

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

MATHEUS VITTI

AVALIAÇÃO DA DEFLEXÃO RÁPIDA DE FEIXE DE LASER EM LPBF: INFLUÊNCIA
DE PARÂMETROS NA QUALIDADE, PRECISÃO E DENSIDADE EM DIFERENTES
GEOMETRIAS

Joinville
2025

MATHEUS VITTI

AVALIAÇÃO DA DEFLEXÃO RÁPIDA DE FEIXE DE LASER EM LPBF: INFLUÊNCIA
DE PARÂMETROS NA QUALIDADE, PRECISÃO E DENSIDADE EM DIFERENTES
GEOMETRIAS

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Curso
de Engenharia Aeroespacial, no Centro
Tecnológico de Joinville, da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Marcos Alves Rabelo

Joinville
2025

MATHEUS VITTI

AVALIAÇÃO DA DEFLEXÃO RÁPIDA DE FEIXE DE LASER EM LPBF: INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA QUALIDADE, PRECISÃO E DENSIDADE EM DIFERENTES GEOMETRIAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Curso de Engenharia Aeroespacial, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 23 de novembro de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha
Membro(a)
UFSC

Prof. Dr. Andrea Piga Carboni
Membro(a)
UFSC

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram, me guiaram e estiveram e estarão comigo ao longo de toda essa jornada profissional e pessoal e à todas as pessoas próximas à mim, que tornaram todos os momentos mais divertidos e menos estressantes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente ao meu orientador Marcos Alves Rabelo, por ter me auxiliado, dado dicas e sugestões ao longo da escrita do TCC. Também sou grato a Daniel Heußen, que me guiou no meu estágio na Alemanha e compartilhou lições valiosas que levarei comigo ao longo da minha carreira e da minha vida. Gostaria também de agradecer ao Fraunhofer ILT, um dos principais institutos de pesquisa do mundo, por me dar a oportunidade de aprender, me desenvolver e escrever o TCC com base no que atuava durante o tempo que estava lá.

Aos meus pais, agradeço profundamente, pois sempre estiveram comigo em todas as ocasiões, auxiliando, apoiando e motivando. O homem que me tornei hoje, é reflexo da criação e amor deles, nada seria possível sem isso.

Além disso, quero agradecer à Luah, Allan, Caio, Carol, Deina, Dudu, Felipe, Gui, Henrique, Ian, Izabela, LM, Marcus, Pauletti, Pedro, Rafa, Thomás, Thomas, Tigrao, Verdelli, Zara e Zé, pois cada conversa com essas pessoas sempre me trouxe algo valioso, seja por papos sem pé nem cabeça, por conversas profundas sobre a vida e o universo, ou até por puxões de orelha.

*“ Explore o mundo. Quase tudo se torna interessante quando você se aprofunda o suficiente.
”*

Richard Phillips Feynman

RESUMO

Este trabalho avalia a viabilidade do sistema de deflexão rápida de feixe (RBDS), no processo de fusão em leito de pó a laser (LPBF), uma técnica de manufatura aditiva amplamente utilizada na fabricação de componentes de alta complexidade. O RBDS propõe a utilização de um único feixe de laser capaz de emular sistemas de múltiplos lasers a partir de um defletor acústico-óptico, buscando aumentar a produtividade sem as limitações mecânicas e de custo associadas aos sistemas multi-lasers convencionais. Amostras de Inconel 625 foram produzidas em formas de paredes finas, blocos lattice e blocos densos, a fim de analisar os critérios propostos de superfície morfologicamente uniforme, elevada precisão nas dimensões geométricas e densidade elevada para diversos parâmetros. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar faixas de operação ótimas do RBDS para os três tipos de geometria analisados. Essas faixas apresentaram amostras com alta densidade, atingindo amostras com valores maiores que 99,99%, alta rugosidade e alta precisão, atendendo aos critérios propostos. Conclui-se que o RBDS é um sistema promissor, oferecendo potencial de aumento de produtividade e redução de complexidade operacional, mantendo a qualidade esperada do processo LPBF.

Palavras-chave: deflexão rápida de feixe de laser; fusão a laser em leito de pó; manufatura aditiva.

