

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E MANUFATURA

LUCAS ALEXANDRE MORAIS

Deposição de Energia Direcionada a Laser e Pó: Análise dos parâmetros de
processo para a liga de Inconel 718 em substrato de aço inoxidável 316

São Carlos

2023

LUCAS ALEXANDRE MORAIS

Deposição de Energia Direcionada a Laser e Pó: Análise dos parâmetros de processo para a liga de Inconel 718 em substrato de aço inoxidável 316

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Assoc. Alessandro Roger Rodrigues

Coorientador: Eng. MSc. Vincent Edward Wong Diaz

São Carlos

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M933d Moraes, Lucas
Deposição de Energia Direcionada a Laser e Pó:
Análise dos parâmetros de processo para a liga de
Inconel 718 em substrato de aço inoxidável 316 / Lucas
Moraes; orientador Alessandro Roger Rodrigues;
coorientador Vincent Edward Wong Diaz. São Carlos,
2023.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais
e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2023.

1. Manufatura aditiva. 2. Deposição por energia
direcionada a laser (LP-DED). 3. Inconel 718. 4.
Parâmetros de processo. 5. Linhas de deposição. I.
Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato / Student: Lucas Alexandre Moraes
Título do TCC / Title: Deposição de Energia Direcionada a Laser e Pó: Análise dos parâmetros de processo para a liga de Inconel 718 em substrato de aço inoxidável 316.
Data de defesa / Date: 13/07/2023

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / Result
Professor Alessandro Roger Rodrigues (orientador)	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SEM	
Mestre Vincent Edward Wong Diaz	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SEM	
Professora Zilda de Castro Silveira	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SEM	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee



Professor Alessandro Roger Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial aos meus pais, Márcia Morais e Lourival Morais, e ao meu irmão, Marcelo Morais, por serem exemplo de dedicação e esforço durante toda a minha vida, por todo suporte, confiança e investimento realizado para que eu pudesse realizar esse sonho.

Agradeço à minha companheira Maria Eduarda por todo incentivo durante todos os períodos da minha vida, apoio e carinho incondicional.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Alessandro Roger, pela oportunidade, confiança, suporte e orientação que certamente foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos pelo incentivo e compreensão durante essa jornada.

Agradeço ao Vincent, por todo suporte, paciência, confiança e direcionamento durante esse trabalho.

E agradeço também a todos àqueles que de forma direta ou indireta fizeram parte desse período de graduação e que certamente contribuíram para o meu desenvolvimento nesta fase.

Agradeço a USP - Universidade de São Paulo por me acolher e dispor de toda sua infraestrutura durante toda a graduação.

RESUMO

MORAIS, L. A. **Deposição de Energia Direcionada a Laser e Pó: Análise dos parâmetros de processo para a liga de Inconel 718 em substrato de aço inoxidável 316.** 2023. 45 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

A manufatura aditiva tem se destacado como um dos pilares que sustentam a quarta revolução industrial, permitindo novas soluções para a indústria e a ciência. Diversos estudos têm sido realizados com o intuito de viabilizar a fabricação de peças por manufatura aditiva em ambientes laboratoriais e industriais devido às vantagens inerentes deste processo, como a capacidade de produzir peças otimizadas com requisitos geométricos complexos, componentes com geometrias que oferecem menor peso, ou aplicações específicas nas quais os procedimentos convencionais de fabricação são muito demorados, caros ou difíceis. Estas vantagens têm contribuído com o complemento desta tecnologia nos processos tradicionais de manufatura. Dentre os processos de manufatura aditiva, a deposição de energia direcionada baseada em laser e pó (*Laser Powder - Directed Energy Deposition* LP-DED) tem se destacado por sua versatilidade para criar peças em menor tempo de fabricação, com grande volume e possibilidade de modificar a microestrutura a partir da variação de densidade de energia associada aos parâmetros de processo. Um dos desafios encontrados no processo de LP-DED tem sido encontrar os parâmetros de processo para cada material e substrato utilizado. Estes parâmetros dependem de fatores como a morfologia, o tamanho da partícula, e as propriedades químicas, reológicas, térmicas de cada material. O objetivo deste trabalho consistiu em encontrar os parâmetros de processo da liga de Inconel 718 com substrato de aço inoxidável 316. Inicialmente, aspectos relacionados à morfologia do pó e tamanho da partícula foram analisados. Na sequência, linhas de deposição foram criadas para encontrar os parâmetros de processo, incluindo potência do laser e taxa de fluxo de pó. Utilizou-se uma potência de 375 W até 450 W, tendo um incremento de 25 W para cada pista de deposição e taxa de fluxo de pó de 2,0 até 4,5 g/min com o incremento de 0,5 g/min para cada pista de deposição. Por fim, analisou-se a qualidade dos cordões de deposição por meio de três critérios. O primeiro critério foi a inspeção visual, o segundo critério foi a relação altura-largura e o terceiro critério foi a diluição. Dessa forma, obteve-se os seguintes parâmetros ideais de processo: potência de 375 a 450 W com taxa de alimentação de 3,0 e 3,5 g/min, e potência de 425 a 450 W com taxa de alimentação de 4,0 g/min.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Deposição por energia direcionada a laser (LP-DED); Inconel 718; Parâmetros de processo; Linhas de deposição.

ABSTRACT

MORAIS, L. A. **Laser Powder - Directed Energy Deposition: Process parameters analysis for Inconel 718 alloy on stainless steel 316 substrate**. 2023. 45 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Additive manufacturing has stood out as one of the pillars that support the fourth industrial revolution, allowing new solutions for industry and science. Several studies have been conducted in order to enable the manufacturing of parts by additive manufacturing in laboratory and industrial environments due to the inherent advantages of this process, such as the ability to produce optimized parts with complex geometric requirements, components with geometries that offer less weight, or specific applications in which conventional manufacturing procedures are too time-consuming, expensive, or difficult. These advantages have contributed to the complement of this technology in traditional manufacturing processes. Among the additive manufacturing processes, Laser Powder - Directed Energy Deposition (LP-DED) has stood out for its versatility to create parts in shorter manufacturing time, with large volume and the possibility to modify the microstructure by varying the energy density associated with the process parameters. One of the challenges encountered in the LP-DED process has been to find the process parameters for each material and substrate used. These parameters depend on factors such as morphology, particle size, and the chemical, rheological, thermal properties of each material. The objective of this work was to find the process parameters for Inconel 718 alloy with 316 stainless steel substrate. Initially, aspects related to powder morphology and particle size were analyzed. Next, deposition lines were created to find the process parameters, including laser power and powder flow rate. Power from 375 W to 450 W was used, with an increment of 25 W for each deposition lane and powder flow rate from 2.0 to 4.5 g/min with the increment of 0.5 g/min for each deposition lane. Finally, the quality of the deposition strands was analyzed using three criteria. The first criterion was visual inspection, the second criterion was the height-to-width ratio, and the third criterion was dilution. Thus, the following ideal process parameters were obtained: 375 to 450 W power with feed rates of 3.0 and 3.5 g/min, and 425 to 450 W power with feed rates of 4.0 g/min.

Keywords: Additive manufacturing; Laser Powder - Directed Energy Deposition; Inconel 718; Process parameters; Deposition tracks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Processos de manufatura aditiva conforme a condição de matéria prima.....	18
Figura 2: Direções de deposição. (a) Alternada e (b) Paralela.	19
Figura 3: Esquema de Processo L-DED.....	20
Figura 4: Desenho esquemático representativo da zona afetada por calor.	21
Figura 5: Parâmetros de processo.	23
Figura 6: Imagem de seção transversal e características geométricas do cordão de deposição.	25
Figura 7: Diagrama esquemático de defeitos gerados em seções transversais de acordo com a potência do laser e taxa de alimentação do pó.....	26
Figura 8: Seção transversal da pista única depositada indicando características geométricas e divisão de diferentes regiões.	32
Figura 9: Pó de Inconel 718: a) Morfologia e b) distribuição do tamanho de partícula.	34
Figura 10: Perfil do cordão depositado por LP-DED.	35
Figura 11: Geometria do cordão para diferentes faixas de potências de laser e taxa de alimentação de pó.	37
Figura 12: Resultados do teste de dureza na região superior, intermediária e inferior, para o fluxo de pó (g/min) (a) 2,0, (b) 2,5, (c) 3,0, (d) 3,5, (e) 4,0 e (f) 4,5.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição nominal da liga Inconel 718.....	26
Tabela 2: Efeito dos principais elementos da liga Inconel 718 em suas propriedades.	28
Tabela 3: Composição química da liga Inconel 718.....	30
Tabela 4: Parâmetros de processos de LP-DED.....	31
Tabela 5: Comparação da composição química percentual do material fornecido pelo fabricante em relação ao EDX realizado.	33
Tabela 6: Valores de relação altura-comprimento e diluição de acordo com os parâmetros utilizados.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	–	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CFC	–	Cúbico de face centrada
UNS	–	<i>Unified Numbering System</i>
DED	–	<i>Directed Energy Deposition</i>
MA	–	Manufatura Aditiva
3D	–	Três dimensões
L-DED	–	Deposição por energia direcionada a laser
CAD	–	<i>Computer-aided design</i>
CNC	–	Controle Numérico Computadorizado
PBF	–	<i>Powder bed fusion</i>
EDX	–	Espectroscopia de raios X por energia dispersiva

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
δ	Delta
σ	Sigma
γ	Austenita
η	Laves

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3.1. Manufatura Aditiva.....	17
3.1.1. Deposição Direcionada de Energia.....	19
3.2. Parâmetros de Processo.....	22
3.3. Liga de Inconel 718	26
3.4. Dureza da liga de Inconel.....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1. Montagem Experimental.....	30
4.2. Caracterização do pó de Inconel 718.....	31
4.3. Caracterização de faixa única.....	31
4.4. Microdureza.....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1 Análise morfológica e química do Inconel 718	33
5.2. Análise das pistas únicas depositadas.....	34
5.3. Análise da Microdureza	37
6. CONCLUSÃO.....	40
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial, chamada de Indústria 4.0, marcou o século XXI com a automação e produtividade nos processos industriais e engloba um amplo sistema de tecnologias avançadas como robótica, internet das coisas, *big data*, manufatura aditiva, computação em nuvem, inteligência artificial, entre outros. A manufatura aditiva transformou o modo de como os produtos são fabricados, por isso é considerado um dos pilares da revolução industrial e trouxe a prototipagem rápida, um processo de fabricação que visa diminuir o desperdício e o tempo de fabricação, como uma alternativa aos processos convencionais de subtração de materiais, como usinagem e fundição. Com o avanço da manufatura aditiva, foi possível desenvolver peças de geometrias complexas com um menor custo, que, se comparada ao método tradicional, seriam necessárias ferramentas específicas como moldes, o que torna esse processo oneroso.

