é usado e a matéria-prima é fundida antes da deposição de camada por camada, à semelhança do FDM, mas com uma quantidade muito maior de energia (Tuam, 2018). Conforme é ilustrado na Figura 2.8, uma cabeça de impressão funde o metal na forma de pó ou fio, por um feixe de elétrons ou laser, que é então extrudado e resfriado. O bocal pode se mover em direções ao longo de até cinco eixos separados, em oposição a três para máquinas FDM, o tornando perfeito para manutenção e geração de produtos de maior qualidade. Os materiais mais empregados são compósitos de matriz metálica,

polímeros e cerâmicas; no entanto, é mais frequentemente usada com peças metálicas (Elhadad et al. 2023).

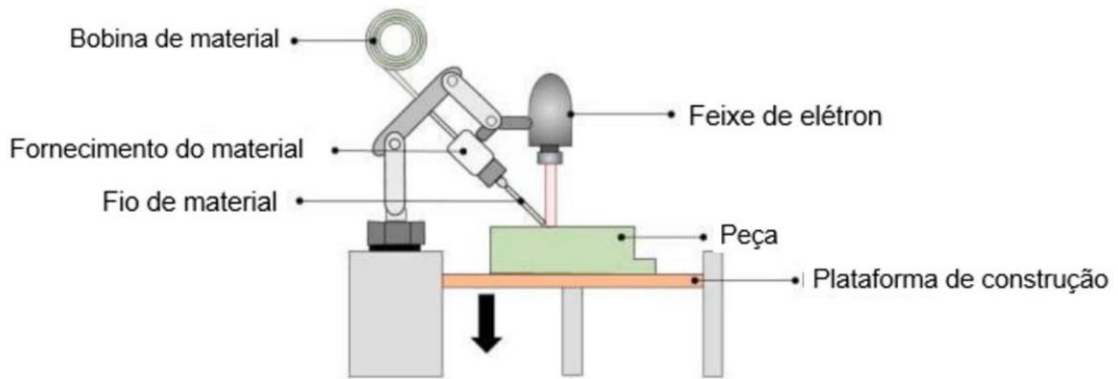


Figura 2.8. Representação do processo DED, adaptado de (Elhadad et al. 2023).

Fusão a laser

O processo consiste na concentração de energia térmica sobre o material, através de um feixe de luz ou de elétrons, com o objetivo de fundir seletivamente o material que se encontra sob a forma de pó fino, ilustrado na Figura 2.9. Utilizados materiais como pós-metálicos, poliamida (PA), compósitos de poliamida, areia, cera e policarbonatos (Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris, 2015). Divide-se em SLS, no qual ocorre apenas a fusão parcial das partículas, promovendo a união das moléculas ao aquecer as suas superfícies a temperaturas muito elevadas (Kharat et al. 2023), e em SLM, onde o laser aquece o material acima do ponto de fusão, aplicado principalmente a certos metais, como o aço e o Al, resultando numa melhor qualidade final da peça, (Tuam et al. 2018).

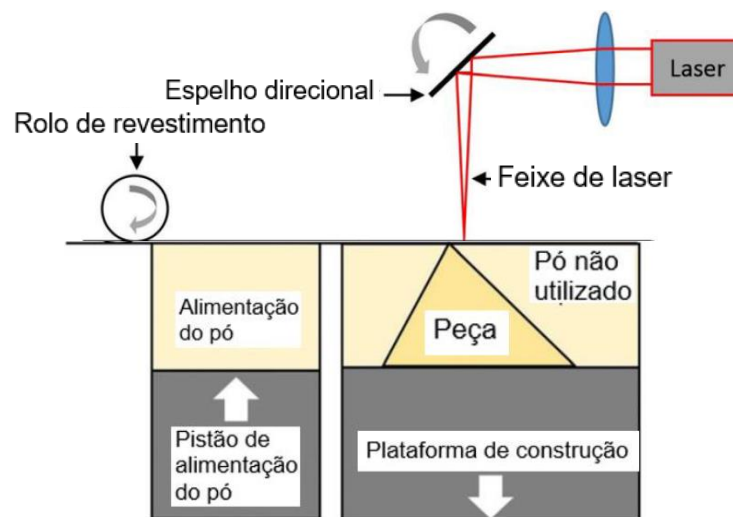


Figura 2.9. Fusão a laser, adaptado de (Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris, 2015).

2.5 Materiais

Nos últimos anos, tem-se adotado a impressão 3D continuamente, devido à redução dos custos das impressoras. A capacidade de criar itens únicos é um enorme benefício do FA, comparado a tecnologias convencionais. O uso de metais, polímeros, cerâmicos e concretos são algumas realidades já possíveis no FA. Bhatia e Sehgal (2023), relatam que há inúmeros materiais no mercado e, para cada tipo há um método específico. Através de um modelo CAD 3D, na prototipagem rápida, com peças sob medida e personalizadas, minimizando desperdícios e possibilitando produção em massa (Kharat et al. 2023).

Polímeros

São os materiais mais comumente usados para impressão 3D por seu baixo custo e boas propriedades mecânicas. Usados em diversos processos de impressão 3D. São classificados como amorfos, com sua estrutura dispersa e não organizada, ou semicristalinos, quando suas macromoléculas possuem parte cristalina e parte amorfa (Bhatia e Sehgal, 2023). Durante o resfriamento dos polímeros semicristalinos, após passar pela temperatura de fusão, ocorre sua cristalização parcial e as cadeias adquirirão, após resfriarem, uma configuração ordenada, alinhando-se, (Callister et al. 2016). Esta característica é benéfica para o uso no FA, pois é esperado que o material aumente sua resistência devido à ordenação das cadeias, conforme constatado por (Abreu et al. 2024). Os mais utilizados no FA são: ABS, PA, poliestireno de alto impacto, (HIPS), tereftalato de polietileno (PET), PLA, policarbonato (PC), tereftalato de polietileno glicol (PETG), poliéter éter cetona (PEEK), poliéster termoplástico (TPC) e metacrilato de metila-acrilonitrila-butadienoestireno (MABS), entre outros materiais poliméricos (Bhatia e Sehgal, 2023).

Ácido polilático (PLA)

É um polímero biodegradável e potencial biocombustível, proveniente de fontes renováveis, como amido de milho, cana-de-açúcar e outros materiais ricos em açúcar. Não ideal para altas temperaturas de impressão, ainda assim, quando aquecido, adquire boa fluidez, possibilitando a produção de componentes de alta qualidade. Grande popularidade em impressoras domésticas e em contextos educacionais, com boas propriedades mecânicas. É um sólido semicristalino, com temperatura de transição vítrea de 55 °C e de fusão de 180 (Shashikumar et al. 2023). Conforme observado na Figura 2.10, o material pode ser encontrado na forma de filamento (Figura 2.10a) ou na forma de pellet (Figura 2.10b), que corresponde à forma bruta do polímero, antes de ser extrudado em filamento. Bhatia e Sehgal (2023), afirmam que o FDM é um dos métodos

de impressão 3D mais utilizados para polímeros, e que o PLA pode ser degradado por microrganismos presentes no solo, com a ajuda do oxigênio durante o processo.



Figura 2.10. PLA para impressão 3D: (a) No formato de filamento, (b) Em pellets
(*filament2print, 2025*).

Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

Termoplástico produzido por polimerização, com facilidade de disponibilidade e boas propriedades mecânicas, com produção fácil e econômica. Suas propriedades mecânicas se alteram com a temperatura, sendo idealmente utilizado entre 20 e 80 °C, além de ser um material reciclável, (Bhatia e Sehgal, 2023). Resistência à tenacidade e a distorção térmica, boas propriedades elétricas, inflamável e solúvel em solventes orgânicos (Callister et al. 2016).

Polietileno Tereftalato (PET)

É um polímero poliéster com boa tenacidade, excelente resistência à fadiga e ao rasgamento, e é resistente a umidade, ácidos gordos e óleos e solventes (Callister et al. 2016). Inicialmente, foi usado para a fabricação de fibras têxteis, que substituiriam as fibras de algodão, e em filme para empacotar alimentos. Devido suas propriedades, passou a ser fabricado em garrafas rígidas para bebidas pouco sensíveis ao oxigênio, como carbonatadas, cerveja e água mineral, observado na Figura 2.11.



Figura 2.11. Garrafas fabricadas com PE (*Plastics Today*, 2024).

Polietileno Tereftalato Glicol (PETG)

É o copolímero mais utilizado para a impressão 3D. Originado da copolimerização do PET com glicol, melhorando as suas propriedades. Apresenta materiais mais translúcidos e com menor ponto de fusão, características ideais para a fabricação de peças mais resistentes e de fácil termoformagem ou extrusão. Não biodegradável, sendo proveniente da alteração química do PET, tornando-o mais macio quando aquecido, mais forte mecanicamente e mais denso do que o PLA (*Plastics Today*, 2024). Devido à facilidade de extrusão e estabilidade térmica, o PETG e outros derivados do PET são cada vez mais frequentes na impressão 3D por FDM.

2.6 Modelação por deposição fundida (FDM)

Devido ao elevado nível de exigência atuais da indústria, para uma progressiva melhoria dos materiais, há a necessidade de serem mais leves, resistentes e de maior qualidade. Razões que levaram à expansão do processo em diversos setores da indústria aeronáutica, automotiva e médica. Considerado o sistema do FA mais comum, por sua simplicidade, baixo custo e capacidade de produzir peças complexas de forma limpa e segura. Para Gajbhiye et al. (2022), a principal vantagem é a simplicidade do processo, baixo custo e a prototipagem rápida. A técnica (Figura 2.12) utiliza uma cabeça móvel ou bocal de extrusão, para depositar o material termoplástico fundido sobre o substrato. Podem ser dois bocais, um para extrusão do material e outro para a do suporte (Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris, 2015). Um termoplástico é aquecido e modelado sob pressão, por meio de uma matriz com extremidade aberta, semelhante à extrusão de metais, em que a massa fundida é forçada através de um orifício na matriz. (Callister et al. 2016).

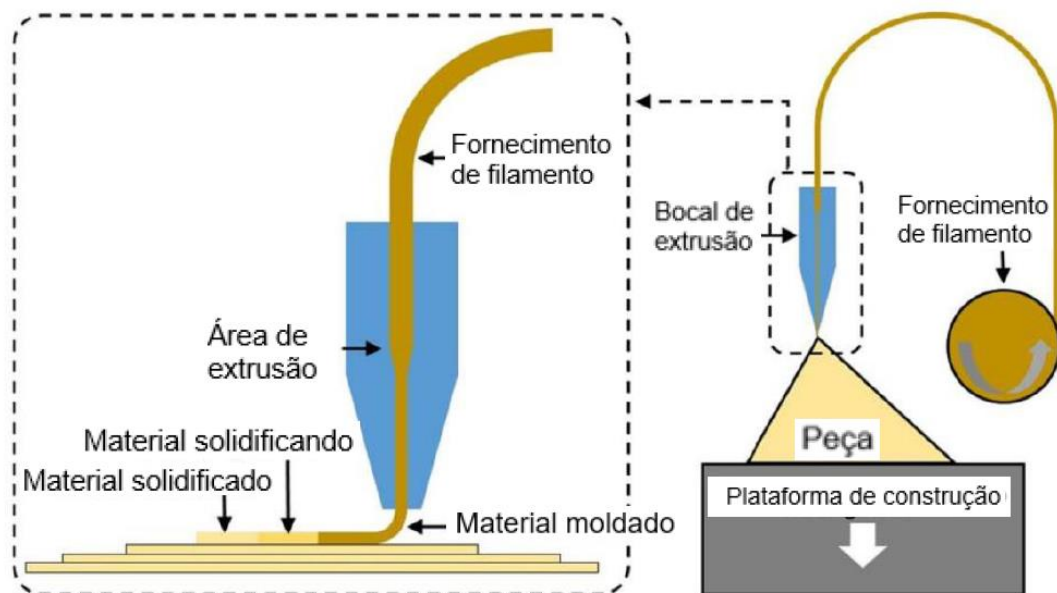


Figura 2.12. Etapas do FDM, adaptado de (Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris, 2015).

Os materiais mais amplamente usados são o PLA e o ABS, ou misturas entre polímeros, com o objetivo de se obter diferentes propriedades de deposição, como adição de farinha de madeira, cerâmica, metal, fibra de carbono, fibra de vidro, entre outros (Czyżewski et al. 2022). Segundo Memarzadeh et al. (2023), uma característica comum ao compósito de matriz polimérica (PMC), são as suas propriedades anisotrópicas, com as propriedades físicas do material diferentes em todas as direções, representando um obstáculo para o FA de PMC. Neste trabalho, o autor acrescenta que a seleção precisa das variáveis de processo impacta a qualidade dos componentes produzidos por FDM, devendo-se otimizar os parâmetros, aplicar métodos de pós-processamento e investigar estratégias avançadas de fabricação, como formas de mitigação.

2.6.1 Parâmetros do processo

Exercem forte influência na qualidade final da peça produzida por FDM, melhorando significativamente suas propriedades. Estudos comprovam a melhora das propriedades do material nas aplicações do FA, por meio da otimização dos parâmetros, que pode variar conforme o método a ser aplicado. De acordo com Rajendran et al. (2023), em um estudo do FA usando PLA, a melhor escolha de velocidade de impressão, espessura da camada e diâmetro do bocal otimizou as propriedades mecânicas do material, elevando-as em 15%. Alghamdi et al. (2021), atestaram que os parâmetros do processo incluem: a espessura da camada, ângulo de rasterização, contornos ou perímetros da casca, largura e lacuna de (rasterização), velocidade de deposição, densidade de preenchimento, temperatura da plataforma e da câmara, e a orientação da construção. Kumar et al. (2020) destacam a importância da otimização para identificar a espessura ideal de rugosidade sobre a superfície da placa de PLA, formada pela pulverização de

aço inoxidável através de spray de arco elétrico. No estudo, os parâmetros orientação raster, camada superior e inferior e espessura do revestimento, influenciaram para uma melhor rugosidade superficial.

De acordo com os artigos estudados, os principais parâmetros de impressão para o método FDM são: número de contornos, velocidade de impressão, temperatura do bocal de extrusão e da mesa de impressão, diâmetro do bocal, ângulo de rasterização e espessura da camada. Além disso, consideram-se também os fatores ambientais e a densidade de preenchimento. A densidade de preenchimento é diretamente influenciada pelos parâmetros, quanto mais adequado forem os parâmetros, melhor a densidade da amostra.