ABSTRACT

This work evaluates the feasibility of the rapid beam deflection system (RBDS) in the laser powder bed fusion (LPBF) process, an additive manufacturing technique widely used in the manufacture of highly complex components. The RBDS proposes the use of a single laser beam capable of emulating multiple laser systems using an acousto-optic deflector, seeking to increase productivity without the mechanical and cost limitations associated with conventional multi-laser systems. Inconel 625 samples were produced in the form of thin walls, lattice blocks, and dense blocks in order to analyze the proposed criteria of morphologically uniform surface, high precision in geometric dimensions, and high density for various parameters. Based on the results obtained, it was possible to identify optimal RBDS operating ranges for the three types of geometry analyzed. These ranges presented samples with high density, uniformity, and precision, meeting the proposed criteria. It is concluded that RBDS is a promising system, offering potential for increased productivity and reduced operational complexity, while maintaining the expected quality of the LPBF process.

Keywords: rapid laser beam deflection; laser powder bed fusion; additive manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção de peças de MA de prestadores de serviços independentes (em milhões de dólares)	17
Figura 2 – Esquema do processo de LPBF	18
Figura 3 – Representação esquemática da emissão CW	19
Figura 4 – Representação esquemática da emissão PW	19
Figura 5 – Sobreposição de pulso	21
Figura 6 – Parâmetros que determinam a configuração dos pontos	22
Figura 7 – Configuração de pontos com $d_p = 200 \mu m$, $N = 2$ e $\theta = 0 \text{ deg}$	23
Figura 8 – Trilhas formadas a partir da relação entre frequência e velocidade para determinada configuração de pontos de laser	23
Figura 9 – Unidade de direcionamento	26
Figura 10 – Sistema de escaneamento	27
Figura 11 – Fonte de laser usada	27
Figura 12 – Plataforma de construção usada	28
Figura 13 – Faixa permitida para a posição dos pontos de laser	28
Figura 14 – Modelos construídos: a) paredes finas, b) blocos densos, c) blocos lattice	29
Figura 15 – Configuração de pontos usada para a construção das paredes	31
Figura 16 – Configuração dos pontos de laser para o experimento	32
Figura 17 – Gráfico tridimensional para a categorização da continuidade das paredes duplas	39
Figura 18 – Gráfico tridimensional para a categorização da continuidade das paredes simples	40
Figura 19 – Imagens de referência como base comparativa para o critério de continuidade	43
Figura 20 – Gráfico tridimensional para a categorização da continuidade das amostras	44
Figura 21 – Imagens de referência como base comparativa para o critério de adesão	44
Figura 22 – Gráfico tridimensional para a categorização da adesão de partículas nas amostras	45
Figura 23 – Amostras de blocos densos organizadas por parâmetros	46
Figura 24 – Rugosidade superficial gerada por cada parâmetro	47
Figura 25 – Densidade gerada por cada parâmetro	48

Figura 26 – Seções transversais das amostras com a menor (68,410%) e maior densidade (99,993%), apresentadas, respectivamente, na parte superior e na parte inferior. 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da liga INCONEL 625	25
Tabela 2 – Tabela com as variáveis utilizadas para o experimento	31
Tabela 3 – Parâmetros utilizados no experimento para a construção dos blocos lattice	32
Tabela 4 – Parâmetros utilizados no experimento para a construção dos blocos densos	33
Tabela 5 – Amostras das paredes finas fabricadas verticalmente e organizadas por parâmetros	35
Tabela 6 – Amostras das paredes finas fabricadas horizontalmente e organizadas por parâmetros	36
Tabela 7 – Rugosidade média linear gerada por cada parâmetro e relacionada com a E_l das paredes duplas	37
Tabela 8 – Rugosidade média linear gerada por cada parâmetro e relacionada com a E_l das paredes simples	38
Tabela 9 – Tabela com amostras de blocos lattice organizadas por parâmetro .	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	– Sociedade Americana para Testes e Materiais
CW	– Onda contínua
DoE	– Projeto de experimentos
LPBF	– Fusão em leito de pó a laser
MA	– Manufatura aditiva
PW	– Onda pulsada
RBDS	– Sistema de deflexão rápida de feixe
STL	– Formato de arquivo de modelo tridimensional
VED	– Densidade de energia volumétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