Dentre os processos de manufatura aditiva, a deposição por energia direcionada a laser (L-DED) tem se destacado em diversas áreas, como aeronáutica, petroquímica, automotiva, entre outras. As principais vantagens desta técnica são a possibilidade de produzir peças grandes, materiais funcionalmente graduados e reparar componentes desgastados. Um dos desafios na manufatura de componentes por L-DED é a otimização dos parâmetros de processo, que geralmente é realizada por meio de uma extensa investigação experimental. No entanto, esse tipo de experimento é extremamente demorado e caro. Diante disso, a escolha do modelo adequado para o estudo dos parâmetros de processo são de suma importância dado o custo dos testes físicos, exigência de fabricação de alta qualidade e redução de gastos na fase de *setup* de processo, evitando desperdícios de tempo e material. A técnica L-DED requer o uso de uma combinação adequada de parâmetros de processo para obter peças de alta qualidade. Quando um novo pó precisa ser processado, é essencial definir parâmetros principais, como a taxa de alimentação do pó, potência do laser e velocidade de varredura. Esses parâmetros influenciam não apenas a morfologia e a estabilidade de cada trilha, mas também seu comportamento de solidificação e microestrutura resultante.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Encontrar os parâmetros ideais de processo, tais como potência do laser, taxa de alimentação de pó e velocidade de varredura da liga de Inconel 718 a partir da criação de linhas de deposição usando LP-DED, utilizando como substrato o aço inoxidável 316.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar visualmente as linhas de deposição em busca de linearidade, queima e não linearidade ao longo do cordão;
- Analisar a qualidade geométrica do cordão a partir dos parâmetros de processos, tais como altura do cordão, profundidade de penetração do substrato, largura do cordão e área de profundidade de penetração;
- Estabelecer a melhor combinação dos parâmetros de processo por meio das análises de diluição e da razão altura-largura.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (MA), também chamada de impressão 3D ou prototipagem rápida, transformou o modo como os produtos são fabricados, por isso é considerado um dos pilares da quarta revolução industrial. É um processo de fabricação que consiste na adição do material, camada a camada, até formar uma peça a partir de um modelo 3D computadorizado sem a necessidade de moldes e ferramentas (LI et al, 2020; KRUTH et al, 1998). O processo de MA começou a ser utilizado por Charles Hull em 1986 por meio do processo de estereolitografia utilizando resina líquida como matéria-prima. Por meio de uma reação de cura, cada camada desta resina era transformada para o estado sólido (KRUTH et al, 1998; COELHO et al, 2018).

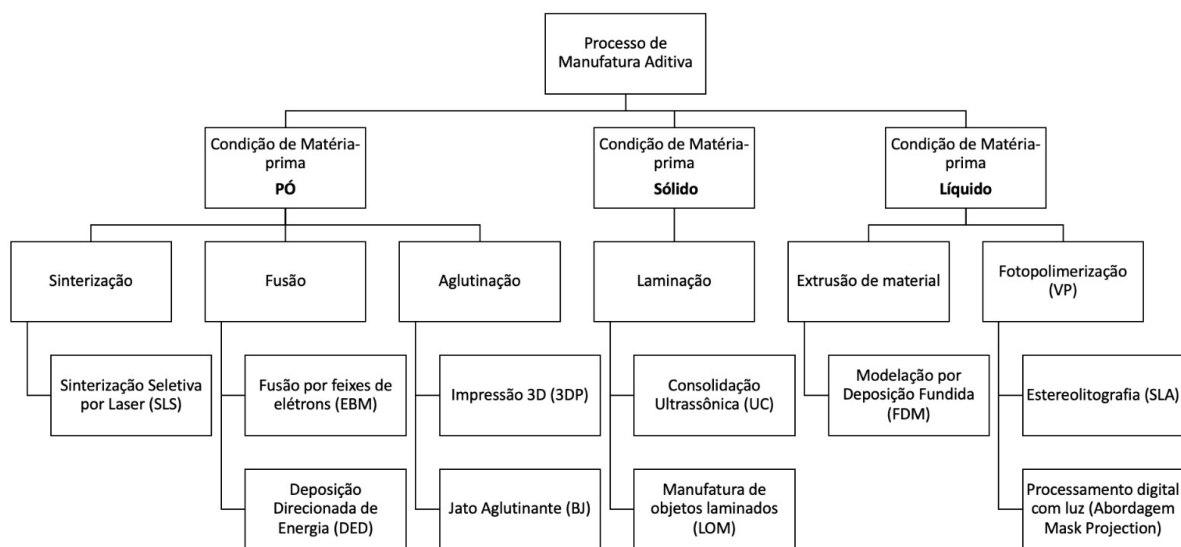
Atualmente, a MA é um campo emergente da tecnologia e tem sido utilizada em indústrias de vários segmentos, como aeroespacial e aviação, engenharia de defesa, construção civil, ciências médicas e biomédicas, indústrias automotivas e expandindo para o uso domiciliar. É um método de processamento no qual pode ser alimentado por metais, polímeros e cerâmicas (BHATIA et al, 2021). Uma das principais vantagens da MA em relação aos processos convencionais é a capacidade de produzir peças otimizadas com requisitos geométricos complexos, o que permite que peças manufaturadas ofereçam menor peso e perda de material do que a usinagem, que é um processo de fabricação subtrativa (CAMARGO et al, 2020; LI et al, 2020).

As pesquisas e avanços na área de MA continuam sendo fomentadas para mitigar alguns dos obstáculos que ainda são encontrados na produção das peças, que podem dificultar sua utilização em produção em larga escala. Alguns problemas característicos do processo são alta anisotropia (dependente das direções de deposição do material), dependendo do processo de fabricação e dos parâmetros resulta em um acabamento superficial de baixa qualidade devido à sobreposição de camadas com diferentes taxas de resfriamento, defeitos internos e zonas termicamente afetadas. Estes problemas afetam negativamente as propriedades mecânicas do material (SRIVATSAN; SUDARSHAN, 2015).

Existem uma grande variedade de processos na MA. A primeira classificação dos processos de fabricação foi proposta por Kruth em 1991, onde relacionava a técnica de deposição e a condição de matéria-prima, que pode ser líquida, sólida ou pó. Os processamentos à base líquida são aqueles que utilizam uma solução de resina fotossensível como agentes

ligantes e a solidificação ocorre por um feixe de luz. O processamento sólido está ligado à base de material laminado, comumente folhas metálicas ou poliméricas. Por fim, os processos que utilizam materiais em pó envolvem a fusão ou a sinterização de camadas para criar a peça (SRIVASTAVA et al, 2022). Muthu e Savalani (2016) apresentaram uma classificação conforme a condição da matéria prima, ilustrado na Figura 1. Cada tipo de processamento tem suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha do método depende do tipo de peça a ser criada e dos materiais disponíveis.

Figura 1: Processos de manufatura aditiva conforme a condição de matéria prima.

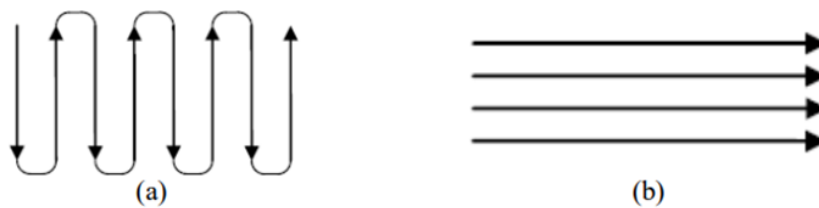


Fonte: Adaptado de Muthu & Savalani (2016).

No processo de MA, considerações importantes podem ser feitas para minimizar possíveis defeitos no produto e parte desses defeitos estão relacionados às estratégias de deposição empregadas. Williams et al. (2016) propõem a utilização de um plano de simetria na fabricação da peça, na qual a deposição deve ser alternada entre os dois lados do substrato cortado pelo plano de simetria. Dessa forma, as tensões produzidas são balanceadas e o controle da temperatura do componente pode ser facilitado. Martina et al. (2012) em seu estudo utilizando a manufatura por deposição de plasma em ligas de Ti-6Al-4V notaram que nas deposições havia um acúmulo de material no início do cordão e uma depressão ao final do cordão. O acúmulo de material pode ser explicado devido ao substrato mais frio no início da camada, enquanto a depressão é explicada pela ausência de uma poça quente à frente da tocha. Sendo assim, uma forma de evitar o acúmulo de material, que não precisa estar associada à modificação de parâmetros é a deposição alternando as origens, ou seja, a deposição

subsequente se inicia onde a deposição anterior terminou. A Figura 2 ilustra duas direções de deposição no processo de MA. Na Figura 2(a), a camada formada é tipicamente depositada em uma orientação diferente da anterior, sendo uma forma de reduzir o crescimento preferencial de grãos e a minimização de tensões residuais. Na Figura 2(b) a origem de deposição está no mesmo sentido, o que pode gerar o acúmulo do material e tensão residual. Faust et al, (2022) estudou os diferentes caminhos de deposição por simulações computacionais e o caminho alternado, ou zig-zag, foi o que apresentou menor tempo de fabricação da peça manufaturada.

Figura 2: Direções de deposição. (a) Alternada e (b) Paralela.



Fonte: COLEGROVE et al. (2016).