Número de contornos

As propriedades mecânicas dos objetos impressos estão associadas ao número de contornos/perímetros ou *shells/perimeter*, que indica o número de linhas de extrusão que formam as paredes (cascas) externas, ou voltas concentradas da peça, antes de passar para o preenchimento interno. Ao acrescentar um contorno exterior, a zona de concentração de tensões pode ser deslocada dos limites externos para o centro da amostra, aumentando a resistência e atrasando a falha precoce do material. Szot e Rudnik (2024), em seus estudos relacionados à resistência mecânica de peças impressas em função do número de contornos, relataram que as propriedades mecânicas apresentaram melhora significativa, sendo que a tensão máxima de flexão foi maior para amostras com 10 contornos do que para aquelas com 2 contornos, obtendo-se uma tensão média de 61,02 MPa.

Velocidade de deposição

O parâmetro tem grande influência na densidade do material, pois, se esta não estiver adequada, pode favorecer o surgimento de vazios e má distribuição de material, ocasionando baixa densidade, e má adesão das camadas. Em velocidades mais altas, o filamento não consegue fazer uma ligação eficiente entre o substrato e a camada impressa (Ozlati et al. 2019). As propriedades estruturais da camada impressa e da junta podem ser afetadas, além de poder apresentar defeitos como porosidades. O aumento da velocidade de deposição das camadas pode diminuir a massa, a dureza superficial do material, a sua resistência e aumentar a probabilidade de defeitos como porosidade e rugosidade das peças impressas (Kamer et al. 2022). Na Figura 2.13a, observa-se que, com o aumento da velocidade de deposição, ocorre perda de qualidade do material, resultando na diminuição da resistência mecânica, e, conforme ilustrado na Figura 2.13b, uma maior incidência de defeitos de porosidades.

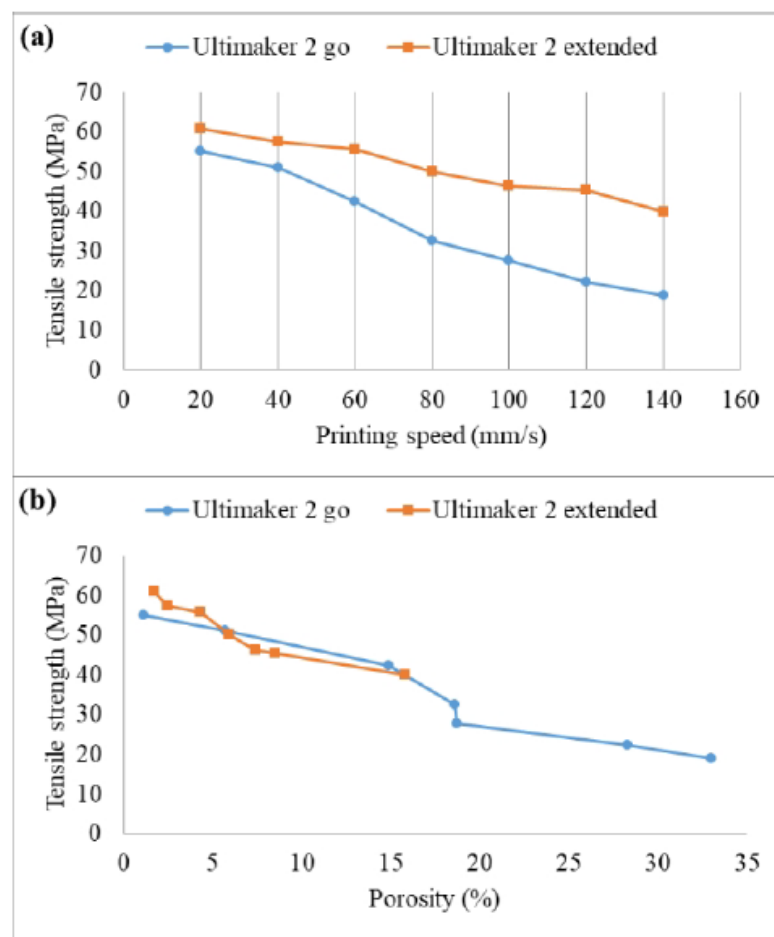


Figura 2.13. Diminuição da a) resistência e b) porosidade, devido ao aumento da velocidade (Kamer et al. 2022).

Temperatura do bocal de extrusão e da mesa de impressão

Tem forte influência na aderência e na qualidade do material polimérico, uma vez que, se a temperatura estiver demasiadamente alta, influencia na característica cristalina do material, através da sua densidade ou pela resistência mecânica. Tem efeitos na taxa de deformação no comportamento tensão-deformação dos polímeros, pois, o aumento da temperatura diminui o módulo de Young, a resistência à tração, e aumenta-se a ductilidade do material (Callister et al. 2016). Uma junta ligada por adesivo, com o aumento gradual da temperatura, as macromoléculas se organizam, e com o arrefecimento do material, podem adquirir maior resistência (Šedivka et al. 2015). Ozlati et al. (2019), utilizaram um filamento para deposição de polipropileno em uma liga de Al-(magnésio)Mg, resultando no aumento da resistência da junta sobreposta, e constatou que a otimização da temperatura, teve influência no percentual de cristalização, com uma densidade semelhante à do filamento original a temperatura ambiente, resultando em uma maior força de adesão entre as camadas, e aumentando a resistência da junta. Na Figura 2.14, constatou-se que a amostra, quando submetida à temperatura ambiente, apresentou uma ligação incompleta. No entanto, a 50 °C, com

o pré-aquecimento do substrato polimérico, verificou-se uma ligação mais eficaz. Já a 90 °C, contudo, obteve-se uma união ainda mais forte, resultando numa ligação quase completa entre o substrato polimérico e a parte aditivada.

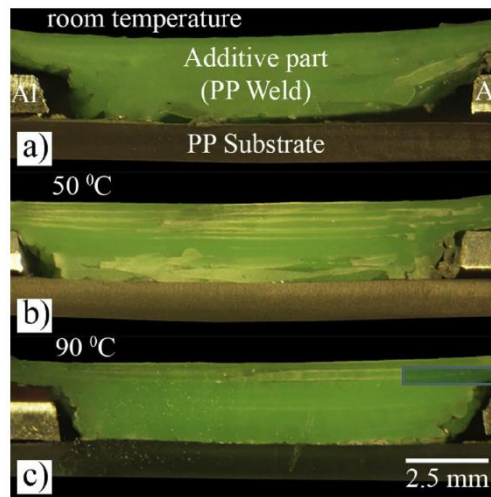


Figura 2.14. Efeito do parâmetro Temperatura (Ozlati et al. 2019).

Diâmetro do bocal

Define a quantidade de material depositado para a construção da peça, de acordo com o diâmetro do bocal. Czyżewski et al. (2022), constataram que em bocais de diâmetros maiores, superiores a 0,4 mm, e a altura da camada constante, aumentaram os vazios de ar, aumentando a resistência ao impacto da camada impressa, sugerindo que, alguma energia pode ser absorvida pelos espaços vazios, durante o ensaio de impacto. Os diâmetros de bocais maiores são mais favoráveis para uma melhor adesão entre as camadas, fazendo com que as camadas subsequentes do polímero quente tenham uma adesão melhor com a camada anterior. Na Figura 2.15, é representada uma amostra de diferentes condições de deposição de PLA, com diferentes diâmetros de bocal, constatando-se que, quanto maior o diâmetro do bocal, maior o espaçamento entre as camadas, resultando em maiores vazios.

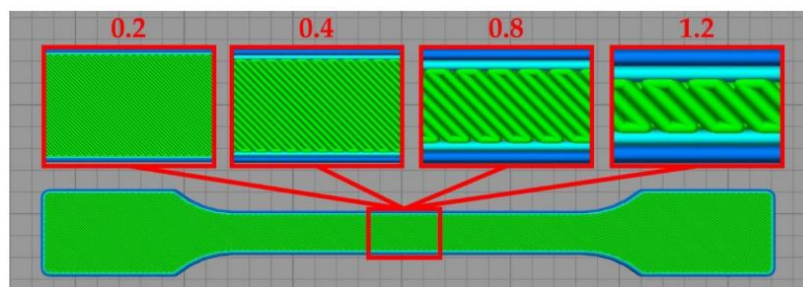


Figura 2.15. Disposição do polímero depositado em diferentes diâmetros de bocal (Czyżewski, 2022).

Ângulo de rasterização e espessura da camada

O ângulo de rasterização (orientação da peça) refere-se à direção da impressão em relação ao eixo X da mesa de deposição do polímero. Tanto o ângulo quanto a espessura, possuem influência nas características estruturais da camada polimérica, alterando o módulo de elasticidade e a resistência do material. Shashikumar e Sreekanth (2023), realizaram um experimento entre dois materiais poliméricos e constataram a melhoria da resistência dos materiais dos filamentos, ao variar o ângulo de varrimento de 90°, e a espessura mínima de 0,1 mm, conferindo aos polímeros maior resistência e elasticidade. Alghamdi et al. (2021), por sua vez, realizaram uma revisão bibliográfica a respeito das técnicas e características do FA e destacaram que, além da espessura, são igualmente importantes a largura de rasterização (largura do filamento), e a lacuna de rasterização (lacuna entre dois filamentos extrudido adjacentes).

A Figura 2.16 representa uma curva de tensão-deformação de diferentes espessuras de camadas a um ângulo de impressão de 90°. Pode-se constatar que valores de espessuras menores apresentam maiores resistências e elasticidade nos materiais ABS (Figura 2.16a), e PA/Nylon, (Figura 2.16b).

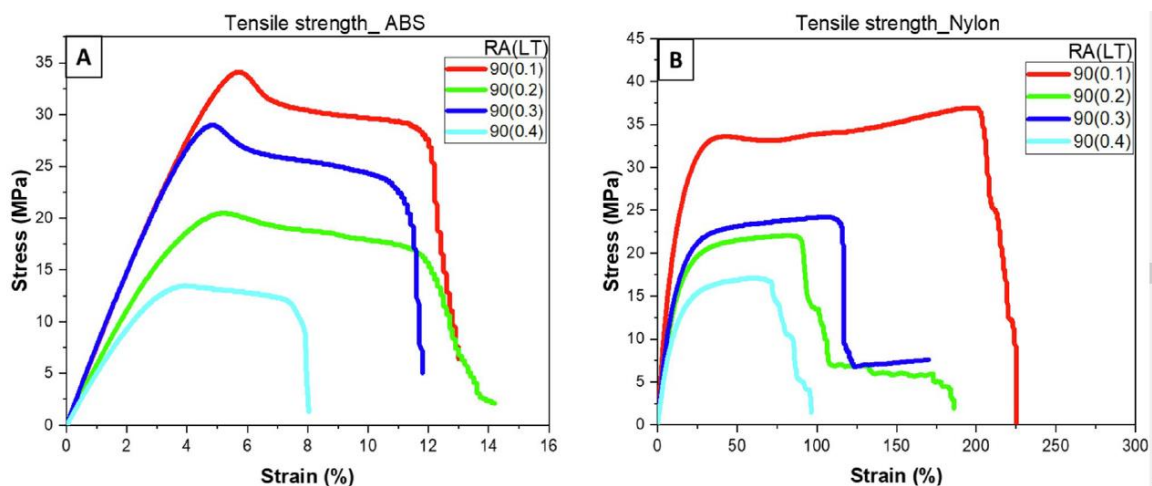


Figura 2.16. Módulo de elasticidade e resistência a tração a um ângulo de 90°, com diferentes espessuras da camada (Shashikumar e Sreekanth, 2023).

Densidade

A densidade de preenchimento é considerada um parâmetro, e de uma forma literal, representa a quantidade de material dentro da peça. A sua otimização é fundamental para a característica final e homogeneização da peça, para se evitar, ao máximo a incidência de vazios. Praticamente todos os parâmetros a impactam, pois, para uma densidade de 100%, deve-se otimizar parâmetros como a temperatura, umidade do filamento, temperatura associada a velocidade e ângulo de impressão, velocidade de deposição, número de contornos e altura das camadas (Abreu, 2024). Gordeev, Galushko e Ananikov (2018), relataram que a temperatura, velocidade e diâmetro do bocal devem ser dimensionados para uma melhor densidade, e um preenchimento mais

uniforme, evitando-se os vazios e os defeitos, pois estes podem influenciar na diminuição das propriedades do material impresso.

Todos os parâmetros descritos anteriormente são importantes para o processo. Entretanto, os fatores ambientais e os vazios, ainda que não sejam considerados parâmetros do processo, estão intimamente relacionados a eles. A otimização e a definição desses fatores produzem consequências diretas sobre a qualidade das peças produzidas.

Fatores ambientais

Fatores ambientais como umidade, podem deformar a geometria do material, alterando a resistência à tração da peça fabricada por impressão 3D. Os filamentos podem alterar a sua geometria com a umidade, ficando mais frágeis e causando problemas na impressora FDM (Memarzadeh et al. 2023).

Vazios

São um ponto negativo na impressão por FDM, pois diminuem a densidade de preenchimento da junta e, conseqüentemente, a sua resistência. Quanto maior a densidade, mais material é depositado, e melhor será a aderência e a resistência do polímero. O gradiente de temperatura tem grande importância na melhora da junta e da densidade do material. Gordeev, Galushko e Ananikov, (2018), demonstraram que os defeitos estruturais são obstáculos na qualidade da impressão 3D e que a geometria da peça é fundamental para uma melhor densidade, melhores taxas de deposição e resistência. O preenchimento, o perfil de deposição do material, ou geometria da peça, influenciam na qualidade da impressão e no aparecimento de vazios. Por isso, é importante adotar geometrias adequadas. Ozlati et al. (2019), (Figura 2.17), utilizaram uma geometria cilíndrica e um filamento de polipropileno deposição sobre uma liga de Al-Mg perfurada. O estudo resultou no aumento da resistência da junta sobreposta.

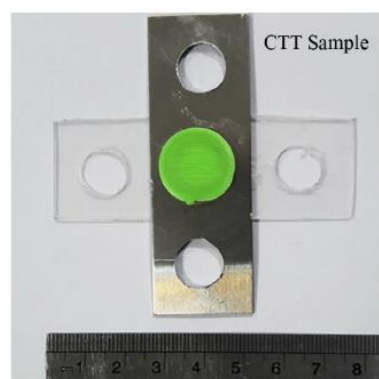


Figura 2.17. Padrão geométrico cilíndrico, para otimizar a ancoragem e união da junta (Ozlati et al. 2019).