d_f	– Diâmetro do feixe de laser
d_h	– Distância entre escaneamentos
d_p	– Distância entre pontos
d_t	– Distância entre trilhas
d_z	– Espessura da camada
E_l	– Energia linear
$E_{l\text{trilha}}$	– Energia linear por trilha
f	– Frequência de operação do laser
l	– Comprimento da trilha formada
N	– Número de pontos de laser
O_L	– Sobreposição de linha
O_P	– Sobreposição de pulso
P_{avg}	– Potência média
P_{peak}	– Potência de pico
P_l	– Potência do laser
R_a	– Rugosidade média aritmética
t_{off}	– Tempo desligado do pulso
t_{on}	– Tempo ligado do pulso
v_s	– Velocidade de escaneamento
δ	– Ciclo de trabalho
ρ	– Densidade
θ	– Ângulo dos pontos em relação à horizontal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	MANUFATURA ADITIVA	16
2.2	FUSÃO A LASER EM LEITO DE PÓ	17
2.3	FUNDAMENTOS DA EMISSÃO DE LASER EM LPBF	18
2.4	PARÂMETROS INTRODUZIDOS PELO RBDS	21
2.5	INCONEL 625	24
3	METODOLOGIA	26
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	26
3.1.1	Pó metálico	26
3.1.2	Equipamentos de LPBF	26
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
3.2.1	Modelos	29
3.2.1.1	Paredes finas	29
3.2.1.2	Blocos lattice	30
3.2.1.3	Blocos densos	30
3.2.2	Parâmetros de Impressão	30
3.2.2.1	Paredes finas	30
3.2.2.2	Blocos lattice	31
3.2.2.3	Blocos densos	32
3.3	ANÁLISE DAS AMOSTRAS	33
4	RESULTADOS	34
4.1	PAREDES FINAS	34
4.2	BLOCOS LATTICE	40
4.3	BLOCOS DENSOS	45
5	CONCLUSÃO	50
5.1	TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) é um processo de fabricação utilizado para a criação de objetos a partir de modelos digitais. Esse processo ocorre por camadas e ao contrário de outros métodos de fabricação que removem material, a MA adiciona material para a construção da peça. Esse processo torna possível a criação de objetos com geometrias complexas, especialmente em áreas como a engenharia mecânica, aeroespacial e biomédica, onde são comuns componentes como trocadores de calor, estruturas lattice e implantes personalizados.

Entre as técnicas de MA, no processo de fusão em leito de pó a laser (LPBF), uma fina camada de pó é depositada sobre uma placa de construção e fundida seletivamente por um laser, criando estruturas conforme o modelo digital (Yadroitsev *et al.*, 2021). Entretanto, apesar dos avanços, o LPBF ainda apresenta limitações que precisam ser superadas, como deficiências na precisão geométrica e na qualidade superficial, que afetam diretamente a qualidade das peças fabricadas (Cao *et al.*, 2021). Tais problemas resultam das inúmeras variáveis envolvidas no processo (potência, velocidade do feixe e espaço entre trilhas), tornando a definição dos parâmetros de fabricação uma tarefa crítica para garantir a qualidade final da peça (Zhang *et al.*, 2019).

Diante disso, o uso de máquinas LPBF que possuem múltiplos feixes de laser (multi-lasers) é conveniente quando se deseja aumentar a produtividade e reduzir o custo por peça. Contudo, essa configuração torna o processo mais complexo, pois exige calibração e sincronização individual de cada feixe e eleva significativamente os custos de manutenção e operação (Pfalz *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a fim de simplificar a complexidade inerente às máquinas multi-lasers, o uso de um único feixe de laser capaz de emular múltiplos feixes mostra-se uma solução promissora. Por este motivo, o sistema de deflexão rápida de feixe (RBDS) surge como uma nova proposta de sistema LPBF que, por meio da rápida deflexão do feixe, emula múltiplos feixes de laser. Até o momento, não existem referências prévias sobre o RBDS, sendo este o primeiro trabalho a abordar detalhadamente seu conceito e aplicação. Compreender o comportamento do RBDS é fundamental para a avaliação do potencial de emprego e desempenho em diferentes contextos, tais como a construção de paredes finas e blocos lattice.

Considerando isso, apresenta-se neste trabalho uma investigação do comportamento do RBDS, modificando os parâmetros de fabricação (potência, velocidade, frequência, número de pontos de laser e distância entre os pontos de laser), a fim de compreender as vantagens e limitações com base nos critérios de qualidade superficial, precisão geométrica e densidade. Diferentemente de Pfalz *et al.* (2023), que

compararam diversas estratégias para o uso de multi-lasers, avalia-se neste trabalho, como a deflexão rápida do feixe de laser que emula multi-lasers impacta as características das peças construídas.