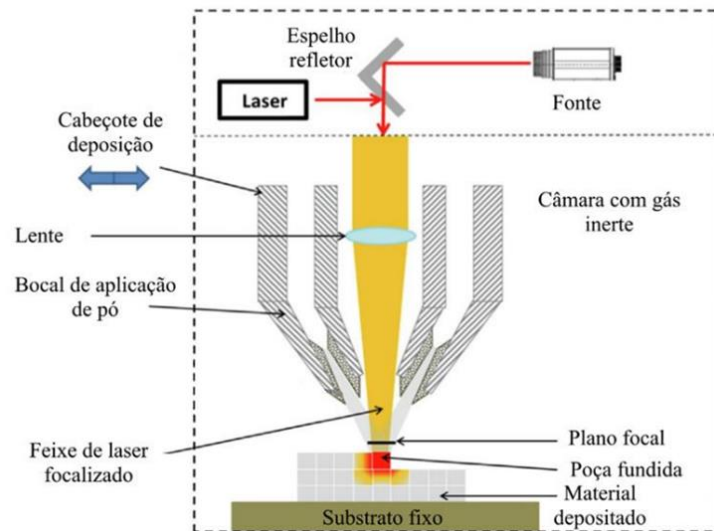
3.1.1. Deposição Direcionada de Energia

De acordo com Li et al. (2020), a deposição direcionada de energia (*Directed Energy Deposition* - DED) é uma importante técnica da MA que pode utilizar o material em pó ou filamento como matéria-prima de alimentação, sendo que cada uma destas opções tem limitações em relação à condição da matéria-prima de alimentação. A alimentação em pó é mais versátil e a maioria dos materiais metálicos e cerâmicos estão prontamente disponíveis neste estado físico. Essa técnica de MA vem se destacando cada vez mais por ser promissora na substituição de peças fabricadas pelos métodos convencionais e por apresentar menor impacto ambiental quando comparada aos processos de usinagem, por oferecer possibilidade de redução de consumo de energia e custos de fabricação devido à capacidade do DED de reparar e retrabalhar o material (KUMAR et al, 2021).

A técnica por deposição direcionada de energia a laser (L-DED) usa um laser de alta potência que é projetado localmente para uma região estreita. A energia térmica é focalizada para fundir o material que é depositado através de um bico montado em um braço de múltiplos eixos (GIBSON et al, 2015; LI et al, 2020). À medida que o laser se afasta, o material líquido vai solidificando. Para proteger a poça fundida contra o oxigênio atmosférico e evitar que o material sofra oxidação, usa-se uma câmara hermeticamente vedada com gás inerte. Uma

representação esquemática do processo de manufatura por L-DED usando matéria-prima em pó é mostrada na Figura 3.

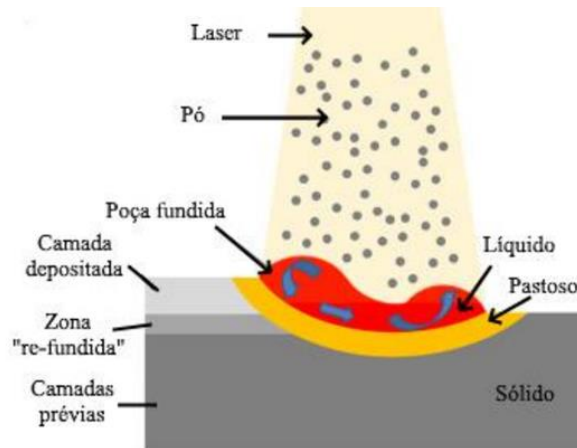
Figura 3: Esquema de Processo L-DED.



Fonte: Adaptado de THOMPSON et al. (2015).

Durante o processo de fabricação de MA baseado em laser, o material depositado sofre rápido aquecimento e resfriamento. Esta mudança abrupta de temperatura pode suprimir as transformações de fase e induzir fases supersaturadas, trincas a quente e tensões residuais térmicas (LI et al, 2020). O efeito denominado *balling* está relacionado aos diversos fenômenos que ocorrem durante a fusão e posterior solidificação do metal. O resfriamento relativamente rápido do material fundido pode originar certos níveis de tensão superficial no líquido que, por sua vez, impede o molhamento adequado da subsequente frente de metal líquido no substrato, gerando rugosidade excessiva na superfície da peça. Adicionalmente, poderá ocorrer porosidade mesmo no caso de haver molhamento adequado e fusão completa devido a fenômenos como aprisionamento de gás, resultando em propriedades mecânicas inferiores das peças (DADBAKHS et al, 2012; KRUTH et al, 2007). Figura 4 apresenta um modelo de fonte de laser que fornece energia suficiente para que as partículas sejam fundidas e criem uma poça líquida de fusão em uma região chamada de zona afetada por calor. A poça fundida nos processos DED é similar às geradas em outros processos tradicionais de MA, porém, a adição contínua de pó/massa e as interações entre os parâmetros de deposição e os ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento tendem a causar complexidade na previsibilidade da temperatura e induzem a instabilidades na superfície da peça (THOMPSON et al, 2015).

Figura 4: Desenho esquemático representativo da zona afetada por calor.



Fonte: Adaptado de THOMPSON et al. (2015).

De modo geral, o pó utilizado nos processos DED pode apresentar dimensões maiores em relação a outros processos diretos de MA (como *Powder Bed Fusion* - PBF, por exemplo). A forma esférica do pó pode reduzir a adesão entre o gás inerte e a poça fundida, além de contribuir para a diminuição da porosidade da peça final e promover melhor fluidez (THOMPSON et al, 2015). O pó aditivo é alimentado coaxialmente junto ao laser na poça de fusão. Assim, os pós fundem-se no substrato e formam um novo revestimento/camada. Assim, os pós se fundem no substrato e formam uma nova camada. Alguns dos benefícios desse processo são: Menor área da zona termicamente afetada e menor distorção (GULLIPALLI et al, 2022).

As principais limitações na técnica de DED são a fraca resolução e acabamento superficial quando comparados com outros processos de MA, a técnica DED não pode produzir estruturas tão complexas quanto os processos de fusão de leito em pó (PBF). Isto ocorre porque as zonas onde há fusão são maiores na técnica de DED e resultam em uma capacidade reduzida para produzir características de pequena escala, com maior rugosidade na superfície e menor precisão dimensional. Ao final do processo MA, comumente, é necessário mais uma etapa de processo para o acabamento e precisão da peça, pois envolve a remoção das estruturas de suporte ou substrato, se este não fizer parte da peça final.

Kumar et al. (2021) compararam as microestruturas e suas consequências nas propriedades mecânicas da liga de Inconel 625 e 718 fabricado pela técnica DED e forjadas a quente. A técnica DED resultou em grãos mais finos. Isso ocorreu, pois a taxa de resfriamento da matéria-prima fundida é muito rápida, geralmente entre 1000 e 5000 °C/s. Mas também, deve-se atentar aos parâmetros de processo, pois uma maior potência do laser corresponde a

uma maior entrada de energia e uma taxa de resfriamento mais lenta que, por sua vez, resulta em tamanhos de grãos maiores.

Materiais que possuem granulações mais finas apresentam, normalmente, melhores propriedades mecânicas que materiais com granulações mais grosseiras. Isso ocorre, pois o material com microestrutura mais refinada apresenta uma maior área total de contorno de grão, que atua como barreira para a propagação de trincas, uma vez que parte da energia de propagação é dissipada na interface de contorno devido às diferentes orientações cristalográficas que o material possui, ocasionando um aumento da tenacidade à fratura (CALLISTER, 2002).

A ductilidade das peças fabricadas por DED é geralmente considerada como inferior aos equivalentes forjados ou moldados. Em muitas ligas, a ductilidade pode ser recuperada e a anisotropia minimizada por tratamento térmico de alívio de tensões e solubilização. O metal que é resfriado de altas temperaturas até a temperatura ambiente tende a se deformar durante o processo devido aos gradientes de tensões térmicas gerados. O pós-processamento por tratamento térmico pode ser uma das soluções. A estrutura de suporte também pode ter a função de dissipar o calor da camada recém-fundida e restringir a deflexão da peça causada por tensões térmicas.

3.2. Parâmetros de Processo

Para melhorar a previsibilidade dos parâmetros de processo, Li et al. (2017) realizaram um trabalho experimental para encontrar a relação entre os parâmetros de entrada do equipamento e as propriedades da peça fabricada. Para lidar de forma assertiva com as possibilidades de entrada e saída envolvidas no processo de MA, metodologias numéricas de otimização têm sido empregadas (CHEN et al, 2020; ZHOU et al, 2009).

Yang et al. (2022) relataram em suas pesquisas sobre as quantidades elevadas de parâmetros de processos presentes na técnica de DED, os quais aumentam sua complexidade. Sabe-se que os parâmetros de processo têm uma forte influência na qualidade dos resultados das peças manufaturadas. Os parâmetros incluem potência do laser, velocidade de varredura, taxa de alimentação de pó, distância de trabalho, temperatura de pré-aquecimento, intervalos de resfriamento, fluxo de gás de arraste, fluxo de gás de proteção, sobreposição de trilhas e incremento no eixo Z (BAX et al, 2018; GULLIPALLI et al, 2022; MAZZARISI et al, 2020). Esses parâmetros apresentam um efeito direto na microestrutura da peça manufaturada, sendo

essencial selecionar valores de parâmetros apropriados para a fabricação de peças. A combinação dessas variáveis afeta as propriedades geométricas, mecânicas e metalúrgicas do material depositado. Isso ocorre, pois a maioria desses fatores afeta o gradiente térmico e a velocidade de solidificação da peça e pode levar a diferenças no crescimento cristalino, tamanho de grão, refinamento de grão, orientação cristalográfica e morfologia, afetando as propriedades finais do componente, como exemplificado na Figura 5.

Figura 5: Parâmetros de processo.