Falk et al. (2018), realizaram estudos para se analisar a adesão de polímeros em camadas intercaladas sobre um metal, e constataram a presença de vazios no revestimento de ABS entre as camadas, ilustrados pelos pontos escuros da Figura 2.18, escalas em μm . Estes defeitos foram causados provavelmente pela evaporação de acetona residual utilizada como solvente para formar o revestimento polimérico, durante a etapa de impressão.

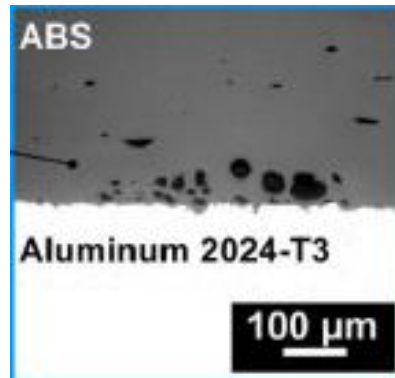


Figura 2.18. Presença de vazios entre as camadas dos polímeros (Falk et al. 2018).

2.6.2 Métodos FDM baseados em Multimateriais

Como se sabe, a importância da união de materiais diferentes é de grande interesse da indústria em geral, como aeroespacial, automóvel, odontologia, entre outros. Por meio da necessidade de materiais mais leves e mais resistentes, a união de materiais distintos é uma característica que agrega qualidade às peças. Em particular, para Argyros et al. (2023), a produção de multimateriais, de diferentes propriedades, tem grande relevo tecnológico, devido às diferenças de características destes materiais, como ponto de fusão, expansão térmica e contração. Em seus estudos, Rajendran et al. (2023), constataram que a união de compósitos à base metal e polímero através do método de FDM, influencia a indústria, com uma maior fiabilidade e eficiência no desempenho dos compósitos, se comparados aos outros métodos de união tradicionais.

Método FDM com uso de polímeros com reforço

O polímero é um dos materiais mais empregues na concepção de peças por este método, devido ao baixo custo e boa conformação. Rajendran et al. (2023), demonstraram que a união de dois polímeros de diferentes propriedades trouxe benefícios, com uma maior qualidade em relação a tração e flexão e melhoria na resistência final da peça. A adição de fibra de carbono ao PLA resultou em uma melhoria de 15% nas propriedades mecânicas gerais, um aumento de 47% na resistência à tração, e também uma maior resistência da peça final, com a redução da deformação.

Método FDM à base de metais e polímeros

Os materiais metálicos possuem características distintas se comparados com os poliméricos, como o ponto de fusão, densidade, resistência mecânica, propriedades químicas, entre outras. Segundo Callister et al. (2016), os metais são compostos por um ou mais elementos metálicos, seus átomos estão arranjados de maneira ordenada. Em comparação aos polímeros, quanto às características físicas/mecânicas são relativamente mais densos, mais rígidos, resistentes. O método ao utilizar filamentos compósitos, traz benefícios para a indústria, com melhores qualidades das peças, mais fiáveis, leves e resistentes. Materiais à base de metal, têm as propriedades mecânicas melhoradas, no entanto, há desafios quanto relacionados a suas propriedades químicas, metalúrgicas e térmicas (Rajendran et al. 2023). Ozlati et al. (2019), constataram diferenças na resistência de juntas de polímeros não reforçados e de compósitos, evidenciando que as juntas de materiais compósitos apresentam maior resistência, conforme observado na Figura 2.19.

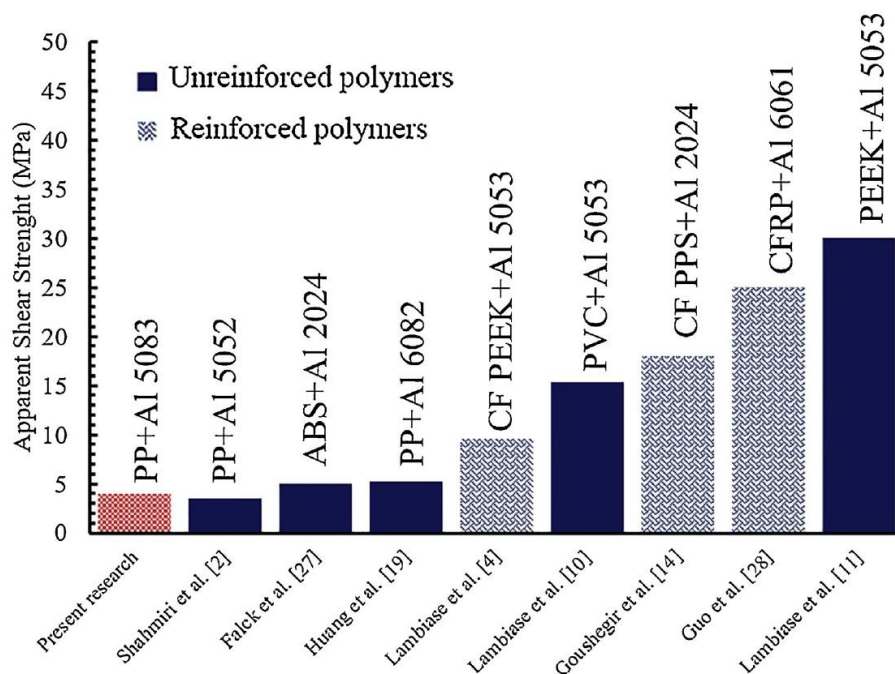


Figura 2.19. Comparativo da tensão de corte aparente de juntas híbridas Al/polímero, (Ozlati et al. 2019).

Argyros et al. (2023), combinaram um material de um filamento de PLA sobre a superfície de uma placa de aço inoxidável 316L. A união entre os materiais ocorreu de forma mecânica, por meio da extrusão do polímero, com o objetivo de analisar a rugosidade do metal de modo a obter um bom preenchimento, bem como adequar a temperatura para garantir uma boa adesão. O mecanismo de união é a ancoragem mecânica que conta com a rugosidade da superfície e a geometria das cavidades criadas. A temperatura do aço é um parâmetro crítico e deve estar ao mesmo nível do

PLA aquando do preenchimento da cavidade. Os parâmetros de impressão pré-selecionados, estão descritos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Parâmetros de impressão FDM (Argyros et al. 2023)

Parâmetros	Preenchimento das cavidades	Impressão da amostra
Velocidade (X-Y)	4,5 mm/min	45mm/min
Temperatura de bocal	210°C	210°C
Peça metálica	220°C	60 – 150 °C
Temperatura da mesa	N/A	N/A
Densidade	100%	100%
Tipo de enchimento	N/A	Retilíneo
Ângulo de enchimento	N/A	45°C
Número de contornos	2	2
Ventilador de arrefecimento	0%	0 – 100%

Noutro estudo Abreu et al. (2024), se valeram do potencial do FA para produzir juntas metal-polímero com boa qualidade, melhorando o desempenho da junta sobreposta destes materiais, pela otimização da geometria de um pino de ligação, além de otimizar outros parâmetros de impressão, nomeadamente humidade do filamento, temperatura do bocal, velocidade de impressão, ângulo de impressão, espessura da camada e número de contornos. A otimização dos parâmetros e da geometria da junta resultou num aumento de 368,97% da resistência mecânica da junta, pela melhor geometria do pino, ilustrado na Figura 2.20.

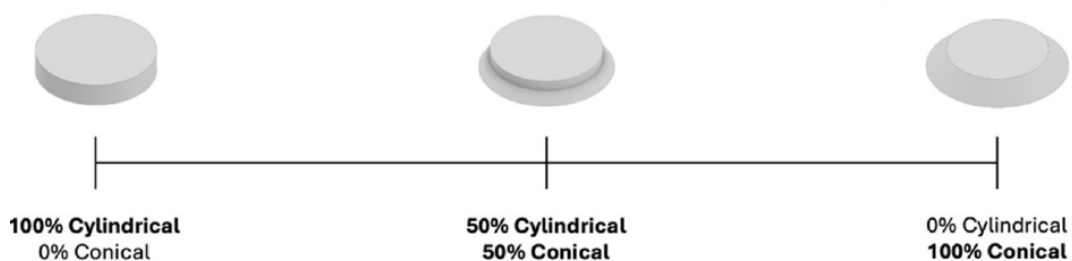


Figura 2.20. Otimização da geometria do pino, (Abreu et al. 2024).

Na maior parte dos estudos analisados de ligações metal polímero são centradas em ligações mecânicas, no entanto na presença de calor e pressão suficientes e também sob condições de alguns parâmetros controlados, a ligação química pode ocorrer e contribuir para a resistência global da junta híbrida. No estudo conduzido por Alhmoudi et al. (2023), na união entre uma liga de Al liga do AA-5052 e ABS, os parâmetros de

temperatura da mesa foi ajustada a 190°C e velocidade de impressão de 20m/s. Foi observado uma camada cinzenta na superfície do polímero, e a análise química através de raio X, revelou ser a presença de Al e Mg, presentes na liga AA-5052, na superfície do polímero descolado. A presença destes metais no ABS pode indicar interação química entre os dois materiais, conforme observado na Figura 2.21.

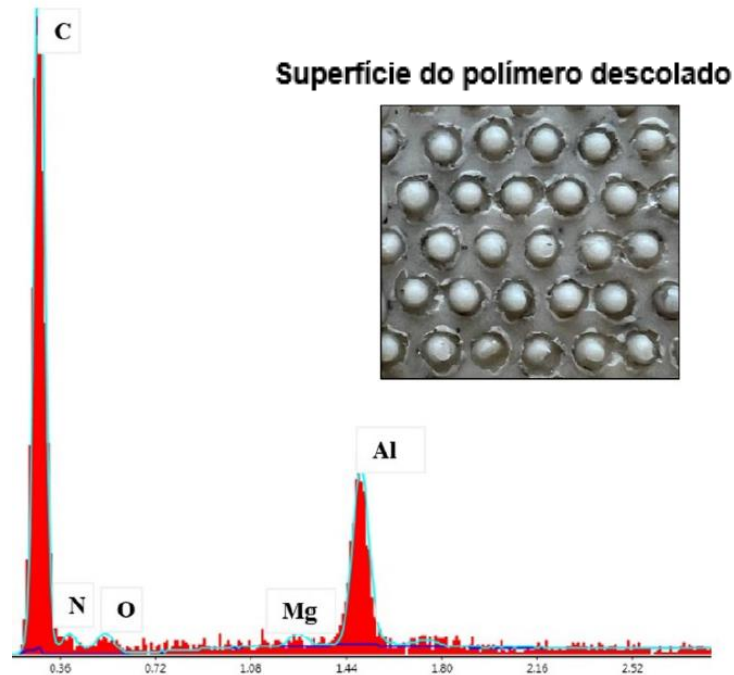


Figura 2.21. Análise de raio X superficial do polímero, evidenciando a presença de Al e Mg, adaptado de (Alhmodi et al. 2023).

Após o estudo bibliográfico da técnica de FA, relativo às suas principais características, métodos, classificações e materiais empregados no processo, bem como de estudos que justificam e apoiam a importância do tema abordado neste trabalho, nos próximos capítulos serão apresentados os procedimentos experimentais realizados no estudo, seguidos dos resultados obtidos.

3 Procedimento experimental

Neste capítulo procura-se apresentar os materiais utilizados e o processo de fabrico das amostras. Em concreto, detalham-se os procedimentos associados à preparação topográfica das placas metálicas, à deposição da película polimérica intermédia por *hot press*, e à deposição do polímero por impressão 3D. Explicam-se, também, os procedimentos adotados para caracterização experimental das amostras.

3.1 Materiais

A liga selecionada para a produção das amostras metal/polímero foi a liga de Al AA5754-H111. De acordo com Hausöl et al. (2010), a liga da série 5754 é amplamente utilizada, devido ao reduzido peso, boa estampagem e resistência mecânica. A indicação H111 significa que o material sofreu um encruamento leve, conferindo-lhe maior resistência. Na Tabela 3.1, são apresentadas as propriedades químicas da liga de Al.

Tabela 3.1. Propriedades químicas do Al AA5754 (% pond.), (Hausöl et al. 2010)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros elementos	Al
AA5754	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,3	0,3	0,15	0,15	Equilíbrio

O material utilizado para impressão foi um filamento de PLA, com designação comercial PLA Galaxy Silver, fabricado pela empresa Prusa Research, com diâmetro de 1,75 mm. Na Figura 3.1, ilustra-se a bonina de filamento utilizada na impressão 3D.



Figura 3.1. Filamento PLA Galaxy Silver (Prusa Research, 2025).

3.2 Preparação topográfica

A primeira fase do trabalho experimental consistiu na preparação topográfica dos componentes metálicos, onde, posteriormente, foi efetuada a deposição por impressão 3D. Estes componentes, com as dimensões de $45 \times 45 \times 2 \text{ mm}^3$, foram preparados com diferentes níveis de modificação topográfica, isto é, sem modificação superficial (Sp), com modificação por lixamento (Lx) e com modificação por texturização mecânica (T0,1 e T0,2). A amostra Sp não passou por qualquer modificação topográfica prévia, conforme ilustra a Figura 3.2a. A etapa seguinte, correspondente à aplicação da película/filme, é realizada diretamente sobre a sua superfície nessa condição. Relativamente às amostras Lx, foram preparadas com uma lixa P180, Figura 3.2b. Este processo de lixamento visou aumentar a sua rugosidade e favorecer a adesão da película polimérica intermédia, para a posterior impressão 3D do PLA sobre a placa (com a película aplicada).

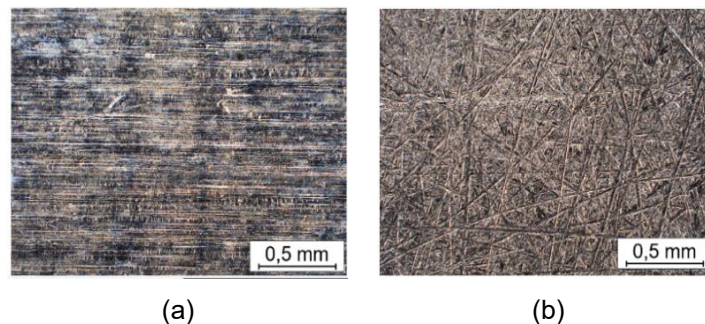


Figura 3.2. Preparações topográficas das amostras: sem preparação Sp, (b) por lixamento Lx.