Para tal finalidade construir-se-á diferentes estruturas e peças, com o intuito de analisar os critérios exigidos. Para a construção dessas peças, Bittner *et al.* (2025) sugerem o projeto de experimentos (DoE), que contribui para o desenvolvimento do ensaio, tanto na definição de um intervalo de parâmetros durante a fase de planejamento quanto na posterior análise dos dados experimentais. Por este motivo, realiza-se um DoE para investigar interações entre os parâmetros de fabricação que desempenham um papel fundamental no resultado final das peças que serão produzidas pelo RBDS.

Durante a fase experimental, monitorar-se-á possíveis fenômenos indesejados que possam comprometer a viabilidade do uso do parâmetro testado. Caso seja identificado risco de avaria ao maquinário, em função de determinado parâmetro, sua utilização será interrompida, e o experimento prossegue com os demais parâmetros.

Como forma de análise para identificar os parâmetros que atendem aos critérios estabelecidos, utilizar-se-á inspeção visual, avaliação de densidade e medição de rugosidade (Glaubitz *et al.*, 2025; Mergulhão; Neves, 2020). Esses métodos foram escolhidos por permitirem a comparação direta entre os parâmetros testados, possibilitando a seleção daquele que melhor se enquadra nos critérios definidos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estudar as vantagens e limitações do uso do RBDS para a construção de paredes finas, blocos lattice e blocos densos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar diferentes parâmetros na construção de amostras que determinam o intervalo de operação adequado ao RBDS;
- Caracterizar os efeitos do RBDS na formação das diferentes geometrias, considerando continuidade, adesão de partículas, rugosidade e comportamento térmico;
- Validar a viabilidade do RBDS na manufatura aditiva.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

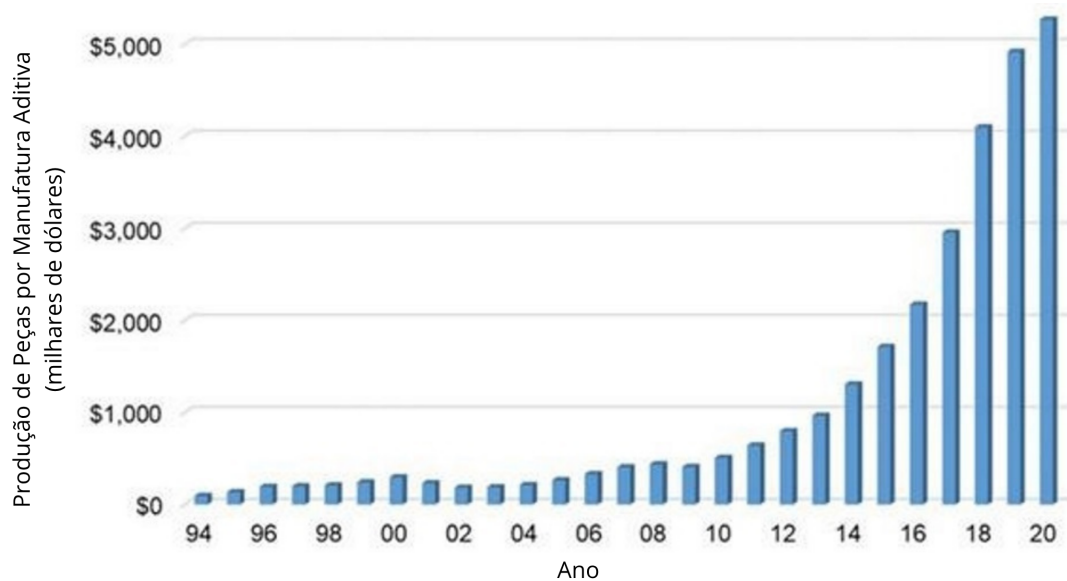
Para a validação da viabilidade do RBDS para uso em LPBF, é necessário um embasamento teórico dos fundamentos da MA e dos princípios de operação envolvidos. Nesta seção estão descritos os conceitos utilizados na avaliação do RBDS, partindo do entendimento da MA e avançando até os elementos essenciais necessários para a compreensão do sistema.

2.1 MANUFATURA ADITIVA

A primeira tentativa do que, futuramente, seria chamado de MA, se deu no final dos anos 1960, no Instituto Memorial Battelle. O experimento envolveu o cruzamento de dois feixes de laser em um tanque de resina, tentando polimerizar (solidificar) o material no ponto de interseção (Wohlert *et al.*, 2023), no entanto, o primeiro sistema funcional foi criado apenas em 1984 por Charles W. Hull, da 3D Systems Corp. Denominado estereolitografia, esse sistema consistia na cura de fotopolímeros por luz ultravioleta, cujo custo elevado tornava-o impraticável para aplicações industriais naquele período (Attaran, 2017).