Entradas	Processos	Saídas
Equipamentos e dispositivos <ul style="list-style-type: none"> • Potência • Feixe de laser • Pulsos • Perfil de feixe • Tamanho de onda • Velocidade relativa • Taxa de alimentação • Tipo de bocal • Fluxo de pó • Fluxo de gás inerte Material <ul style="list-style-type: none"> • Substrato • Composição • Propriedades físicas e metalúrgicas • Tamanho de pó 	Fenômenos físicos <ul style="list-style-type: none"> • Absorção • Condução • Difusão • Poça de fusão • Convecção • Integração gás/poça • Atenuação do laser pelo pó • Solidificação 	Fenômenos físicos <ul style="list-style-type: none"> • Geometria dos cordões • Microestrutura do produto final • Dureza dos cordões • Trincas • Poros • Tensão residual • Rugosidade superficial • Rigidez superficial • Diluição

Fonte: Adaptado de TOYSERKANI et al. (2005).

Mazzarisi et al. (2020) fizeram um extenso estudo acerca dos diversos modelos disponíveis na literatura destinados à modelagem dos principais parâmetros de processo da MA. De acordo com os autores, três abordagens principais estão disponíveis na literatura. A primeira refere-se a modelos teóricos complexos que explicam em detalhes a física do processo, sendo os mais onerosos para serem empregados em aplicações industriais (GUAN; ZHAO, 2020). A segunda classe, chamada de modelo fenomenológico, relaciona os parâmetros controláveis mais importantes do processo, como potência do laser e fluxo de pó, com características geométricas do cordão por meio de uma relação matemática baseada na análise estatística. Na terceira classe, chamada de modelo de processo heurístico, faz-se um resumo empírico de evidências experimentais de modelos existentes na literatura. Os modelos de processos

heurísticos requerem generalidade e, portanto, estão estritamente relacionados às condições de aplicação específicas experimentadas.

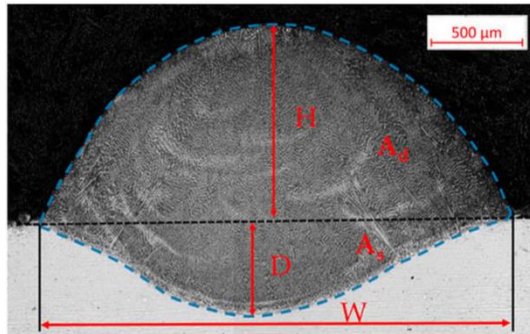
Para analisar os parâmetros ideais de processo, o modelo fenomenológico permite uma previsão simples com base em três parâmetros principais de processo: potência do laser, taxa de alimentação do pó e velocidade de varredura. Esse modelo engloba os fatores mais importantes a serem levados em consideração na avaliação dos principais parâmetros de desempenho do processo, além de ser o mais acessível na maioria das situações de fabricação (MAZZARISI et al, 2020). Embora esse procedimento minimize tempo e custo, uma série de linhas de deposição são necessárias para encontrar a combinação ideal desses parâmetros de processo.

Os parâmetros de processo do LP-DED podem afetar o gradiente térmico, taxa de crescimento e a intensidade dos fluxos de fluido na poça de fusão. Esses fenômenos influenciam fortemente o modo de solidificação e a consequente microestrutura da peça final (AVERSA et al, 2021). Boisselier et al. (2012) pesquisaram o efeito das propriedades do pó 316L na qualidade das amostras e sugeriram que os parâmetros do processo deveriam ser analisados para cada lote de pó, pois a morfologia da partícula afeta a fluidez e a interação do pó, e ambos determinam o comportamento mecânico e as características microestruturais do material.

Na literatura existem diferentes maneiras de calcular a qualidade geométrica do cordão, a qualidade, além de depender dos parâmetros de processo, também depende do fabricante devido as métricas do equipamento utilizado, como bico e diâmetro do feixe.

Para encontrar os parâmetros ideais, o primeiro passo é a avaliação de linhas de deposição de material, analisando cinco características principais: altura do cordão (H), profundidade de penetração no substrato (D), largura do cordão (W), área de profundidade de penetração (A_s) e área de diluição (A_d), como exemplificado na Figura 6. Linhas de deposição com fraca adesão ao substrato, forte formato convexo ou baixa diluição não podem ser usadas para obter resultados de alta qualidade (BAX et al, 2018). Para isso, é necessário realizar um estudo da seção transversal das características geométricas do perfil da amostra manufaturada (MAZZARISI et al, 2020 e SREEKANTH et al, 2020).

Figura 6: Imagem de seção transversal e características geométricas do cordão de deposição.

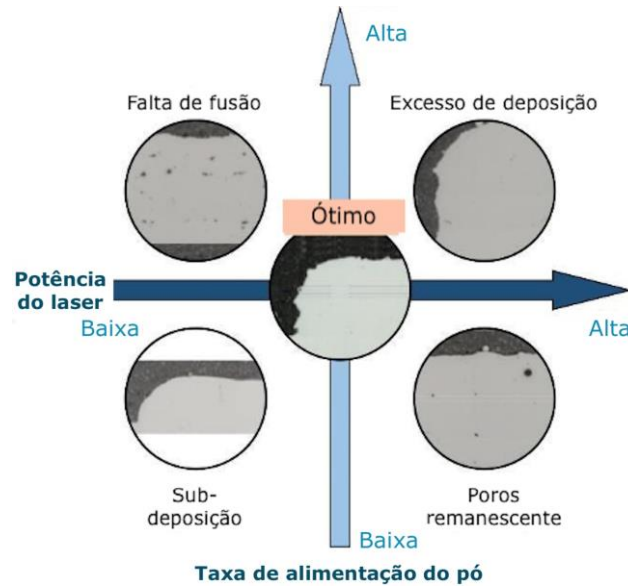


Fonte: SREEKANTH et al. (2020).

A diluição é a razão entre a área da poça de fusão (A_s) e a área total do cordão ($A_d + A_s$), ou, alternativamente, a razão entre a profundidade de penetração (D) e a altura total do cordão ($H + D$). Ambos os métodos fornecem resultados comparáveis, mas a relação entre as áreas é mais adequada para a análise de cordões com assimetria pronunciada. A diluição, é um dos parâmetros cruciais, pois influencia a composição química, bem como a integridade de adesão. A relação altura-largura também costuma ser utilizada para avaliar a qualidade do cordão, pois reflete o crescimento do cordão com sua largura (DASS; MORIDI, 2019).

Yang et al. (2022) mostram os tipos de defeitos que podem ocorrer na seção transversal de acordo com a potência do laser e a taxa de alimentação do pó, como exemplificado pela Figura 7. Quando a potência do laser e a taxa de alimentação do pó são altas, ocorre excesso de deposição sobre a altura da peça, pois uma grande quantidade de pó foi fundida. Antagonicamente, quando ambos os parâmetros são baixos, a peça fica subdepositada. Quando a potência do laser é baixa para uma alta taxa de alimentação de pó, a energia de entrada torna-se insuficiente para fundir o substrato e o pó, pois a poça de fusão ou é menor ou resultou em uma falta de fusão devido à fusão incompleta do pó fornecido. Além disso, nesse caso, o pó não é suficientemente fundido entre as camadas depositadas e, conseqüentemente, pode formar vazios na região entre as camadas. Por último, quando a potência do laser for maior para a baixa taxa de alimentação de pó, o gás gerado pela alta densidade de energia não poderia escapar da poça de fusão, ficando preso no interior e resultando em poros remanescentes.

Figura 7: Diagrama esquemático de defeitos gerados em seções transversais de acordo com a potência do laser e taxa de alimentação do pó.



Fonte: Adaptado de Yang et al, (2022).

3.3. Liga de Inconel 718

A MA pode utilizar diversos tipos de materiais durante seu processo, como ligas de alumínio, titânio, aços, superligas, entre outros. Dentre estas possibilidades, há um grande destaque para a superliga de Inconel 718, sendo composta principalmente por Níquel-Cromo-Molibdênio (GOMES, 2016). Apresenta a composição nominal conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Composição nominal da liga Inconel 718.

Elemento	Ni	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	S	Co	C	Fe
% peso	50,0-55,0	17,0-21,0	4,8-5,5	2,8-3,3	0,8-1,15	0,40-0,60	0,010 máx.	1,0 máx.	0,045 máx.	Bal.

Fonte: API (UNS N07718).

A presença de molibdênio na sua composição proporciona uma excelente resistência à corrosão por pites. Essa característica permite que esse material seja utilizado em componentes que ficam expostos a névoas salinas ou mesmo imersas em água salgada (SPECIAL METALS, 2013). A alta tenacidade na resistência mecânica se dá uma vez que o material tem em sua composição o nióbio, um endurecedor de austenita por solução sólida, que quando misturada ao molibdênio se torna responsável pelo endurecimento da região central (e de maior importância) da liga, ou seja, resulta na formação de carbonetos.

A demanda por superligas resistentes a altas temperaturas, como o Inconel 718, recebeu um interesse tecnológico significativo devido às suas propriedades mecânicas, químicas e físicas. A utilização de usinagem convencional pode ser desafiadora devido ao desgaste excessivo da ferramenta pela liga apresentar alta dureza e a baixa condutividade térmica. Com o avanço da tecnologia, técnicas de fabricação aditiva tem apresentado processamento versátil e oferecido novas oportunidades para a preparação de componentes grandes, complexos e de forma livre, o que não era possível anteriormente.

As propriedades competitivas inerentes das superligas as tornam extremamente desejáveis para aplicações em condições extremas de temperatura, pressão e atividade química. As superligas podem suportar altas temperaturas homólogas (temperatura de operação/temperatura de fusão) e sustentar altas cargas de tração, fluência e fadiga, comumente encontradas em motores aeronáuticos. As superligas à base de níquel são altamente resistentes à oxidação e potenciais candidatas adequadas para aplicações em temperaturas elevadas (até 1010 °C), sendo uma opção interessante para revestimentos superficiais de componentes de equipamentos sujeitos à corrosão em meio aquoso salino, como é o caso dos componentes para extração de petróleo *offshore* (KUMAR et al, 2021; SPECIAL METALS, 2013). Além disso, outras áreas de demanda para as superligas são combustores, rotores e vedações de turbocompressores, trocadores de calor, reatores nucleares, pás de turbinas, bombas submersíveis elétricas de poços e eixos de motores, vasos de alta pressão e usinas nucleares.