Nas amostras submetidas a texturização, T0,1 e T0,2, procedeu-se à abertura de rasgos na superfície do Al, por deformação plástica do material, com o objetivo de melhorar a adesão da película intermédia. Nas imagens apresentadas na Figura 3.3, observam-se as texturas produzidas na superfície do metal, resultantes deste processo de modificação. Nesta etapa, foram realizadas preparações nas amostras T0,1 (Figura 3.3a) e T0,2 (Figura 3.3b), cuja diferença se centrou na profundidade de penetração do ranhuramento mecânico e, por consequência, no número total de rasgos. As amostras T0,1 foram ranhuradas com uma profundidade de 0,1 mm e as amostras T0,2 com uma profundidade de 0,2 mm. Através de uma observação em maior escala, comparativamente às amostras T0,1, (Figura 3.3c), as amostras T0,2, observado na Figura 3.3d, apresentam uma alteração topográfica mais agressiva, ou seja, são compostas por ranhuras mais profundas, o que poderá potenciar a ancoragem mecânica entre o Al e a película polimérica intermédia. Para ambos os tipos de amostra, a área texturizada foi de $30 \times 30 \text{ mm}^2$.

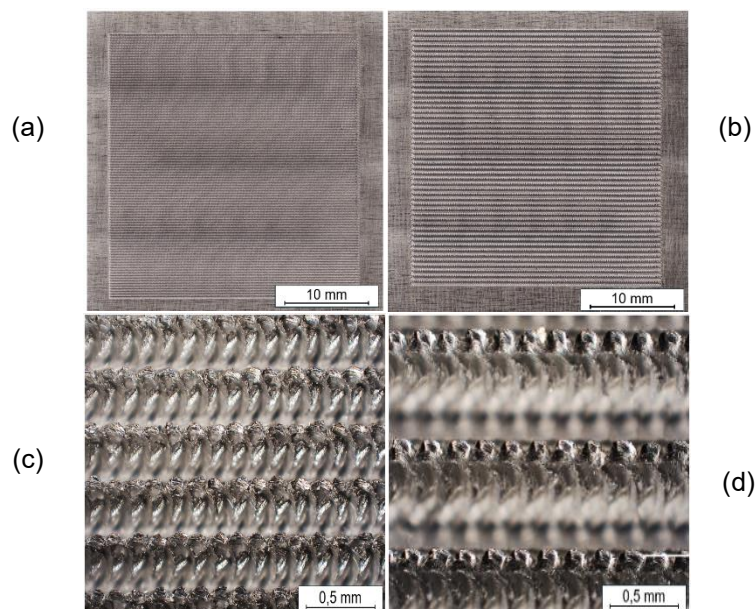


Figura 3.3. Preparação topográfica das amostras com texturas: (a) Visão geral amostra T0,1, (b) Visão geral amostra T0,2, (c) Visão ampliada amostra T0,2.

O método de texturização, ranhuramento mecânico, foi realizado através de um centro de maquinagem CNC. Conforme ilustrado na Figura 3.4, foi utilizada uma ponta de gravação rotativa de carboneto de tungsténio, que se movimenta linearmente a uma determinada profundidade (0,1 mm, e 0,2 mm), até à criação das ranhuras/texturização multilineares (Pereira et al. 2025).

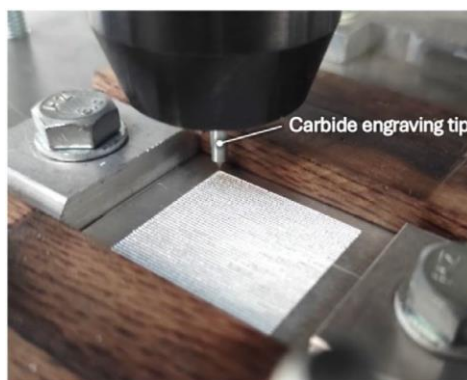


Figura 3.4. Texturização da superfície do Al com utilização de uma ponta de gravação de carboneto (Pereira et al. 2025).

3.3 Deposição da película intermédia por prensagem a quente

Após o procedimento de texturização, foi realizada a deposição da película por *hot press* sobre as superfícies das amostras. O processo constitui uma técnica de moldagem por compressão térmica para a conformação e adesão do polímero ao substrato. Foi utilizada uma prensa hidráulica de placas aquecidas com o controlo de temperatura,

ilustrada na Figura 3.5a, e *pellets* de PLA (grãos cilíndricos poliméricos) (Figura 3.5b). A prensa foi aquecida a uma temperatura acima da temperatura de fusão do polímero (em torno de 200 °C) e os *pellets* foram depositados, com uma massa suficiente para cobrir toda área da amostra, em torno de 1 e 2 g de polímero. Foi aplicada uma pressão de compressão uniaxial controlada, inicialmente em zero, até 10 bar, para que o polímero se funda antes de ser comprimido. A duração do processo variou em torno de 2 a 5 minutos, tempo suficiente para garantir, após a fusão do polímero, a sua fluência e conformação sobre a textura da superfície metálica.



(a)



(b)

Figura 3.5. (a) Prensa hidráulica para conformação da película PLA, processo *Hot press*, (b) *Pellets* de PLA (*Filament2Print*, 2025).

Estudos anteriores atestaram a eficácia de outros métodos para a junção heterogênea Al/PLA. Abreu et al. (2024) revelaram que, com a aplicação de uma tinta aquosa em spray na superfície da placa de Al, foi possível obter bons resultados na deposição do PLA, criando-se uma camada de aderência entre os dois materiais.

No presente trabalho, o emprego da camada de tinta deu lugar a uma película polimérica. Através da Figura 3.6, é possível observar a deposição da película nos componentes Sp e Lx. Na Figura 3.6a, nota-se que a imagem se apresenta mais esbranquiçada devido à aplicação da película, enquanto na Figura 3.6b o componente é mostrado sem a película. Situação semelhante é observada nas Figura 3.6c, com película, e Figura 3.6d, sem película.

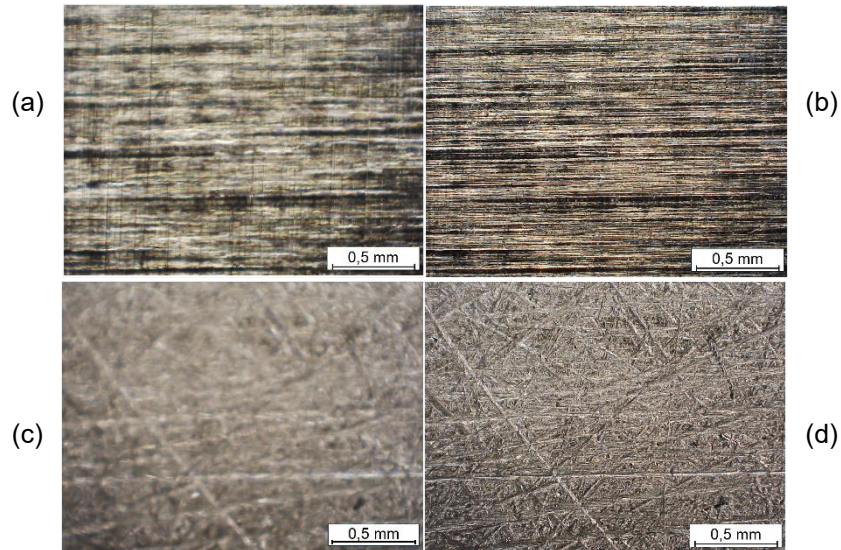


Figura 3.6. Amostras com película na placa Sp e Lx: (a), (c) menor ampliação; (b), (d) maior ampliação.

No caso dos componentes T0,1(Figura 3.7a) e T0,2 (Figura 3.7b), também houve uma deposição regular de material. Ainda assim, no caso da amostra T0,2, há alguma falta de película depositada na extremidade da zona texturizada. Este aspeto está relacionado com a maior profundidade das ranhuras nesta amostra, que necessitam de um maior volume de PLA para que exista o total revestimento da superfície. Como a quantidade de material depositada foi sensivelmente a mesma nos vários tipos de amostras, existe uma porção da superfície das amostras T0,2 não revestida.

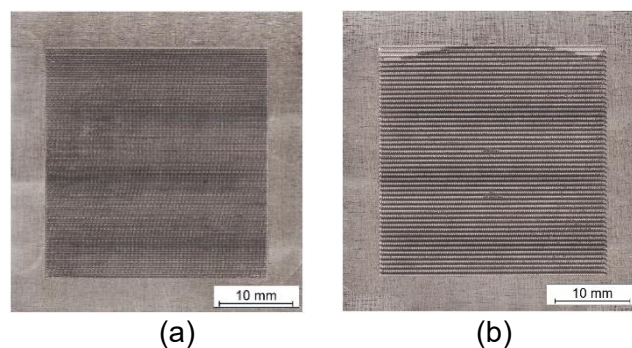


Figura 3.7. Amostras texturizadas com película: (a) Amostra T0,1; (b) Amostra T0,2.

3.4 Produção das amostras metal-polímero por impressão 3D

Após a preparação da superfície e deposição da película intermédia, procedeu-se à impressão do material polimérico PLA, em camadas, sobre a superfície da placa de Al,

tanto nas superfícies sem preparação como nas que foram previamente tratadas com lixamento e texturização. Para a produção das amostras, foi utilizada uma impressora cartesiana FDM Original Prusa I3 MK3, compatível com o material PLA utilizado neste estudo, que se encontra ilustrada na Figura 3.8. A interface intuitiva e simples do respetivo software e as suas características permitem uma personalização pormenorizada dos parâmetros de impressão (Abreu, 2024). A impressão ocorreu no substrato de Al, com a película polimérica aplicada, pelo que se limpou a amostra com álcool isopropílico, antes da deposição do polímero em 3D.

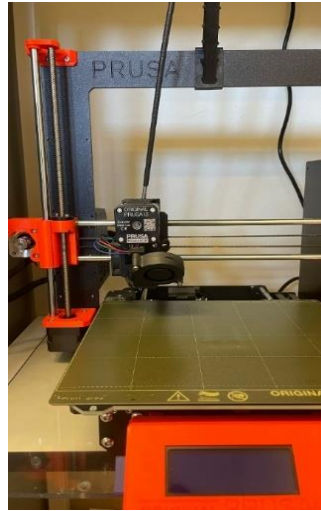
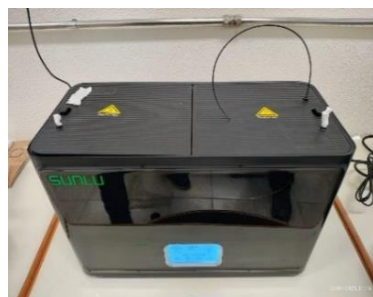


Figura 3.8. Impressora Prusa (Prusa Research, 2025).

Para melhor controlar as condições de produção das amostras e, por consequência, as suas propriedades, foi utilizada uma estufa para controlo da temperatura e humidade do filamento. A estufa utilizada, Sunlu FilaDryer S4, encontra-se ilustrada na Figura 3.9a. O filamento é, então, conduzido até a cabeça de impressão por uma proteção externa (conduíte), de forma a evitar o contacto com o meio ambiente e prevenir a contaminação por humidade, conforme observado na Figura 3.9b.



(a)



(b)

Figura 3.9. Equipamentos de impressão: (a) Estufa de secagem Sunlu FilaDryer S4, (Sunlu, 2025); (b) Filamento através do conduíte.

Para se avaliar as diferentes condições de deposição e o impacto dos parâmetros na qualidade das amostras impressas, foram realizadas deposições em várias amostras em condições distintas, em um total de 8 amostras, subdivididas em 2 amostras para cada condição de preparação superficial. A espessura amostras variou entre 2,11 mm e 2,23 mm (espessura combinada da placa de Al e película PLA), conforme detalhado na Tabela 3.2. A área de impressão foi de 25 x 25 mm² para todas as amostras.

Tabela 3.2. Geometria e número total de amostras por condições distintas

Amostra	Condição superficial do Al	Espessura total: Al + película PLA (mm)
Sp - 1	Sem alteração	2,11
Sp - 2		2,14
Lx - 3	Lixa 180	2,13
Lx - 4		2,14
T0,1 - 5	Texturização penetração 0,1 mm	2,18
T0,1 - 6		2,16
T0,2 - 7	Texturização penetração 0,2 mm	2,23
T0,2 - 8		2,23

Adicionalmente às amostras apresentadas na tabela, para a condição T0,1, foram produzidos 03 provetes de tração/corte para a realização dos ensaios de tração, por forma a testar a resistência mecânica e a capacidade de deformação das amostras. Estes provetes destinaram-se apenas a caracterização mecânica, não tendo sido sujeitos a análise morfológica. Os procedimentos de produção foram em tudo semelhantes aos usados para obtenção das amostras. A diferença residiu apenas na geometria dos provetes (Figura 3.10). De acordo com a figura, é possível observar que os componentes metálico e polimérico impresso têm ambos uma largura de 20 mm. O comprimento do componente metálico foi de 45 mm e o do componente polimérico de 40 mm. As espessuras de ambos os componentes são de 2 mm e a região de sobreposição definiu-se como sendo de 20 x 20 mm². Na Figura 3.10a é ilustrado o provete sem a película; na Figura 3.10b, com a película; e na Figura 3.10c, com a deposição do PLA, visando à realização dos ensaios de tração e corte. As amostras foram devidamente unidas, conforme observado na Figura 3.10.