Em 1989, a modelagem por deposição fundida foi inventada por Scott Crump, cofundador da Stratasys, e se tornou o método mais popular baseado em extrusão de material (Rajan *et al.*, 2022). Porém foi apenas 20 anos depois, em 2009, quando as patentes expiraram, que criou-se um novo campo de interesse e investimento (Attaran, 2016). Portanto, a indústria de MA é considerada recente e está em constante evolução, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Produção de peças de MA de prestadores de serviços independentes (em milhões de dólares)



Fonte: Belforte (2020).

Os métodos existentes de MA foram desenvolvidos para atender à demanda de construir estruturas complexas e com elevada precisão geométrica. Produção acelerada, criação de estruturas grandes, diminuição de defeitos de impressão e melhora das propriedades do material, são alguns dos fatores que impulsionaram o desenvolvimento das tecnologia de MA (Ngo *et al.*, 2018).

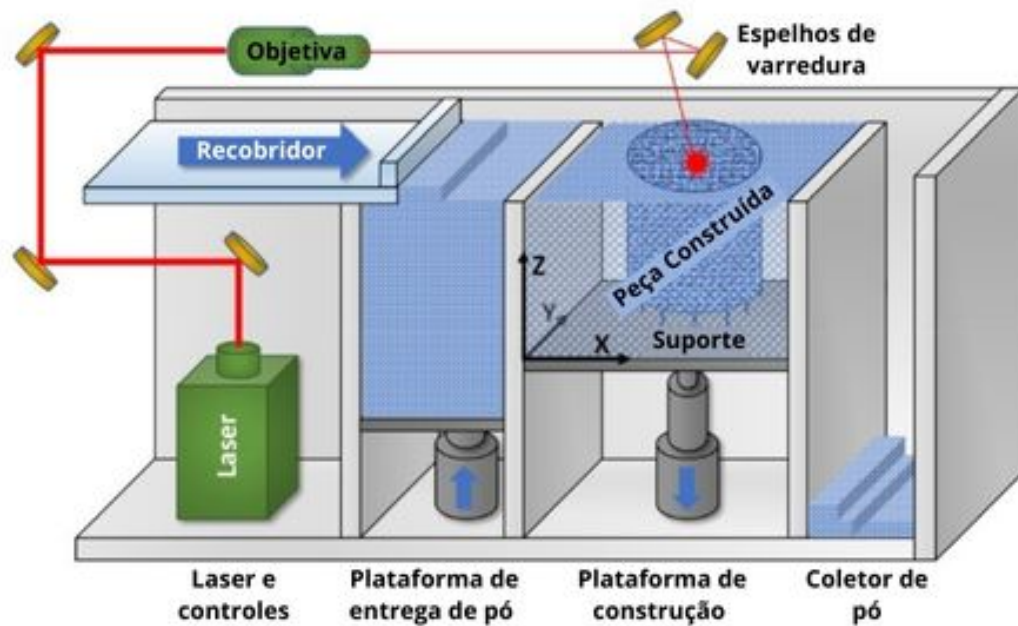
Atualmente, as técnicas de MA são divididas em sete categorias pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM), entre elas, fotopolimerização em cuba, extrusão de material, LPBF, jateamento de material, jateamento de aglutinante, deposição direta de energia e laminação de chapa (Dubey *et al.*, 2024).

Neste trabalho, enfatiza-se o processo de LPBF, técnica de MA na qual o RBDS será aplicado.

2.2 FUSÃO A LASER EM LEITO DE PÓ

O LPBF é uma técnica de MA na qual uma fina camada de material em pó é depositada sobre uma placa de construção por meio de um recobridor, sendo então fundida seletivamente por um feixe de laser. Após a fusão de cada camada, uma nova é aplicada, repetindo-se o processo sucessivamente até a construção completa da peça (Yavari *et al.*, 2021). Um esquema do processo é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Esquema do processo de LPBF



Fonte: Adaptado de Bulgarevich *et al.* (2021, p. 2).

A definição dos parâmetros é fundamental para a construção de uma peça que atenda aos critérios requeridos. Uma combinação de parâmetros inadequados, pode resultar em pó não fundido completamente, formação de cavidades e instabilidade da poça de fusão (Ahmed *et al.*, 2022).