A superliga Inconel 718 consiste em 10 elementos principais que influenciam as propriedades da liga, conforme ilustra a Tabela 2.

Tabela 2: Efeito dos principais elementos da liga Inconel 718 em suas propriedades.

Elemento de liga	Efeito na propriedade da liga
Níquel	Estabilizador da matriz γ
Alumínio + Titânio	Fornece fortalecimento do precipitado γ' enquanto o Al ajuda na resistência à oxidação e o Ti forma carbonetos
Cromo	Fornece reforço de solução, carbonetos de forma, auxilia na proteção contra corrosão e oxidação quente
Ferro	Na matriz, estabiliza a fase lava
Nióbio + Tântalo	fortalecimento de precipitado γ'' e carbonetos
Molibdênio + Tungstênio	Fornece reforço de solução, resistência à oxidação e forma carbonetos
Carbono	estabilidade de contorno de grão e participa na formação de carboneto

Fonte: Adaptado de SREEKANTH (2020).

As principais fases do Inconel 718 são:

- Fase γ : Apresenta uma matriz austenítica à base de níquel, com elevados teores de ferro e cromo. Sua estrutura cúbica de face centrada (CFC) permite múltiplos sistemas de deslizamento, o que resulta em boa ductilidade e conformabilidade;
- Fase γ' Ni₃(Al,Ti): Coerente com a matriz, apresenta fase ordenada de estrutura cúbica de face centrada;
- Fase γ'' (Ni₃Nb): Fase metaestável de estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC). É a principal fase endurecedora e apresenta a morfologia de discos alongados. Pode ser observada em ligas ricas em nióbio;
- Fase δ : Forma termodinamicamente estável de γ'' , forma-se devido à exposição a temperaturas acima de 650 °C e um longo período de tempo. A fase δ possui estrutura cristalina ortorrômbica. A fase δ é incoerente com a matriz γ e sua formação em grandes quantidades reduz as propriedades mecânicas, tornando a liga 718 inadequada para suas aplicações convencionais (VEIGA et al, 2012);
- Carbeto: São utilizados para refinar a microestrutura durante a fabricação e o tratamento térmico, por meio do controle de crescimento do grão. Eles aumentam a resistência da matriz quando presentes intergranularmente e adicionam resistência a elevadas temperaturas, inibindo o deslizamento dos contornos de grão. O carbeto é

formado principalmente pela combinação do carbono com elementos refratários como titânio e nióbio. Os principais carbetos encontrados são o MC, $M_{23}C_6$ e o M_6C (VEIGA et al, 2012 e SREEKANTH 2020);

- Fases TCP (*Topologically Close-Packed Phases*): Se formam como agulhas e/ou placas finas de compostos intermetálicos e apresentam um efeito nocivo nas propriedades mecânicas e, em alguns casos, na corrosão do material. Estão presentes as fases sigma (Cr-Fe, tetragonal) e Laves (Ni-Fe-Cr, hexagonal). As fases sigma se formam em longos tempos sob tensão a temperaturas acima de 700°C. A fase Laves é formada quando a liga é soldada, a partir da microsegregação de elementos de liga em regiões interdendríticas, durante a solidificação da solda. Esta fase se forma próxima da fase δ e, devido a sua natureza frágil, é fonte preferencial de iniciação e propagação de trincas (VEIGA et al, 2012 e SREEKANTH 2020).

3.4. Dureza da liga de Inconel

Wolff et al. (2019) mostram em sua pesquisa que a microdureza do revestimento depositado a laser depende de sua morfologia, como a formação de microestrutura dendrítica, da fase γ' e, principalmente, da composição da liga. Um bom resultado de microdureza depende de uma boa diluição do pó fundido com o substrato, pois a transferência de massa e a mistura de composição de dois materiais na poça de fusão têm um papel vital na microdureza. De acordo com Sreekanth et al. (2020), a solidificação começa na região inferior pelo crescimento epitaxial dos grãos do substrato que se transformam em grãos dendríticos colunares devido à composição da liga Inconel 718 e alto gradiente térmico. Esta região consiste em grãos colunares finos com tamanho médio de 45 μm e microestrutura dendrítica. Na região intermediária os grãos têm tamanho médio de 80 μm e apresentam, predominantemente, uma microestrutura colunar dendrítica. Por fim, a região superior apresenta uma estrutura equiaxial com tamanho médio de grão de 20 μm .

Mondenese (2005) em sua pesquisa, tendo como foco as propriedades mecânicas, mostra que a região mais suscetível é a inferior, por ser uma região termicamente afetada pelo aquecimento e mudança da microestrutura do material, podendo acarretar em um aumento de dureza e, como consequência, o enfraquecimento da interface do substrato com o material depositado, fazendo com que a resistência desta seja menor que a esperada.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesta pesquisa foi a liga Inconel 718 obtida mediante atomização a gás produzido e comercializado pela *Powder Range*. A composição química fornecida pelo fabricante é apresentada na Tabela 3 com tamanho de partícula variando de 45 a 105 μm .

Tabela 3: Composição química da liga Inconel 718.

Elementos	Ni	Cr	Fe	Nb +Ta	Mo	C	Ti	Al	S
Quantidade em peso (%)	52,55	19,0	18,13	4,97	3,10	0,05	0,93	0,52	0,001

Fonte: *Powder Range* (2021).

O equipamento utilizado para a realização das deposições foi o equipamento BeAM *machines* módulo 250. Este equipamento conta com um laser de IPG Nd:YAG com uma potência nominal máxima de 1 kW e um comprimento de onda de 1.070 μm . A distância entre o bico de deposição e o substrato foi de 3,5 mm. O substrato utilizado neste projeto foi o Aço Inoxidável 316. Trilhas de varredura única da liga Inconel 718 foram depositadas para otimizar os parâmetros de processo.

Para a análise das seções transversais do cordão, as deposições foram seccionadas e realizada a preparação metalográfica. Para isso, foram embutidas a quente, lixadas com granulometria sucessivamente menores e mudando a direção de 90° em cada lixa, polidas em suspensão de alumina até 0,03 μm e atacadas quimicamente pela solução de Marble (50ml H₂O, 50ml HCL, 10g CuSO₄). O uso deste reagente torna visível a microestrutura da amostra para a análise do cordão por meio do microscópio óptico.

4.1. Montagem Experimental

O feixe de laser foi direcionado na superfície do substrato do aço inoxidável AISI 316, percorrendo uma trajetória retilínea em passe único. A potência do laser foi variada entre 375 W e 450 W, aumentando em 25 W a cada deposição. A taxa de alimentação do pó foi variada de 2,0 a 4,5 g/min devido a testes realizados preliminarmente, aumentando 0,5 g/mm a cada linha depositada. Os parâmetros de processos utilizados para a criação das trilhas são descritos na Tabela 4, totalizando 24 amostras. O argônio foi usado como gás de trabalho com um fluxo de 3 l/min, fluxo central 3 l/min e fluxo transportador 6 l/min.

Tabela 4: Parâmetros de processos de LP-DED.

Potência de laser (W)	450	425	400	375
	2,0	2,0	2,0	2,0
	2,5	2,5	2,5	2,5
Taxa de fluxo de pó (g/min)	3,0	3,0	3,0	3,0
	3,5	3,5	3,5	3,5
	4,0	4,0	4,0	4,0
	4,5	4,5	4,5	4,5

Fonte: O autor.

4.2. Caracterização do pó de Inconel 718

Uma amostra deste pó foi extraída e submetida à análise mediante espectrometria de raio x de energia dispersiva (EDX) para controle de pureza e contaminação. Na sequência, uma preparação metalográfica foi realizada utilizando embutimento a frio com resina epóxi, para analisar a morfologia e medir o tamanho da partícula do pó mediante microscopia óptica. Posteriormente, uma tabela de frequência por classes foi realizada com base nos dados obtidos na medição desta análise, assim como o gráfico de distribuição do tamanho de partícula.

4.3. Caracterização de faixa única

As deposições de faixa única foram caracterizadas com base nas diferenças de geometria. Uma seção transversal de depósito de faixa única é mostrada na Figura 6. A análise geométrica inclui as medidas de altura (H), largura (W) e profundidade (D) dos depósitos.

Primeiramente, avaliou-se visualmente as linhas de deposição para verificar trilhas lineares, não lineares e queimadas. Após isso, foi feita análise da qualidade geométrica do cordão a partir dos parâmetros de processos. Por fim, estabeleceu-se a melhor combinação dos parâmetros de processo por meio das análises de diluição e da razão altura-largura. Para a avaliação de deposição das pistas únicas, utilizou-se o microscópio laser confocal OLS 4100 (LEXT) para extrair a largura, altura e penetração do cordão.

Neste trabalho as equações (1) e (2) foram utilizadas para avaliar a qualidade geométrica do cordão, sendo f é a razão altura-largura (f) e a diluição (d).

$$f = \frac{H}{W} \quad Eq. 1$$

$$d = \frac{D}{H} \quad Eq. 2$$

Onde, H é altura, W é largura e D é profundidade.

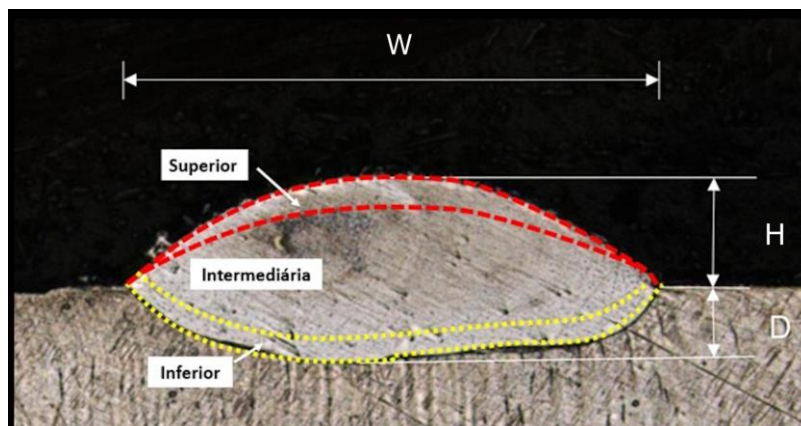
Essa abordagem é recomendada pelo fabricante conforme descrito por (WONG et al, 2023).