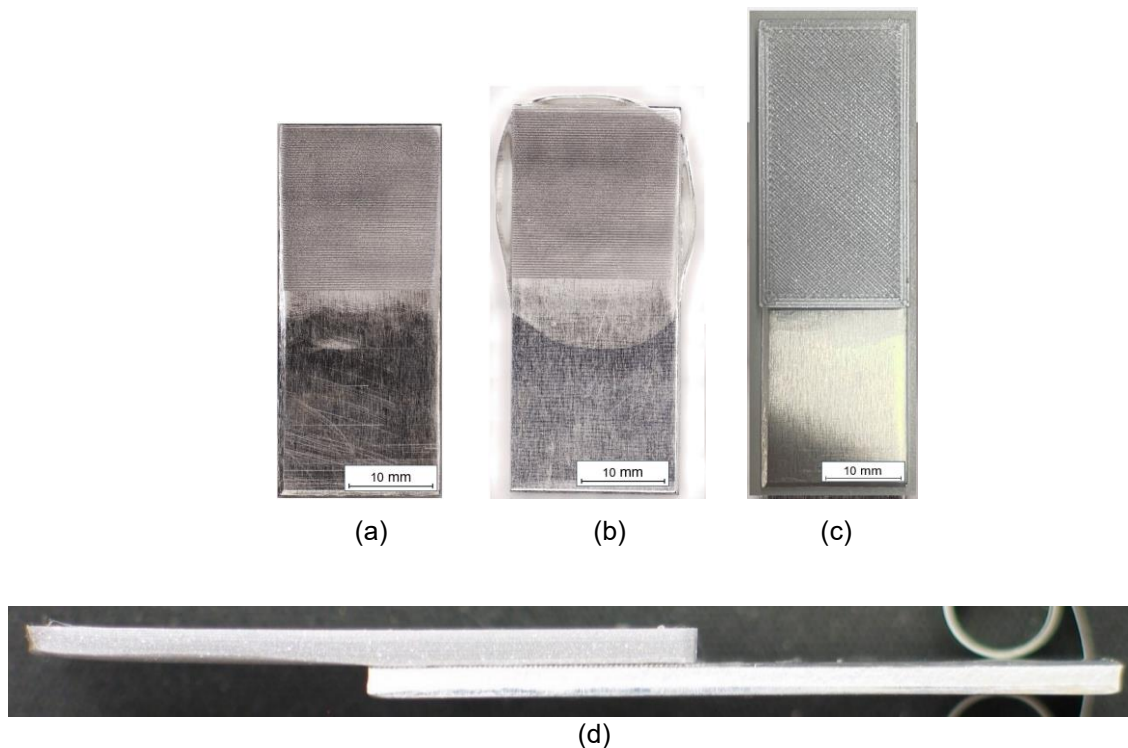


Figura 3.10. Provetes para o teste de Tração/corte.

Para se obter uma peça final com boas características, é fundamental que os parâmetros de impressão estejam bem definidos e otimizados, os quais impactam diretamente na densidade do peça depositado. Pretende-se assim evitar a formação de vazios, tornando o material mais homogêneo e resistente. Assim, para a impressão, foram selecionados os parâmetros obtidos a partir do estudo de otimização conduzido por Abreu et al. (2024), conforme se ilustra na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Parâmetros de impressão

Propriedades	Valores
Fatores ambientais: Temperatura do filamento	50 °C
Humidade do filamento	20-25%
Temperatura do bocal: Primeira camada	215 °C
Enchimento	210 °C
Temperatura da mesa aquecida	60 °C
Velocidade de impressão:	
Contorno	36 mm/s
Primeira camada	20 mm/s
Preenchimento	64 mm/s
Camada superior	32 mm/s
Ângulo de raster	45 °
Espessura da camada	0,1; mm
Número de contornos	3

Uma vez definidos os parâmetros, foi impressa uma guia na mesa da impressora 3D, como mostrado na Figura 3.11a, como um ponto de referência para inserir as amostras, de forma a permitir que a impressora se oriente corretamente quanto à posição exata da área da impressão. A amostra foi posicionada no suporte, sendo depositado o PLA sobre a sua topografia, sendo necessário fixar a amostra à mesa de impressão com fita adesiva, garantindo que permanecesse estável durante o processo, conforme ilustrado pela seta a vermelho na Figura 3.11b.

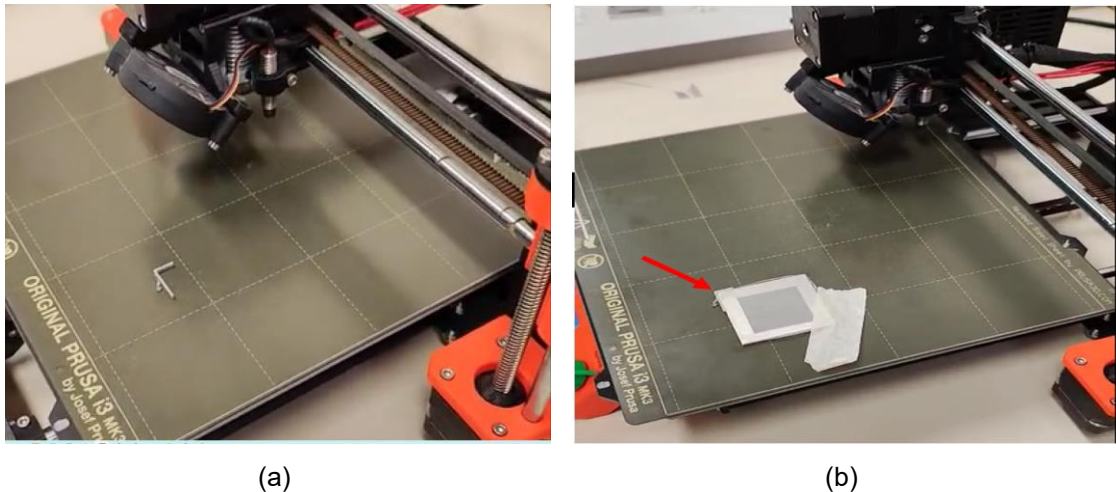


Figura 3.11. Preparação da amostra na impressora: (a) Impressão da guia, (b) Fixação da amostra e deposição do PLA.

Após a preparação/calibração da impressora, é impressa a camada de PLA, cobrindo toda a superfície preparada das placas de Al (com a película depositada). No caso das placas sem a preparação superficial, a área impressa manteve-se igual à das restantes.

3.5 Caracterização experimental das amostras metal-polímero

A caracterização experimental abrangeu a caracterização topográfica das superfícies de deposição, a inspeção visual das peças impressas, assim como a sua caracterização morfológica e mecânica.

3.5.1 Caracterização topográfica

A caracterização topográfica decorreu por microscopia digital. Todas as superfícies metálicas foram observadas a diferentes ampliações e caracterizadas por perfilometria através da utilização do microscópio digital Hirox HRX-01 3D, que se encontra ilustrado na Figura 3.12. As superfícies texturizadas foram ainda seccionadas perpendicularmente à direção das ranhuras e preparadas superficialmente, através da aplicação de lixas de diferentes granulometrias e polidas, com recurso a um pano e

suspensão de diamante de 6 μm e de 3 μm . As secções transversais destas superfícies foram observadas a diferentes ampliações.



Figura 3.12 – Microscópio digital Hirox HRX-01 3D.

3.5.2 Inspeção visual

A primeira fase de caracterização das amostras consistiu na sua inspeção visual. As amostras foram inspecionadas visualmente em dois momentos, em concreto, após a deposição da película polimérica intermédia e após a impressão 3D do polímero. A inspeção visual consiste na observação, a olho nu, das amostras e assume um papel de grande relevo, dado consistir no primeiro contacto com os resultados de impressão, sendo essencial para a definição de eventuais ajustes no processo de produção.

3.5.3 Caracterização morfológica

Após impressão, as amostras foram seccionadas e preparadas de acordo com as práticas metalográficas convencionais. Foram sujeitas à ação de lixas de diferentes granulometrias e polidas com recurso a um pano e suspensão de diamante de 6 μm e de 3 μm . Posteriormente, foram observadas, a diferentes ampliações, num microscópio digital Hirox HRX-01 3D e nos microscópios óticos Leica DM4000M LED e Zeiss Axiovert 25 (ambos com câmara fotográfica acoplada). A caracterização morfológica é um passo essencial na caracterização das amostras, por permitir analisar, macro e microscopicamente, a sua estrutura interna.

3.5.4 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica das peças impressas foi conduzida através da realização de ensaios de tração/corte uniaxial. Os ensaios foram efetuados com uma velocidade de

0,1 a 0,5 mm/min, utilizando uma máquina de ensaios universal Shimadzu AGS-X de 100 KN, observado na Figura 3.13. Foram utilizados calços nas garras, para garantir maior contato e fixação com o provete, para um alinhamento adequado da carga ao longo da amostra. Inicialmente para aquisição do mapa de deformação dos provetes, usou-se correlação de imagens digitais (*Digital Image Correlation*), através da utilização de um equipamento de extensometria ótica GOM Aramis 5M. Para este efeito, os provetes foram preparados seguindo o procedimento descrito em Leitão et al. (2012). De forma geral, este procedimento consistiu na criação de um padrão na secção longitudinal dos provetes de tração/corte (análise em espessura). Para o efeito, num primeiro momento, procedeu-se à pintura desta superfície com tinta spray branca e, posteriormente, com recurso a tinta spray preta, pulverizou-se a superfície (padrão branco com pintas pretas dispersas).

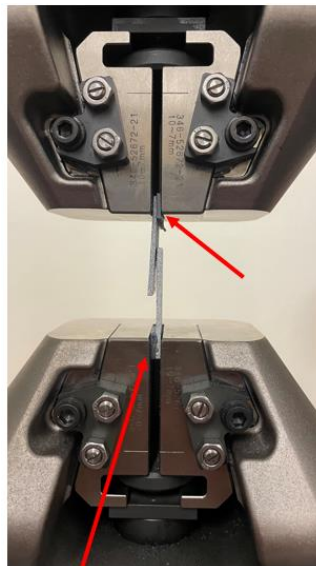


Figura 3.13. Fixação da amostra T0,1 para os testes de tração (Shimadzu AGS-X, 2025).

Após serem detalhados os procedimentos associados à preparação topográfica das placas metálicas, à deposição da película e do polímero sobre a placa de Al, bem como os procedimentos adotados para a caracterização experimental das amostras, no capítulo seguinte serão abordados os resultados obtidos no processo.

4 Resultados

Nesta fase do trabalho, serão abordados os resultados referentes à caracterização morfológica das amostras, antes da deposição da película intermédia, após a deposição e após a impressão 3D do material polimérico. Através da caracterização morfológica, realiza-se uma etapa importante do trabalho, com o objetivo de garantir a melhor adequação do uso do material, prever o seu desempenho e evitar falhas. É ainda apresentado o comportamento mecânico dos componentes metal/polímero produzidos.

4.1 Caracterização morfológica das superfícies de deposição

A Figura 4.1 ilustra o aspeto da superfície da placa de Al, antes da deposição da película intermédia, sujeita a procedimentos distintos de preparação topográfica, nomeadamente: sem preparação (Figura 4.1a), com preparação por lixamento (Figura 4.1b) e com preparação por texturização, usando profundidades de penetração de 0,1 (Figura 4.1c) e 0,2 mm (Figura 4.1d). Por comparação das diferentes macrografias, é possível observar os diferentes níveis de preparação topográfica, sendo que a rugosidade superficial varia significativamente entre as diferentes condições. Enquanto, nas superfícies não alteradas e lixadas, apenas se identificam ligeiras irregularidades superficiais, nas superfícies sujeitas a texturização mecânica, é possível observar a formação de zonas de acumulação de material (picos) e zonas de ausência de material (vales), de dimensão microscópica. Esta situação resulta da deformação plástica imposta pela ferramenta de texturização na superfície das placas de Al.

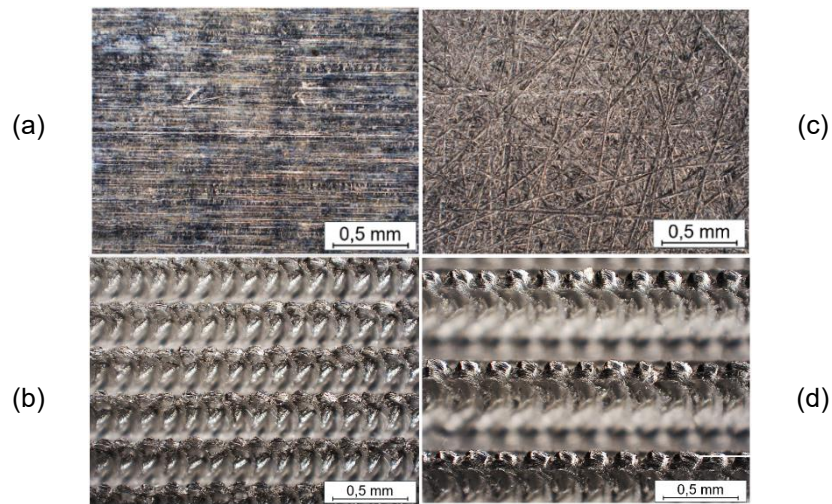


Figura 4.1. Aspeto da preparação superficial dos substratos de Al: (a) Amostra Sp, (b) Amostra Lx (c), Amostras T0,1, e (d) T0,2.

A caracterização topográfica da placa de Al das amostras Lx encontra-se apresentada na Figura 4.2. De acordo com o mapa topográfico (Figura 4.2a), é possível observar uma superfície com reduzida rugosidade. De facto, verifica-se alguma uniformidade superficial, o que está em sintonia com a baixa capacidade de remoção de material de uma lixa, ainda que a utilizada tenha sido P180. Este resultado é corroborado pela quantificação das variações topográficas (Figura 4.2b), onde é possível verificar que as diferenças entre as zonas mais profundas e as mais salientes não excede 4-5 μm .

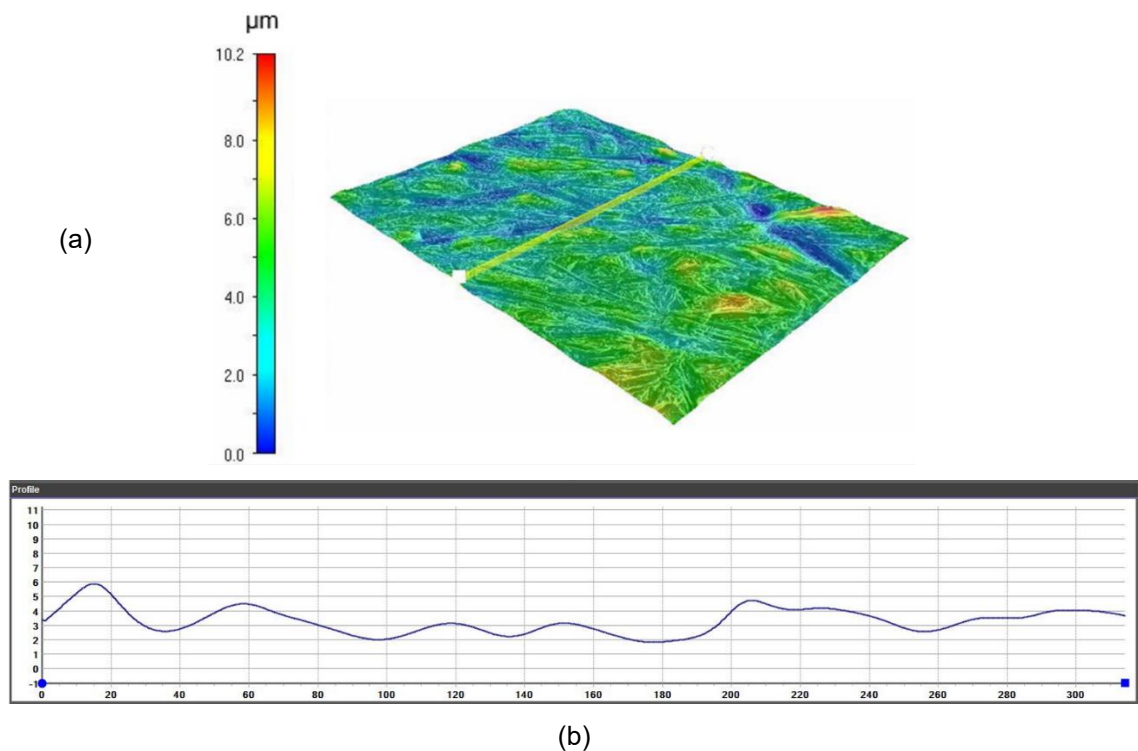


Figura 4.2. Aspeto do substrato de Al de uma amostra Lx (a) Imagens em 3D da dimensão dos picos (b) Curva de quantificação (valores em μm).

Uma situação distinta da verificada para as amostras Lx diz respeito ao observado, na Figura 4.3, para as amostras T0,1, onde a superfície foi sujeita ao procedimento de texturização mecânica, com profundidade de penetração de 0,1 mm. Tanto a partir do mapa (Figura 4.3a) como do perfil (Figura 4.3b), verifica-se uma rugosidade superficial muito mais acentuada. As variações topográficas são significativamente superiores às quantificadas na modificação superficial por lixa, atingindo diferenças entre as zonas mais profundas e as mais salientes na ordem dos 150 μm .

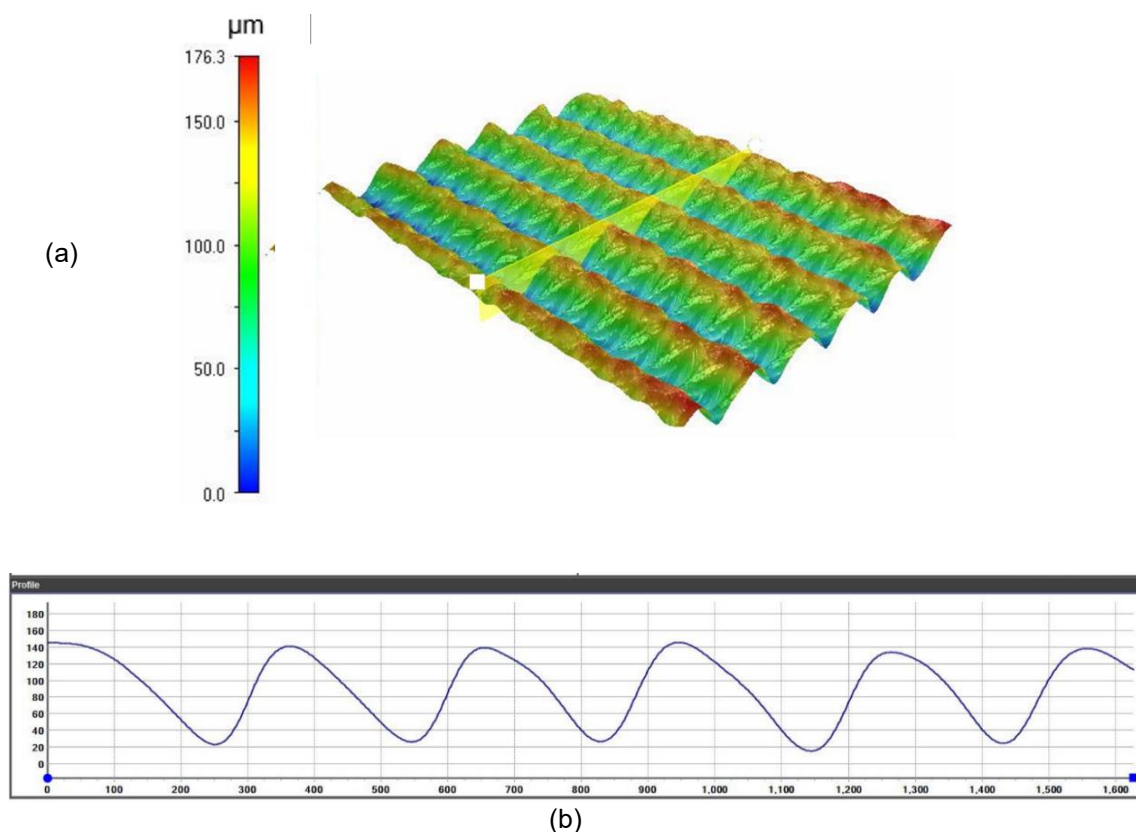


Figura 4.3. Aspecto de substrato de Al T0,1: (a) Imagens em 3D da dimensão dos picos (b) Curva de quantificação (valores em μm).

A caracterização topográfica das amostras T0,2, nas quais foi realizada texturização mecânica com profundidade de penetração de 0,2 mm está ilustrada na Figura 4.4. Na amostra, conforme mostrado no mapa topográfico (Figura 4.4a), verifica-se uma rugosidade superficial mais acentuada e espaçada, isto é, com um menor número de rasgos do que na amostra T0,1. Por meio da quantificação topográfica (Figura 4.4b), observa-se que a preparação superficial apresenta diferenças ainda mais expressivas entre as zonas mais profundas e as mais salientes, quando comparada à modificação por lixamento e texturização menos profunda, alcançando valores da ordem de 350 a 400 μm .

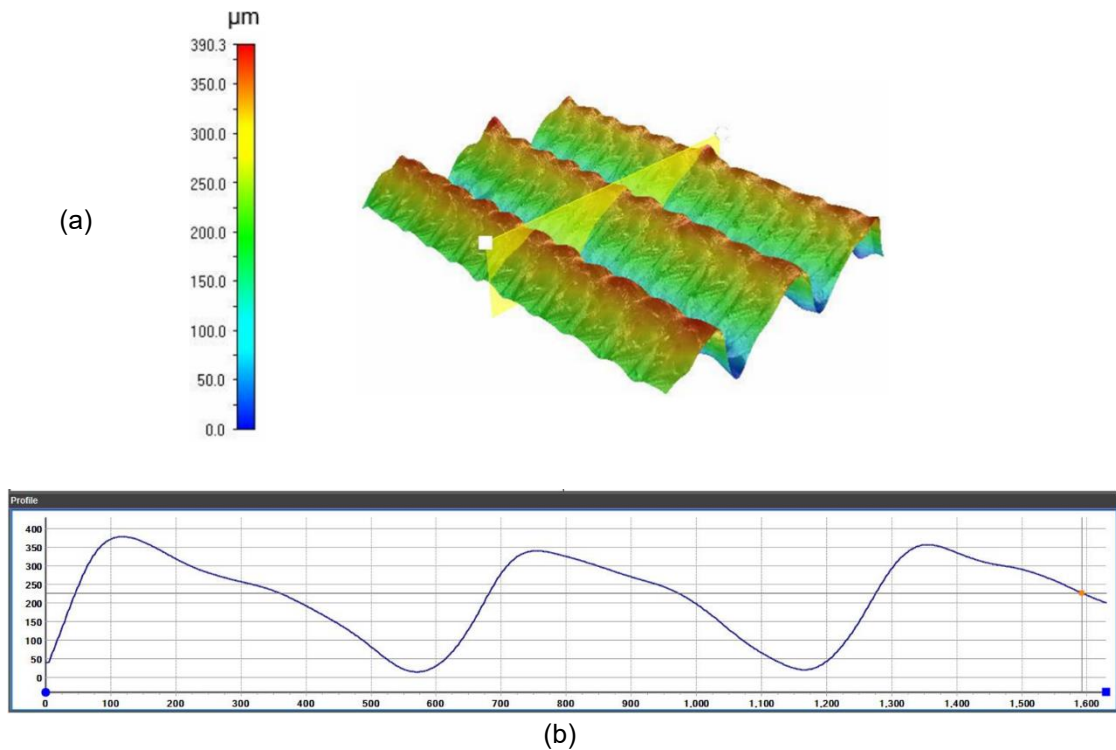


Figura 4.4. Aspecto de substrato de Al T0,2: Imagens em 3D da dimensão dos picos (b) Curva de quantificação (valores em μm).

Na Figura 4.5, as texturas foram analisadas a partir das secções transversais das amostras, observando-se a morfologia e a distribuição das camadas entre as zonas mais profundas e as mais salientes. A acumulação de material do Al removido dos vales concentra-se na própria superfície da amostra, formando picos salientes, também denominados “dentes”. Os vales apresentam uma estrutura uniforme ao longo das ranhuras, diferentemente dos picos, que não são simétricos e exibem um aspeto ligeiramente em forma de gancho. Durante o estudo da união entre metal e polímero por soldadura FSSW, Pereira et al. (2025) destacam que a geometria em gancho favorece a ancoragem mecânica do Al no polímero durante a soldadura, favorecendo a ligação entre os materiais. Na amostra T0,1 (Figura 4.5a), observa-se que os dentes são menores e mais numerosos, enquanto na amostra T0,2 (Figura 4.5b), verifica-se uma menor quantidade de dentes, porém com zonas mais salientes e profundas.

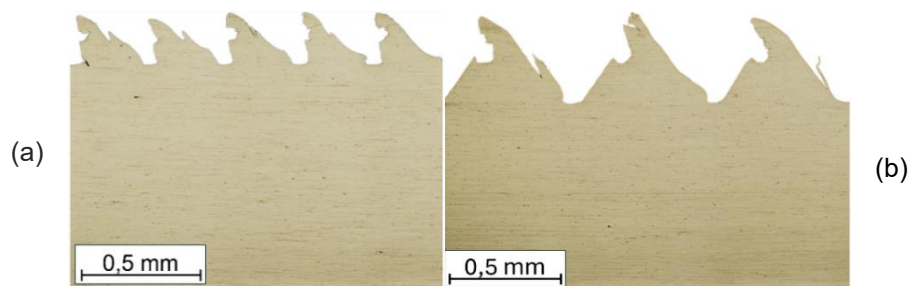


Figura 4.5. Vista da secção transversal das amostras: (a) T0,1, (b) T0,2.

4.2 Caracterização morfológica das superfícies com película

Uma vez realizada a deposição da película no substrato de Al, analisou-se a adesão do polímero à superfície metálica, para as diferentes condições de preparação. A Figura 4.6 ilustra a superfície das placas de Al com a película depositada. No substrato das amostras Sp, se observa uma deposição regular, ainda que, em uma das amostras, (Figura 4.6a), existam algumas sujidades entre o Al e o película, que podem interferir na eficácia da adesão. Na superfície das amostras Lx (Figura 4.6b), parece haver um relevo na camada depositada, o que, aparentemente, pode estar associado a uma molhagem mais imperfeita da superfície pela película aquecida, acarretando uma má adesão. Em relação às texturas, ao observar a amostra T0,1, (Figura 4.6c), não se identificou nenhuma alteração superficial, diferentemente da amostra T0,2 (Figura 4.6d), na qual foram observadas bolhas na película, visíveis tanto em menor quanto em maior ampliação.

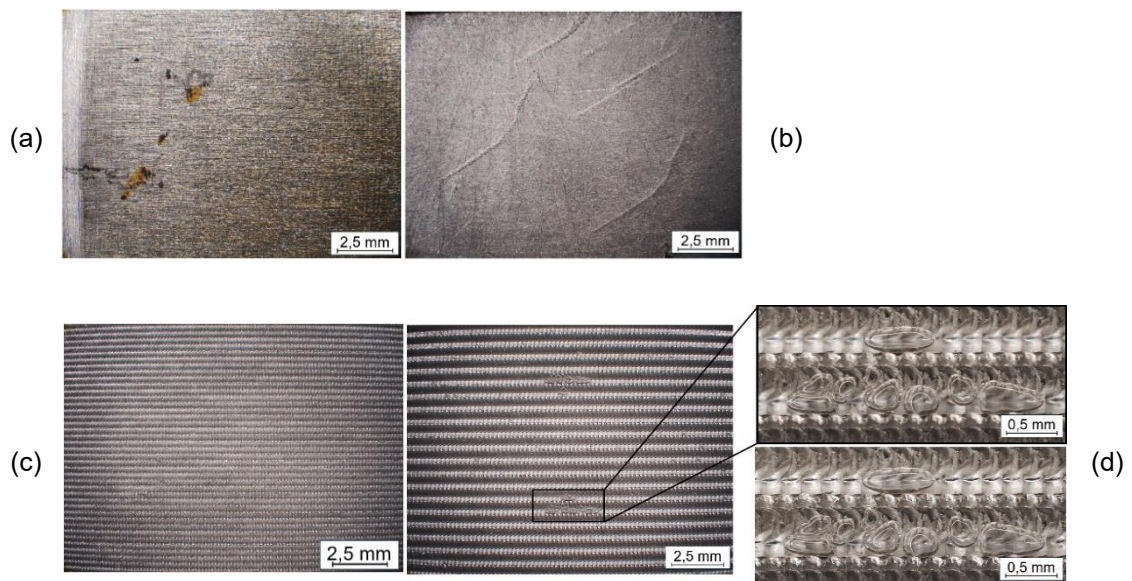


Figura 4.6. Morfologia das amostras com a deposição da película: (a) Sp, (b) Lx, (c) T0,1, (d) T0,2.

4.3 Caracterização morfológica com a deposição do PLA

Após a deposição do polímero sobre a película, realizou-se a análise macro e microscópica das amostras, para se avaliar as condições da adesão na junta híbrida. O aspecto global das amostras híbridas (metal/película/polímero depositado) encontra-se ilustrado na Figura 4.7. A Figura 4.7a referente às amostras Sp, permite identificar falhas de adesão interfacial. Em sintonia com este resultado, a Figura 4.7b, que ilustra o aspecto das mesmas amostras, segundo um ângulo de observação diferente, evidencia uma acentuada deformação e levantamento da película, assim como do PLA impresso.