Posteriormente as amostras foram analisadas em termos de dureza no topo, na região média e na região da penetração para entender o comportamento do inconel 718 em relação aos parâmetros do processo.

4.4. Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado nas amostras embutidas em baquelite, lixadas e polidas. As indentações foram feitas por meio de uma ponta de penetração pelo microdurômetro digital Leica, modelo VM HT MOT, com aplicação de uma força de 300 g.f durante quinze segundos, conforme a norma ASTM E384-17. Foram realizadas medições na região superior, intermediária e inferior do cordão, conforme Figura 8.

Figura 8: Seção transversal da pista única depositada indicando características geométricas e divisão de diferentes regiões.



Fonte: O autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise morfológica e química do Inconel 718

Os resultados obtidos mediante espectrometria de raio x de energia dispersiva (EDX) mostraram a composição descrita na Tabela 5. Essa composição química foi comparada com os resultados fornecidos pelo fabricante (Tabela 3). Foi observada uma quantidade maior de Nb em relação à composição do fornecedor e esta diferença pode ter sido detectada por várias razões, entre elas o método de medição, tolerâncias na fabricação, ou mesmo distribuição não homogênea na hora de realizar a análise. A maior presença de Nb melhora as propriedades de corrosão e térmicas do material, pois é responsável pela fase de precipitação sólida do material, devido a maior presença da fase γ'' .

Tabela 5: Comparação da composição química percentual do material fornecido pelo fabricante em relação ao EDX realizado.

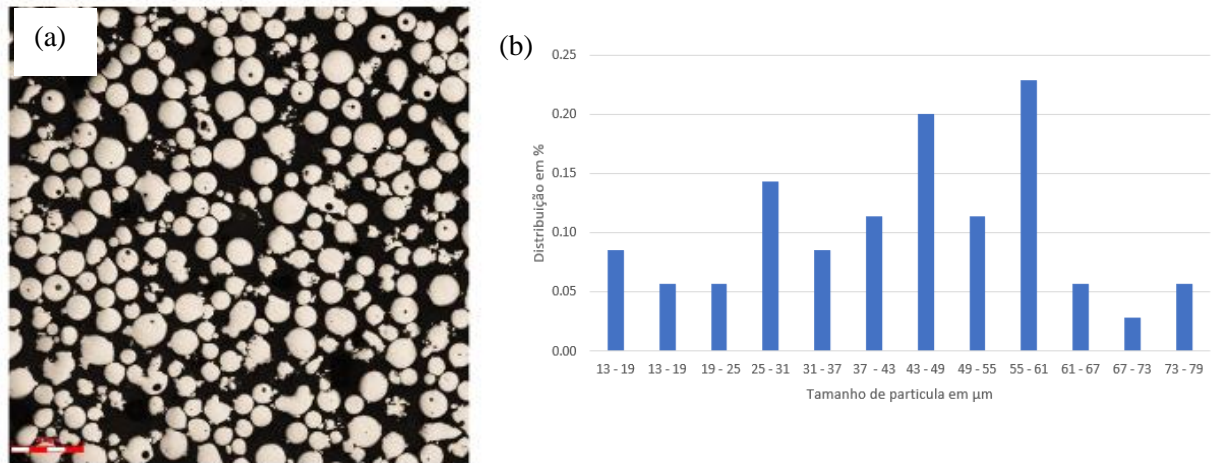
Elementos	EDX (%)	Dados do fabricante (ref) (%)	Dados da norma (%)	EDX/Fabricante (%)
Ni	47,30	52,55	50,0 - 55,0	-9,99
Cr	18,91	19,0%	17,0 - 21,0	-0,94
Fe	16,52	18,13	bal.	-8,88
Nb	8,00	-	-	-
Mo	4,80	3,10	2,8 - 3,3	+54,84
S	1,50	0,001	Máx. 0,01	-
Al	1,24	0,52	0,4 - 0,6	+138,46
Ti	1,03	0,93	0,8 - 1,15	+10,75
Nb+Ta	-	4,97	4,8 - 5,5	-
Total	99,30	99,20		+0,10

Fonte: O autor.

Com os dados obtidos pela tabela 5, observa-se um aumento considerável em Al e Mo. Esses elementos de liga são responsáveis pela resistência à oxidação do material. Além disso, o Al, juntamente com o Ti, está diretamente ligado no fortalecimento do precipitado da fase γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$). Sendo assim, o aumento desses elementos, possivelmente, causará uma maior resistência à corrosão.

A distribuição do tamanho de partícula do pó, assim como sua morfologia são apresentadas na Figura 9.

Figura 9: Pó de Inconel 718: a) Morfologia e b) distribuição do tamanho de partícula.



Fonte: O autor

O pó utilizado apresentou uma morfologia esférica em maior porcentagem, com presença de satélites, além de partículas alongadas e aglomerados, como pode ser visto na Figura 9(a). Na distribuição do tamanho da partícula ilustrada na Figura 9(b), o pó apresentou um comportamento não gaussiano, tendo uma maior representatividade entre 55-61μm. A precisão da taxa de alimentação do pó torna-se mais eficiente quando o tamanho da partícula tem comportamento semelhante à distribuição gaussiana (RIBEIRO et al, 2023). Quando não apresenta esse comportamento, afeta aspectos durante o processo de deposição, gerando pequenas imprecisões no cálculo da taxa de fluxo de pó, assim como pode afetar a qualidade superficial das peças produzidas. Averardi et al. (2020) descreveram em sua pesquisa que o tamanho da partícula do pó e a taxa de alimentação do pó quando combinados com a potência do laser, afetam diretamente a porosidade e a geração de pequenos vazios no LP-DED.

O tamanho da partícula influencia a rugosidade da superfície devido a partículas pequenas, não governado pela gravidade, e forças inter-partículas e de Van der Waals e forças eletrostáticas tornam-se mais importantes. Além disso, o fenômeno de *balling* favorece o tamanho das partículas menores, aderindo as partículas mais finas à superfície da peça.

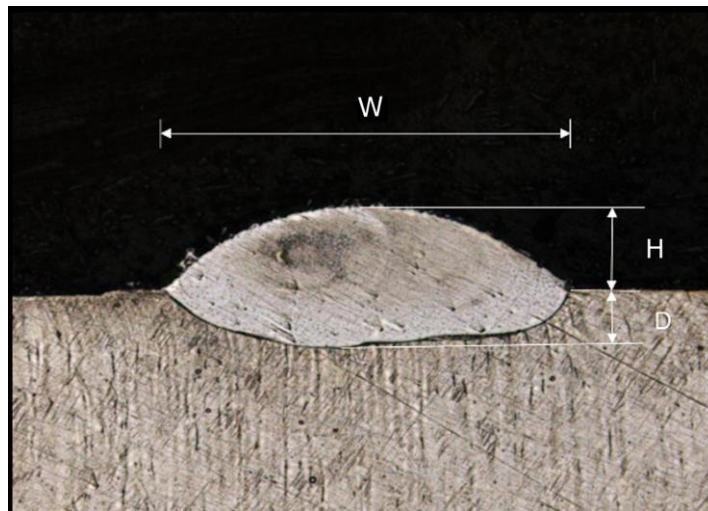
5.2. Análise das pistas únicas depositadas

Em relação à qualidade da faixa de deposição, três critérios foram considerados aceitáveis. O primeiro critério é a inspeção visual, o segundo critério é a relação altura-largura

(f) (Equação 1), com valores entre 0,2 e 0,33 e o terceiro critério é a diluição (d) (Equação 2) maior que 10%.

Analisou-se as amostras e todos os cordões apresentaram boa aderência, sem linhas de deposição queimadas e lineares. A Figura 10 mostra o perfil do cordão do Inconel 718 e as características geométricas utilizadas para realizar os cálculos do cordão.

Figura 10: Perfil do cordão depositado por LP-DED.



Fonte: O autor.

A Tabela 6 exemplifica os valores de altura-comprimento e a diluição de acordo com os parâmetros de potência e fluxo de pó de cada amostra. Observa-se que o critério relação altura-comprimento e diluição das amostras (9 a 18) com a taxa de fluxo de pó de 3,0, 3,5 e 4,5 (g/min) foram as que melhor se enquadraram com o segundo e terceiro critério de qualidade. Sendo esses parâmetros os ideais para a deposição do Inconel 718 no substrato de aço inoxidável 316 pela técnica de LP-DED.

A diluição é um dos parâmetros cruciais na análise de deposição dos cordões, pois é o nível mínimo de ligação metalúrgica necessária entre as camadas para apresentarem uma boa compatibilidade química e melhor adesão dos materiais. Valores baixos de diluição indicam que o material está utilizando grande parte da energia para se refundir ao invés de construir. Os valores de diluição apresentados na Tabela 6 evidenciam que o Inconel 718 e o substrato de aço inoxidável 316 apresentaram bons valores de diluição.

Tabela 6: Valores de relação altura-comprimento e diluição de acordo com os parâmetros utilizados.