Em outra amostra Sp (Figura 4.7c) é possível observar, a olho nu, o contorno nítido do levantamento da película na zona do Al sem alteração.

Na amostra Lx (Figura 4.7d), não se observam evidências macroscópicas nítidas de levantamento da película, o que indica uma melhor adesão decorrente das alterações topográficas. Situação semelhante ocorreu nas amostras T0,1 e T0,2, apresentadas nas Figura 4.7e, e Figura 4.7f, nas quais também é visível o contorno da região com falta de adesão. É importante destacar que essa falta de adesão foi observada nas regiões da superfície de Al sem modificações, sugerindo que tanto nas áreas com a texturização mecânica quanto áreas com lixamento, melhoram a adesão da película do substrato de Al.

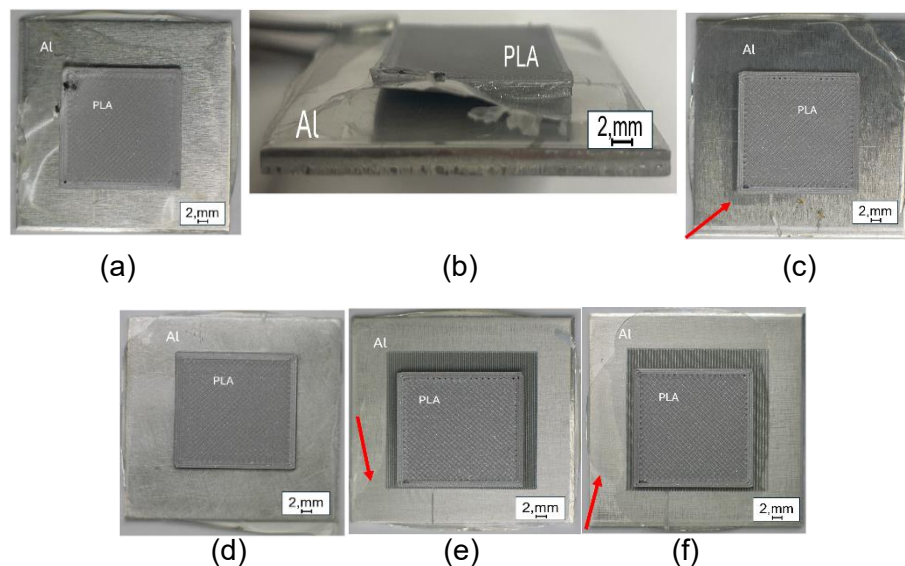


Figura 4.7. Falha de adesão interfacial das amostras; (a), (b), (c) Amostras Sp,(d) Lx, (e) T0,1 (f) T0,2.

Nas vistas da secção transversais das amostras com distintas preparações (Figura 4.8), foi verificada a diferença de adesão da película em suas topografias. Em uma das amostras Lx, (Figura 4.8a), é possível observar, em escala macro, que a película intermédia demonstrou média adesão, sem evidências de levantamentos severos. Por outro lado, nas imagens das amostras Sp (Figura 4.8b), T0,1 (Figura 4.8c) e T0,2 apresentada na Figura 4.8d, nota-se o levantamento das películas nas amostras, exatamente nas regiões que não passaram por qualquer tipo de preparação, nomeadamente: Lixamento e texturização. Este facto ressalta que, à medida que as amostras foram preparadas superficialmente, nomeadamente por lixamento e texturização, a adesão melhorou, especialmente nas amostras T0,1 e T0,2.

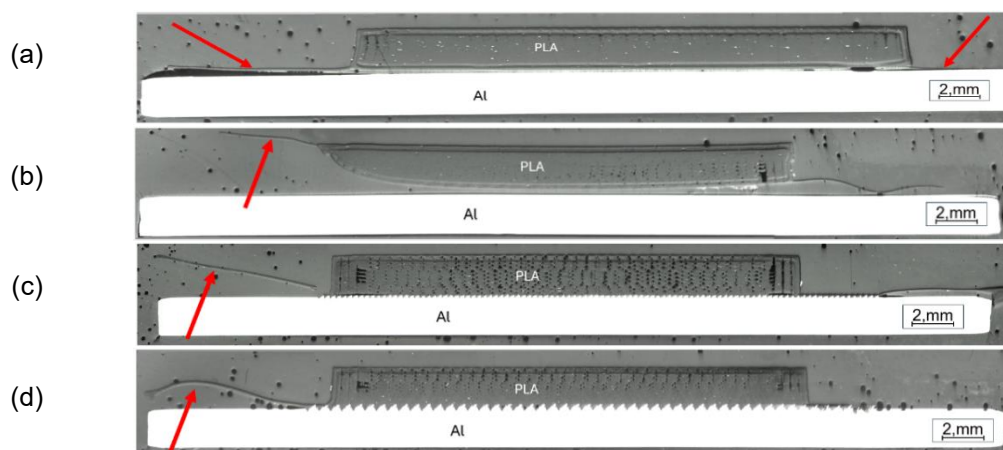


Figura 4.8. Comparativo entre as amostras com e sem preparação superficial: (a) Lx, sem evidência de falha, (b) Sp, (c) T0,1, (d) T0,2, ambos com levantamentos da película.

Nas imagens da Figura 4.9, está em destaque uma parte da secção transversal das amostras. Nas amostras Sp, Figura 4.9a observa-se a presença uma descontinuidade (*Gap*) interfacial, na zona de contato entre o Al e película, em que não ocorreu uma boa adesão. Apesar de, macroscopicamente, as amostras Lx apresentarem uma boa adesão, na Figura 4.9b, a análise microscópica de uma das amostras revelou uma descontinuidade podendo estar relacionado com a espessura não uniforme entre o conjunto Al+película, aquando da deposição do PLA. Situação semelhante foi observada na amostra T0,1, (Figura 4.9c). Na amostra T0,2, Figura 4.9d não se percebe grandes falhas ou descontinuidades, no entanto se verifica o levantamento da película na área do Al sem nenhuma preparação.

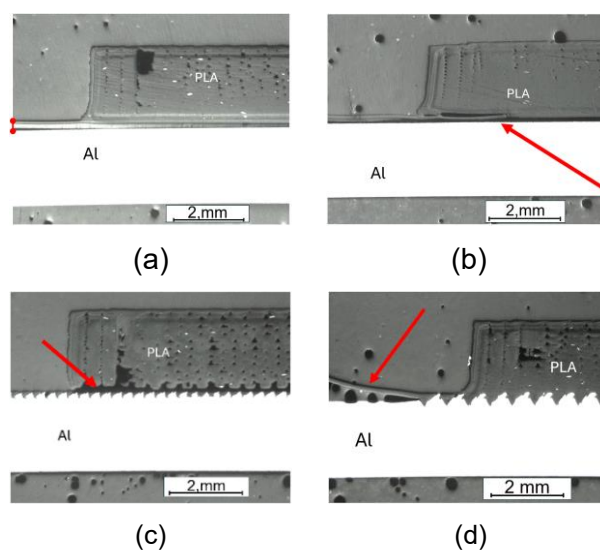


Figura 4.9. Falhas de adesão. (a) Amostra Sp, *Gap* interfacial, (b) Amostra Lx, *Gap*, (c) Amostra T0,1, descontinuidade, (d) Amostra To,2, levantamento da película.

No estudo realizado, o objetivo principal foi perceber por meio das diferentes preparações superficiais do Al, como estas modificações influenciariam e qual das amostras tinham maior potencial para melhorar a adesão da junta híbrida.

Constatou-se defeitos como sujidades, além de relevos e bolhas presentes entre Al e a película, demonstram a importância de se realizar um controle preliminar na limpeza das amostras, para se evitar contaminação das peças. Falck et al. (2018), em seu trabalho de união de materiais distintos, realizaram a limpeza das amostras em banho ultrassônico de etanol por três minutos, para promover melhor adesão da junta híbrida. A presença das bolhas de ar, também pode estar relacionada com algum parâmetro, como a pressão inadequadas no processo *hot press*, ou a temperatura de impressão. Ainda foi observado falhas de adesão entre os materiais, levantamento da película e do PLA impresso, e em certas amostras, uma descontinuidade/*Gap*.

Na preparação topográfica, as amostras sofreram modificações em suas topografias. Por meio de análises morfológicas, constatou-se que as zonas alteradas, apresentaram melhor adesão em comparação com as regiões onde não houve modificação. Essas observações sugerem que a preparação superficial influencia na qualidade da junta. Falck et al. (2018), utilizou uma camada homogênea de revestimento, e pulverizou a superfície das amostras com material abrasivo Coríndon (Al_2O_3), de forma a aumentar a rugosidade e melhorar a adesão da junta, além de otimizar os parâmetros de temperatura de impressão, velocidade e espessura de deposição e número de contornos.

Um único parâmetro ou a associação deles, podem influenciar na falha de adesão, pois caso a temperatura do filamento ou da mesa de impressão não estiverem adequadas, podem refletir na má união entre os materiais, acarretando falha de adesão. Ozlati et al. (2019), demonstraram que ao aumentar a temperatura do substrato polimérico e do filamento a um valor otimizado, se obtém uma melhor ligação entre os materiais, contribuindo para uma melhor união da junta polimérica.

Também foram observadas falhas de adesão através do levantamento das películas e, através dos contornos observados ao redor do PLA, vistos na Figura 4.7. Parâmetros como a pressão aplicada a prensa ou a temperatura das placas aquecidas, presentes no processo *hot press*, podem ter influenciado na adesão da junta híbrida entre o Al/PLA. Ozlati et al. (2019), constataram que o pré-aquecimento das folhas de base, resultou na fusão da superfície do polímero, promovendo uma ligação coerente, com um aumento da resistência da junta e da força de adesão das camadas depositadas.

Na análise morfológica, as espessuras do conjunto Al+película intermédia variaram entre 2,11 mm e 2,23 mm, observou-se que esta variação, pode ter causado descontinuidades/*Gap* na interface, devido a não uniformidade de suas medidas, afetando a qualidade da adesão.

Por fim, constatou-se que as amostras submetidas a preparações em suas topografias apresentaram uma adesão muito superior às áreas que não sofreram qualquer tipo de modificação, em concordância com a constatação de Pereira et al. (2025), que também verificaram esse comportamento em seus estudos sobre a adesão de juntas metal/polímero obtidas por texturização da superfície de amostras de Al.

4.4 Ensaios de tração/corte.

Após a preparação das amostras, procedeu-se a caracterização mecânica. Apenas foram testadas as amostras T0,1, a ideia inicial era ser igualmente testadas as T0,2, mas por questões relacionadas a concepção destas amostras, não foi possível testá-las. Dos cinco provetes testados, dois falharam prematuramente, separando-se durante a preparação, ao apertar as amarras. Três delas apresentaram resultados distintos, conforme a Figura 4.10. Apesar de as amostras terem sido submetidas às mesmas condições de preparação e aos mesmos parâmetros nos testes de tração/corte, elas apresentaram resistências diferentes, observando-se uma acentuada variação na intensidade da força que cada uma pôde suportar, e os resultados oscilaram entre 175 e 325 N. Quanto à deformação, os valores foram muito reduzidos para forças distintas, ainda que a deformação apresentada tenha sido aproximadamente a mesma para as três amostras, em torno de 0,2 mm, o que indica a necessidade de uma otimização mais precisa do processo. Quanto à adesão da película, a texturização mostrou-se eficaz, evidenciada pela boa aderência da película ao Al.

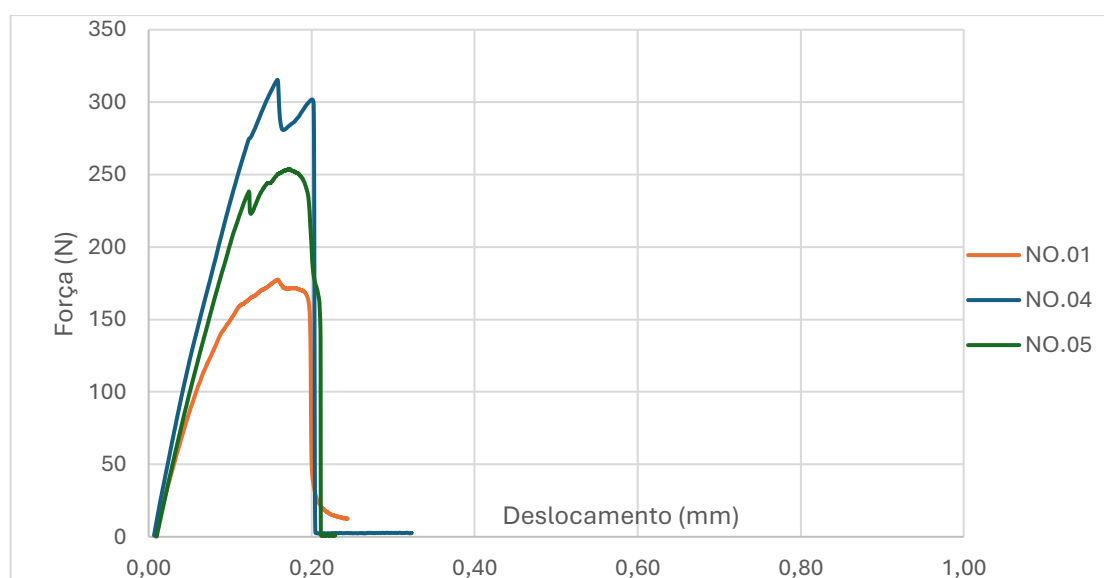


Figura 4.10. Curva força/deslocamento

Houve a separação completa entre os dois materiais durante o ensaio (Figura 4.11), com a falha ocorrendo na interface de ligação entre a película e o PLA, o que mostra

que as condições de adesão entre os materiais depositados por impressão 3D não são as melhores, e que este aspecto requer ainda uma forte otimização. A película apresentou áreas danificadas. Nessas regiões, o material polimérico impresso pode ter tido contato mais direto com a textura do Al, devido à irregularidade da espessura da película, o que resultou numa ligação local mais resistente. Já a película de PLA permaneceu fortemente aderida ao Al, devido à ancoragem promovida pelo processo de texturização topográfica.

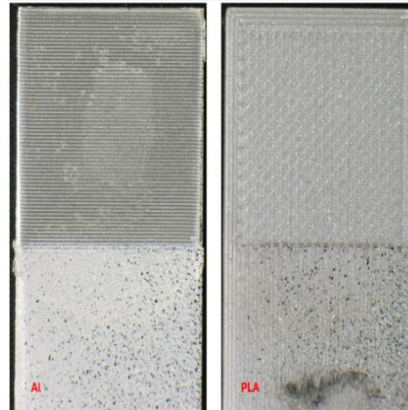


Figura 4.11. Amostra T0,1, submetida ao teste de tração.

Os mapas de deformação (deformação equivalente de von Mises), obtidos por correlação de imagens digitais (no instante da força máxima), encontram-se ilustrados na Figura 4.12. A partir dos mapas de deformação, é possível observar que, em sintonia com o indicado pela curvas forças-deslocamento, a deformação apresentada pelos provetes foi muito reduzida. Ainda assim, verificar-se que os maiores valores de deformação foram atingidos na interface dos provetes, onde a rotura se veio a verificar. Estes resultados demonstram a necessidade de se definirem condições mais apropriadas para uma boa adesão entre a película intermédia e o material polimérico depositado por impressão 3D. A fraca adesão entre estes constituintes das amostras leva à rotura prematura dos componentes, para baixos valores de força e de deformação.

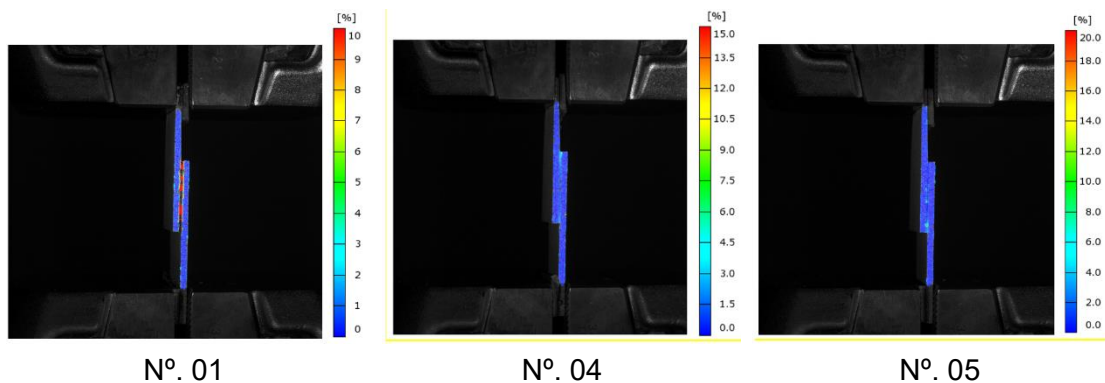


Figura 4.12. Mapas de deformação dos provetes de tração/corte, obtidos por correlação de imagens digitais.

Após a realização das caracterizações morfológicas, procederam-se aos ensaios de tração/corte e à análise dos mapas de deformação. Estes mapas permitiram identificar as regiões de maior deformação e, conseqüentemente, a área onde efetivamente ocorreu a rotura do material. Com base nos resultados obtidos, foi possível estabelecer as conclusões do trabalho e apresentar sugestões para um trabalho futuro.

5 Conclusão e trabalho futuro

5.1 Conclusões

Se desenvolveu um estudo destinado a analisar as condições de deposição entre Al e polímero por impressão 3D, pelo método de FDM, para se avaliar a melhor condição de adesão da junta híbrida.

Os resultados das caracterizações das amostras demonstraram que, além da otimização dos parâmetros de impressão, a preparação das superfícies exerce grande influência na qualidade da adesão da junta híbrida. Observou-se que a maioria das regiões das amostras que não passaram por nenhum tipo de modificação superficial não apresentaram adesão satisfatória, exibindo falhas de adesão exatamente nessas áreas. Verificou-se também que a utilização da película intermediária proporcionou uma melhoria na adesão entre o Al e o PLA impresso, especialmente nas regiões onde houve modificação superficial, tanto nas zonas submetidas ao lixamento quanto nas zonas texturizadas. Nessas últimas, observou-se uma adesão ainda mais eficiente. No entanto, a não uniformidade dessa película ocasionou algumas descontinuidades na adesão entre esses materiais.

Os testes de tração revelaram que, embora as amostras tenham sido submetidas às mesmas condições de preparação, elas apresentaram diferentes comportamentos mecânicos, em concreto, diferenças na força, já que a deformação foi parecida em ambos os casos. Ainda assim, as preparações que envolveram lixamento e texturização favoreceram uma melhor aderência da película intermediária ao Al, demonstrando-se eficazes na ancoragem promovida pelas modificações topográficas realizadas nas amostras. No entanto, ainda há muito trabalho a ser realizado no sentido de otimizar os parâmetros, de modo a obter uma melhor adesão, sobretudo uma união mais eficiente entre o PLA impresso e a película intermédia.

5.2 Trabalho futuro

A continuação deste estudo traz grandes benefícios para o aprimoramento da adesão entre esses componentes, resultando em um componente mais leve e alternativo para a indústria de forma geral. O estudo de alternativas envolvendo diferentes materiais, não apenas Al e o PLA, mas também o uso de magnésio em substituição ao Al, ou ainda de filamentos de PLA modificados, como compósitos com partículas ou fibras de reforço, por exemplo, de carbono, pode contribuir para que esse polímero apresente uma adesão ainda maior à película intermédia impressa a quente, favorecendo assim a união do conjunto Al + película + PLA impresso. Da mesma forma, seria interessante investigar outras alternativas para o processo de deposição da película intermédia, como por exemplo, o material do próprio filamento ao invés de *pellets* de PLA, com o objetivo de se obter uma adesão ainda mais eficiente.

Referências bibliográficas

- Abreu, T.; Leal, R.M.; Leitão, C.; Galvão, I. Metal–Polymer Joining by Additive Manufacturing: Effect of Printing Parameters and Interlocking Design. *J. Manuf. Mater. Process.* 2024, (5), 228. DOI: 10.3390/jmmp8050228.
- Abreu, Ana Tereza Nunes, A. Optimization of the joining procedure in multimaterial components by additive technology. Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2024.
- Alhmodi, A., Sheikh-Ahmad, J., Almakari, F., & Bojanampati, S. (2023). Joining of polymer to metal using material extrusion additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12409-7>
- Akash Bhatia, Anuj Kumar Sehgal, Additive Manufacturing materials, methods and applications: A review, *Materials Today: Proceedings*, Volume 81, Part 2, 2023, Pages 1060-1067, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.379>.
- Argyros, A.; Maliaris, G.; Michailidis, N. The role of interface in joining of 316 L stainless steel and polylactic acid by additive manufacturing. *CIRP Ann.* 2023. DOI: 10.1016/j.cirp.2023.04.032
- ASTM, Online Browsing Platform (OBP). ISO/ASTM 52900:2021. Disponível em: (acesso em: dezembro, 01,2024).
- Barry, Berman, '3-D printing: The new industrial revolution', *Bus Horiz*, vol. 55, no. 2, pp. 155–162, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
- Bhatia, A.; Sehgal, A. K. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Mater. Today* is 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.379.
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2015). Additive Manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- Callister, Jr. William D., David G. Rethwisch. *Ciência e engenharia de materiais*. Rio de Janeiro: LTC, - 9. ed. 2016.
- Coutinho, Ana Rita Ferreira. Soldadura Multimaterial de Ligas Leves a Componentes Poliméricos Fabricados por Impressão 3D. Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2024.
- Czyżewski, P.; Marciniak, D.; Nowinka B.; Borowiak, M.; Bieliński, M. Influence of Extruder's Nozzle Diameter on the Improvement of Functional Properties of 3D-Printed PLA Products. *Polymers* 2022, 14 (2), 356. DOI: 10.3390/polym14020356.
- Elhadad, A. A.; Rosa-Sainz, A.; Cañete, R.; Peralta, E.; Begines, B.; Balbuena, M.; Alcudia, A.; Torres, Y. Applications and multidisciplinary perspective on 3D printing techniques: Recent developments and future trends. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 2023, 156, 100760. DOI: [10.1016/j.mser.2023.100760](https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100760)
- Gajbhiye, T. S.; Waghmare, S.; Dhande, M.; Gondane, R.; Giripunje, M.; Shelare, S.; Belkhode, P. Polymer Composite Additive Manufacturing: Applications, Challenges and Opportunities. *Mater. Today* 2024. DOI: 10.1016/j.matpr.2024.06.013.
- Garrafas PET. Disponível em: <https://www.plasticstoday.com/>. (acesso em: dezembro, 10,2024).

- Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M. *Additive Manufacturing Technologies*; Springer International Publishing: Cham, 2021. DOI: [10.1007/978-3-030-56127-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7)
- Gordeev, E. G.; Galushko, A. S.; Ananikov, V. P. Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling. *PLOS ONE* 2018, 13 (6), n° e0198370. DOI: 10.1371/journal.pone.0198370.
- Hausöl, T.; Höppel, H.W.; Göken, M. Microstructure and mechanical properties of accumulative roll bonded aluminium alloy AA5754. *Journal of Physics: Conference Series* 2010, 240, 012128. DOI: [10.1088/1742-6596/240/1/012128](https://doi.org/10.1088/1742-6596/240/1/012128)
- Kamer, M. S. Temiz, Ş.; Yaykasli, H. Kaya, A; Akay, O. Effect of printing speed on FDM 3D-Printed PLA Samples produced using different two printers. *Int. J. 3D Print. Technol. Digit. Ind.* 2022b. DOI: 10.46519/ij3dptdi.1088805.
- Kumar, R.; Kumar, M.; Singh Chohan, J.; Kumar, S. Effect of process parameters on surface roughness of 316L stainless steel coated 3D printed PLA parts. *Materials Today: Proceedings* 2022. DOI: [10.1016/j.matpr.2022.06.004](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.004)
- Kharat, V. J.; Singh, P.; Sharath Raju, G.; Kumar Yadav, D.; Satyanarayana.Gupta, M.; Arun, V.; Hussein Majeed, A.; Singh, N. Additive Manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Mater. Today* 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.11.033.
- Leitão, C.; Galvão, I.; Leal, R. M.; Rodrigues, D. M. Determination of local constitutive properties of aluminium friction stir welds using digital image correlation. *Materials & Design* 2012, 33, 69–74. DOI: [10.1016/j.matdes.2011.07.009](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.009)
- Memarzadeh, A.; Safaei, B.; Tabak, A.; Sahmani, S.; Kizilors, C. Advancements in Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composites: A Systematic Review of Techniques and Properties. *Mater. Today Commun.* 2023, 106449. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106449.
- Miguel Ribeiro Fernandes, R. ESTUDO DA LIGAÇÃO METAL/POLÍMERO ATRAVÉS DE IMPRESSÃO 3D. Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2023.
- Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa. *Prusa3D by Josef Prusa*, s.d. <https://www.prusa3d.com/category/pla/> (acedido em 29/05/2025)
- Ozlati, A.; Movahedi, M.; Tamizi, M.; Tartifzadeh, Z.; Alipour, S. An alternative additive manufacturing-based joining method to make Metal/Polymer hybrid structures. *J. Manuf. Process.* 2019, 45, 217–226. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.07.002.
- Pellets PLA. *Filament2Print*, s.d. <https://filament2print.com/pt/pla/688-pellets-pla.html> (acedido em 13/10/2025)
- Pereira, M. A. R.; Galvão, I.; Costa, J. D. M.; Amaro, A. M.; Leal, R. M. Metal-polymer friction stir spot welding enhanced by meso-mechanical interlocking. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2025, . DOI: [10.1007/s00170-025-15105-w](https://doi.org/10.1007/s00170-025-15105-w)
- Pereira, M. A. R.; Galvão, I.; Silva, C. L.; Costa, J. D. M.; Amaro, A. M.; Leal, R. M. Influence of the mechanical grooving surface pretreatment on metal–polymer joining by friction stir spot welding. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2025, 25 (4). DOI: [10.1007/s43452-025-01240-4](https://doi.org/10.1007/s43452-025-01240-4)
- Prusament PLA Galaxy Silver 1kg | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa. *Prusa3D by Josef Prusa*, s.d. <https://www.prusa3d.com/product/prusament-pla-galaxy-silver-1kg/>(acedido em 29/05/2025)
- Rajendran, S.; Palani, G.; Kanakaraj, A.; Shanmugam, V.; Gadek, S.; Korniejenko, K.; Marimuthu, U. Metal and Polymer Based Composites Manufactured Using Additive Manufacturing—A Brief Review. *Polymers* 2023, 15 (11), 2564. DOI: 10.3390/polym15112564.
- Šedivka, P.; Bomba, J.; Böhm, M.; Boška, P. Influence of Temperature on the Strength of Bonded Joints. *BioResources* 2015, 10 (3). DOI: 10.15376/biores.10.3.3999-4010.
- Shashikumar, S.; Sreekanth, M. S. The effect of printing parameters on tensile properties of thermoplastics prepared by fused deposition modeling (FDM) based additive manufacturing technique. *Mater. Today* 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.06.212.

- Silvestri, A. T.; Parodo, G.; Napolitano, F.; El Hassanin, A.; Scherillo, F.; Sorrentino, L.; Squillace, A. Cold formability of friction stir processed 5754-H111 and 6082-T6 aluminum alloys: an experimental and numerical study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2024. DOI: [10.1007/s00170-024-13218-2](https://doi.org/10.1007/s00170-024-13218-2)
- SUNLU 3d printer filament - SUNLU official online store. *Affordable 3D Printing Filaments and Resins*, s.d. https://www.sunlu.com/collections/3d-printer-filament?gad_source=1&gad_campaignid=23041931927&gclid=Cj0KCQjw3OjGBhDYARIsADd-uX78uEX95jxT_TTrEOTJR3XhwEpB3iColGKF-r6lqA7_XsMaQkK9MAaAqYZEALw_wcB (acedido em 29/05/2025).
- Szot, W., & Rudnik, M. (2024). Effect of the Number of Shells on Selected Mechanical Properties of Parts Manufactured by FDM/FFF Technology. *Advances in Materials Science*, 24(1), 86–103. <https://doi.org/10.2478/adms-2024-0006>
- The ACS Style Guide: *effective communication of scientific information* - 3rd ed, 2006.
- Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, David Hui, Additive Manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, Volume 143, 2018, Pages 172-196, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- Vafadar, A.; Guzzomi, F.; Rassau, A.; Hayward, K. Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. *Appl. Sci.* 2021, 11 (3), 1213. DOI: 10.3390/app11031213.
- Volpato, Neri. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*; Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 2018.