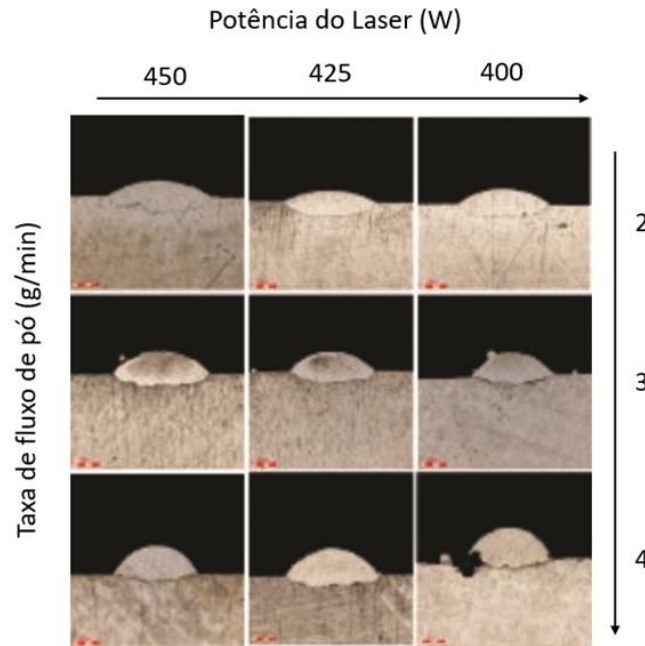
Amostra	Potência (W)	Fluxo de pó (g/min)	Relação altura-comprimento (f)	Diluição (d)
1	450	2,0	0,15	0,94
2	425	2,0	0,10	1,73
3	400	2,0	0,18	0,86
4	375	2,0	0,14	1,02
5	450	2,5	0,18	0,78
6	425	2,5	0,20	0,70
7	400	2,5	0,18	0,67
8	375	2,5	0,18	0,78
9	450	3,0	0,29	0,35
10	425	3,0	0,21	0,65
11	400	3,0	0,21	0,68
12	375	3,0	0,23	0,59
13	450	3,5	0,21	0,66
14	425	3,5	0,28	0,39
15	400	3,5	0,25	0,44
16	375	3,5	0,26	0,40
17	450	4,0	0,25	0,39
18	425	4,0	0,31	0,36
19	400	4,0	0,35	0,31
20	375	4,0	0,38	0,21
21	450	4,5	0,34	0,25
22	425	4,5	0,27	0,43
23	400	4,5	0,38	0,29
24	375	4,5	0,30	0,15

Fonte: O autor.

A geometria do cordão do material depositado é diretamente influenciável pelos principais parâmetros de processo, como potência de laser e taxa de alimentação de pó. Observa-se pela Figura 11, que nos casos em que a potência do laser e a taxa de alimentação do pó são maiores, ocorre excesso de deposição sobre a altura da peça, pois uma grande

quantidade de pó foi fundida. Além disso, quando a potência do laser é baixa para uma alta taxa de alimentação de pó, a energia decorrente do laser torna-se insuficiente para fundir o substrato e o pó, pois a poça de fusão ou é menor ou resultou em uma falta de fusão devido à fusão incompleta do pó fornecido, também impactando na altura do cordão.

Figura 11: Geometria do cordão para diferentes faixas de potências de laser e taxa de alimentação de pó.



Fonte: O autor.

5.3. Análise da Microdureza

Os resultados do teste de dureza na região superior, intermediária e inferior foram analisadas em relação à potência do laser para avaliar a sua influência no material, como mostrado na Figura 12. A partir disso, observou-se que há uma tendência de aumento de dureza, da região superior para a inferior. Esse aumento, está relacionado devido ao mecanismo de solidificação na região inferior, pois consiste em grãos colunares finos e microestrutura dendrítica. Devido ao menor tamanho de grão, pode-se esperar um aumento da dureza. Mondenesi (2005) em sua pesquisa, também discorre do aumento de dureza na região inferior, por ser uma região termicamente afetada pelo aquecimento e mudança da microestrutura do material, pois está próxima da ZTA e pode apresentar o enfraquecimento da interface do substrato com o material depositado, fazendo com que a resistência desta seja menor que a esperada. Corroborando os resultados, Kindermann et al. (2022) mostram que a variação na

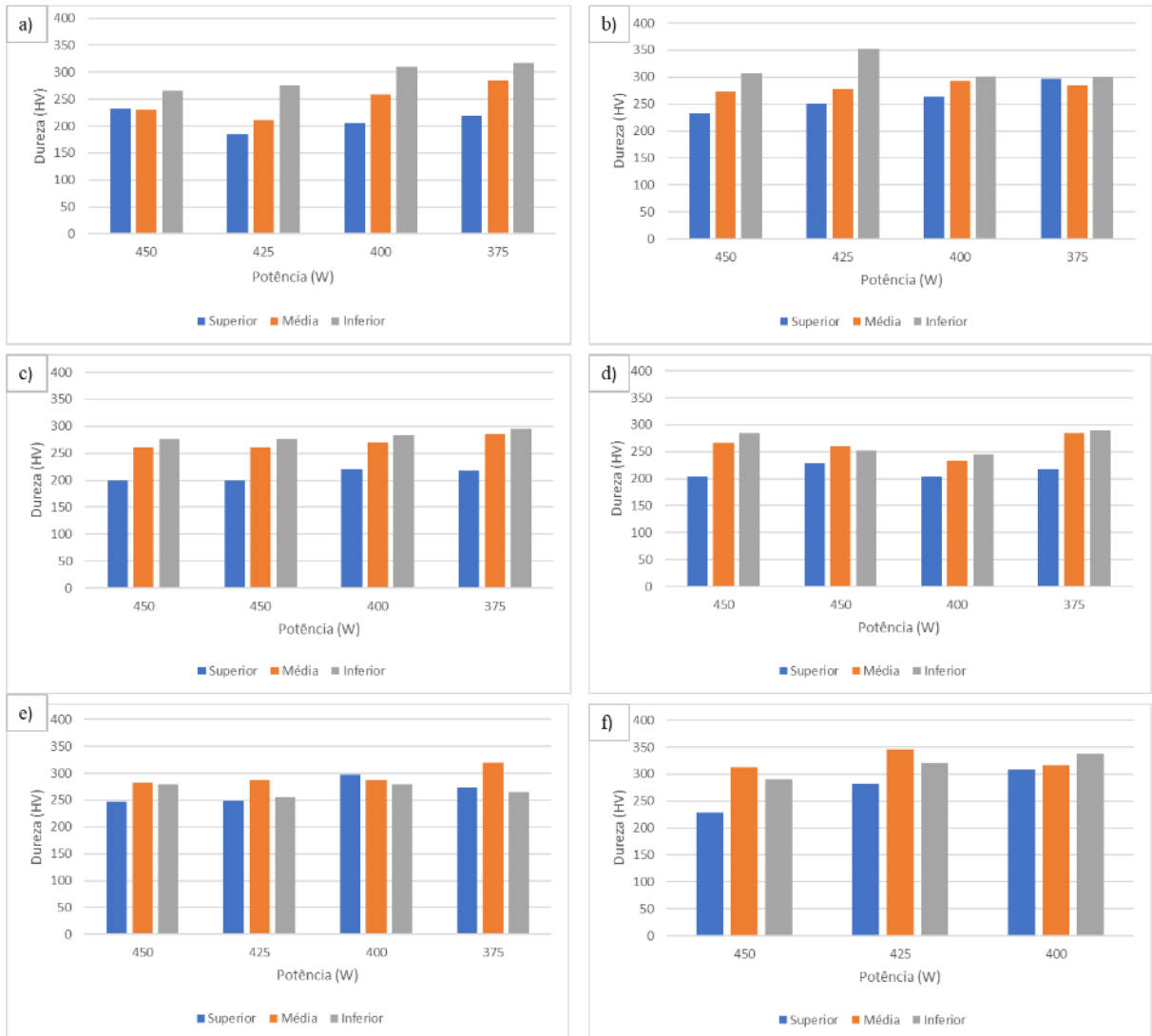
dureza na região inferior pode ser atribuída à maior quantidade de precipitados ricos em Nb, como mostrado na Tabela 5, inibindo a deformação do material.

Além disso, a dureza na menor potência, 375 W, tende a apresentar maiores valores que nas de maiores potências. Essa tendência aparece até uma taxa de fluxo de 3,5 g/min. Após esse fluxo, a região intermediária apresenta, ligeiramente, uma maior dureza em relação às outras regiões. Como retratado por Sreekanth et al. (2020), a nucleação heterogênea pode surgir tanto pela frente secundária de solidificação quanto por precipitação da cobertos de alto ponto de fusão. Esses precipitados podem ter sido alocados na região intermediária, aumentando a dureza nesta região, como o carbeto de titânio (TiC), que aparece em maior quantidade, como mostrado na tabela 5. AL-LAMI et al. (2023) mostram em sua pesquisa que os valores de microdureza, inicialmente, aumentam com as taxas de resfriamento para uma potência de laser para cada unidade de fluxo de massa de pó, isso pode ser devido. Dessa forma, valores de potência de laser menores injetam menor quantidade de calor e, por consequência, a peça apresenta um resfriamento mais rápido.

Neste trabalho, obteve-se uma faixa de valor de dureza para a região superior, intermediária e inferior de 185-308 HV, 211-346 HV e 246-352 HV, respectivamente. Na literatura, encontramos diferentes valores de dureza, dependendo do equipamento utilizado, método de deposição e parâmetros utilizados. Sreekanth et al. (2020), obteve valores de 270-350 HV utilizando uma carga de 300 g.f por 15 segundos. Wolff et al. (2019), obteve uma dureza média de 300 HV, utilizando 250 g.f por 5 segundos. AL-LAMI et al. (2023), obteve dureza média de 260 HV com potência de 1050 W e taxa de deposição de 3,3 g/min. Dessa forma, os valores encontrados estão condizentes com o que retrata a literatura para o Inconel 718.

Wolff et al. (2019), em sua pesquisa evidencia a forte influência na composição da liga, em relação a taxa de resfriamento, para os valores de microdureza na liga de Inconel 718. Também retrata a menor dureza na camada superior em relação à inferior. Contudo, isso foi observado na construção de multicamadas de deposição, pois a camada superior sofreu apenas um ciclo térmico. AL-LAMI et al. (2023), encontrou valores de dureza maiores na superfície na liga de Inconel 718 forjada, já a produzida por DED variou, ligeiramente, em direção a interface.

Figura 12: Resultados do teste de dureza na região superior, intermediária e inferior, para o fluxo de pó (g/min) (a) 2,0, (b) 2,5, (c) 3,0, (d) 3,5, (e) 4,0 e (f) 4,5.



Fonte: O autor.

6. CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi encontrar os parâmetros ideais de processo para a liga Inconel 718 depositada no substrato de aço inoxidável 316 a partir da técnica LP-DED. Com os resultados obtidos na análise de qualidade das pistas únicas, as seguintes conclusões podem ser delineadas.

- Obteve-se uma janela de parâmetros ideais para a deposição. Na potência de 375 a 450 W com a taxa de alimentação de 3,0 e 3,5 g/min e na potência de 425 a 450 com uma taxa de alimentação de 4,0 g/min;
- Com as medições de microdureza Vickers (HV) realizadas, observou-se menores valores de dureza na região superior e uma tendência de maior dureza na região inferior do material, possivelmente devido ao menor tamanho de grão atribuído a quantidade de precipitados ricos em Nb;
- Para uma taxa de fluxo de pó maior que 3,5 g/min. A região intermediária apresenta, ligeiramente, uma maior dureza em relação às outras regiões. Possivelmente, devido a nucleação heterogênea que causou a precipitação de carbeto como TiC que podem ter-se alocados na região intermediária.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para próximas etapas do trabalho, sugere-se as seguintes atividades complementares:

- A partir dos parâmetros ótimos obtidos, realizar a construção de paredes e analisar a qualidade na construção dos cordões;
- Realizar o tratamento térmico para redução das tensões residuais e a sua influência na pista única de deposição e na microdureza;
- Análise da microestrutura via imagens de microscopia avançada para entendimento das fases presentes nas regiões do cordão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E384: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. In West Conshohocken, p. 19428-2959, United States, 2005

AVERARDI, A., COLA, C., ZELTMANN, S. E., GUPTA, N. Effect of particle size distribution on the packing of powder beds: A critical discussion relevant to additive manufacturing. *Materials Today Communications*, Vol. 24, p. 100964, 2020.

AVERSA, Alberta; MARCHESE, Giulio; BASSINI, Emilio. Directed Energy Deposition of AISI 316L Stainless Steel Powder: effect of process parameters. *Metals*, v. 11, n. 6, p. 932, 8 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met11060932>.

BAX, Benjamin; RAJPUT, Rohan; KELLET, Richard; REISACHER, Martin. Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, v. 21, p. 487-494, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.002>.

BHATIA, Akash; SEHGAL, Anuj Kumar. Additive manufacturing materials, methods and applications: a review. *Materials Today: Proceedings*, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.379>.

BOISSELIER, Didier; SANKARÉ, Simon. Influence of Powder Characteristics in Laser Direct Metal Deposition of SS316L for Metallic Parts Manufacturing. *Physics Procedia*, v. 39, p. 455-463, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.061>.

CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CAMARGO, I. L.; LOVO, J. F. P.; ERBERELI, R.; COELHO, R. T.; SILVA, I. B.; FORTULAN, C. A., An Overview of Laser Engineered Net Shaping of Ceramics, *Matéria* (Rio de Janeiro), [S, l.], v. 25, n. 1, 2020, DOI: 10.1590/s1517-707620200001.0916, Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151770762020000100344&tlng=en.

CHEN, Y.; WANG, X.; ZHAO, Y.; SONG, B.; YU, T. Interactive optimization of process parameters and coating analysis of laser cladding JG-3 powder. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, v. 107, n. 5-6, p. 2623-2633, mar. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-05155-7>.

COELHO, A. W. F.; ARAUJO, A. C.; THIRÉ, R. M. S. M. Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação. *Matéria* (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, 6 dez. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0600>.

COLEGROVE, P.; MCANDREW, A. R.; DING, J.; MARTINA, F., KURZYNSKI, P., WILLIAMS, S., “System Architectures for Large Scale Wire + Arc Additive Manufacture,” 10th 8 International Conference on Trends in Welding Research, Japan, October 2016.

DADBAKHS, S.; HAO, L.; JERRARD, P.G.; ZHANG, D.Z. Experimental investigation on selective laser melting behaviour and processing windows of in situ reacted Al/Fe₂O₃ powder mixture. **Powder Technology**, v. 231, p. 112-121, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.07.061>.

DASS, A.; MORIDI, A. State of the Art in Directed Energy Deposition: from additive manufacturing to materials design. *Coatings*, v. 9, n. 7, p. 418, 29 jun. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings9070418>.

FAUST, Ricardo Casagrande; MINETTO, Rodrigo; VOLPATO, Neri. Parallel tool-path generation for Additive Manufacturing: a gpu-based zigzag filling. *Advances In Industrial And Manufacturing Engineering*, [S.L.], v. 6, p. 100107, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aime.2022.100107>.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2. ed. Nova Iorque: Springer, 2015.

GOMES, B. F. Estudo da soldagem de revestimento a laser em tubo de AISI 4130 EMPREGANDO PÓ DE INCONEL 625. 2016. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

GUAN, Xiaoyi; ZHAO, Yaoyao Fiona. Modeling of the laser powder-based directed energy deposition process for additive manufacturing: a review. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5-6, p. 1959-1982, mar. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-05027-0>.

GULLIPALLI, Chaitanya; THAWARI, Nikhil; CHANDAK, Ayush; GUPTA, Tv. Statistical Analysis of Clad Geometry in Direct Energy Deposition of Inconel 718 Single Tracks. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, v. 31, n. 8, p. 6922-6932, 15 abr. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-022-06736-1>.

KINDERMANN, R.M.; ROY, M.J.; MORANA, R.; FRANCIS, J.A.. Effects of microstructural heterogeneity and structural defects on the mechanical behaviour of wire + arc additively manufactured Inconel 718 components. *Materials Science And Engineering: A*, [S.L.], v. 839, p. 142826, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2022.142826>.

KRUTH, J. P.; LEU, M. C.; NAKAGAWA, T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, *CIRP Annals*, v. 47, n. 2, p. 525-540, 1998, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63240-5.

KUMAR, S. Pratheesh; ELANGO, S.; MOHANRAJ, R.; RAMAKRISHNA, J.R.. A review on properties of Inconel 625 and Inconel 718 fabricated using direct energy deposition. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 7892-7906, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.566>.

LI, Yan; FENG, Zuying; HAO, Liang; HUANG, Lijing; XIN, Chenxing; WANG, Yushen; BILOTTI, Emiliano; ESSA, Khamis; ZHANG, Han; LI, Zheng. A Review on Functionally Graded Materials and Structures via Additive Manufacturing: from multi :scale design to versatile functional properties. *Advanced Materials Technologies*, v. 5, n. 6, p. 1900981, 29 abr. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/admt.201900981>.

MARTINA, F.; MEHNEN, J.; WILLIAMS, S.W.; COLEGROVE, P.; WANG, F.. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V. *Journal Of Materials Processing Technology*, v. 212, n. 6, p. 1377-1386, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>.

MAZZARISI, M., CAMPANELLI, S. L, ANGELASTRO, A. Phenomenological modelling of direct laser metal deposition for single tracks. *Int J Adv Manuf Technol* 111, 1955–1970 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06204-x>.

MUTHU, S. S.; SAVALANI, M. M. *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing* (Vol. 2). Singapore: Springer. 2016.

RIBEIRO, G.E., WONG, V.E.D, SANITÁ, W.R.V., RODRIGUES, A.R. Effect of laser power and powder morphology on surface roughness of Ti₆Al₄V produced by laser powder – directed energy deposition. 12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Brasília, p. 1-8, maio 2023.

SPECIAL METALS. Technical bulletin INCONEL® alloy 625, disponível em: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>. Acesso em: outubro de 2022.

Specification of nickel base alloy 718(UNS N07718) for oil and gas drilling and production equipment, API Specification 6A718, first edition, Washington, D.C., 2004.

SREEKANTH, S. **Laser-Directed Energy Deposition: Influence of Process Parameters and Heat-Treatments**. 2020. 90 f. Tese (Doutorado) - Curso de Production Technology, University West, Trollhättan, 2020.

SRIVASTAVA, Manu; RATHEE, Sandeep; PATEL, Vivek; KUMAR, Atul; KOPPAD, Praveennath G. A review of various materials for additive manufacturing: recent trends and processing issues. **Journal Of Materials Research And Technology**, v. 21, p. 2612-2641, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.015>.

SRIVATSAN, T. S.; SUDARSHAN, T. S. *Additive Manufacturing Innovations, Advances, and Applications*. 1st Edition, Boca Raton, CRC Press, 2015. p.460.

THOMPSON, S. M.; BIAN, L.; SHAMSAEI, N.; YADOLLAHI, A. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: transport phenomena, modeling and diagnostics. **Additive Manufacturing**, v. 8, p. 36-62, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.001>.

TOYSERKANI, E.; CORBIN, S.; KHAJEPOUR, A. Laser Cladding. Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC Press LLC, 2005.

VEIGA, F. I.; FARIA, M. I. S. T.; COELHO, G. C. Superliga Inconel-718: Caracterização microestrutural e validação da base de dados termodinâmicos: cadernos uniFOA. Edição Especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais, p. 77-85, dez. 2012.

WILLIAMS, S.W., MARTINA, F., ADDISON, A. C., Wire arc additive manufacturing. In: Materials Science and Technology. v. 32, pp. 641–647. 2016.

WONG, V. E.; LAHR, G. J. G; CAURIN, G. A. P.; RODRIGUEZ, A. R.; COELHO, R. T.; A COMPREHENSIVE EVALUATION OF THE LASER POWER AND POWDER FEED RATE FOR DIRECTED ENERGY DEPOSITION PROCESS USING PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Brasília, p. 1-8, maio 2023.

YANG, Seung Weon; YOON, Jongcheon; LEE, Hyub; SHIM, Do Sik. Defect of functionally graded material of inconel 718 and STS 316L fabricated by directed energy deposition and its effect on mechanical properties. Journal Of Materials Research And Technology, v. 17, p. 478-497, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.029>.

ZHOU, S.; DAI, X.; ZENG, X. Effects of processing parameters on structure of Ni-based WC composite coatings during laser induction hybrid rapid cladding. **Applied Surface Science**, v. 255, n. 20, p. 8494-8500, jul. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.05.161>.