Os quatro principais parâmetros são potência do laser, velocidade de escaneamento, espaçamento entre as linhas de varredura e espessura de camada. De acordo com Baskin e Yuce (2024), esses parâmetros afetam significativamente as propriedades mecânicas e metalúrgicas da peça final, impactando sua qualidade e desempenho.

2.3 FUNDAMENTOS DA EMISSÃO DE LASER EM LPBF

De acordo com Paschotta (2005), a operação em onda contínua (CW) de fontes de luz refere-se ao funcionamento ininterrupto da emissão. No contexto de lasers, isso implica que o laser é continuamente alimentado com energia e emite luz ininterruptamente. Por outro lado, lasers pulsados operam em onda pulsada (PW), emitindo luz em forma de pulsos ópticos, o que introduz uma série de novos parâmetros a serem considerados.

Os lasers de operação CW são preferíveis na produção de peças grandes e totalmente densas. Na Figura 3, pode-se visualizar o esquema mostrando como a operação em CW funciona, onde em vermelho, é representado a poça de fusão. Por outro lado, a operação em PW, como é possível ver na Figura 4, é mais adequada para

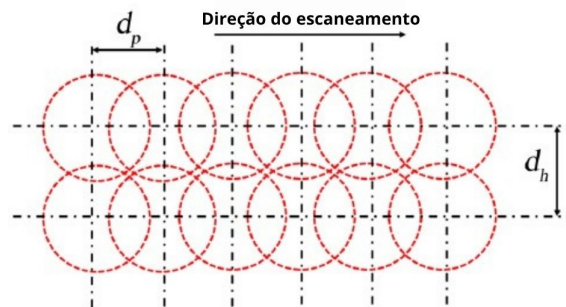
a fabricação de elementos finos, como estruturas lattice, ou quando são necessárias características de alta precisão, já que se possui um controle maior da poça de fusão (Demir *et al.*, 2017).

Figura 3 – Representação esquemática da emissão CW



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 4 – Representação esquemática da emissão PW



Fonte: Adaptado de Demir *et al.* (2017, p. 3).

As equações fundamentais que descrevem a emissão de onda pulsada são apresentadas detalhando a relação entre pico de potência, potência média, diâmetro do feixe, frequência, entre outros parâmetros, conforme discutido por Caprio *et al.* (2018).

Como é possível ver na Figura 4, o parâmetro distância entre pontos (d_p) representa a distância entre dois pulsos sucessivos de laser e a distância entre escaneamentos (d_h) é um parâmetro de projeto, que especifica vetores onde o laser deve escanear. Além disso, a espessura de camada (d_z) corresponde à espessura de pó metálico adicionada a cada camada pelo recobridor, enquanto o diâmetro do feixe (d_f) refere-se à largura do feixe no ponto focal.

A frequência, chamada na literatura de taxa de repetição de pulso (PRR), representa a frequência do ciclo de pulsos. É definida pela Equação 1.

$$PRR = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \quad (1)$$

t_{on} é o tempo de exposição, que descreve por quanto tempo o pulso do laser permanece ativo. Por outro lado, t_{off} representa a pausa de descanso, definindo o intervalo entre o fim de um pulso e o início do próximo. Agora, é possível definir o ciclo de trabalho, mostrado na Equação 2, que representa a relação entre o tempo em que o pulso de laser está ativo e o tempo total do ciclo.

$$\delta = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2)$$

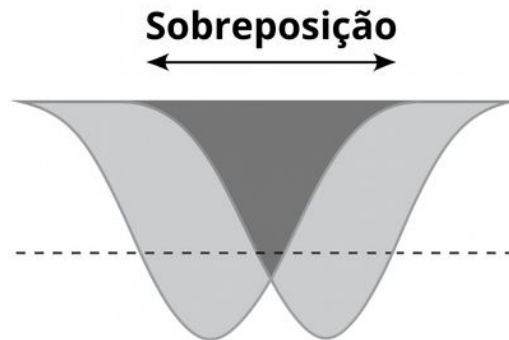
O ciclo de trabalho é um dos parâmetros mais importantes em sistemas de ondas pulsadas, pois permite controlar a taxa de perda de calor, já que determina o tempo ativo e inativo do laser. Se o ciclo de trabalho tiver um valor alto, isso significa que mais calor será gerado, mas o processo será mais rápido. Quando o valor do ciclo de trabalho for reduzido, o sistema perderá mais calor porque o laser permanecerá inativo por mais tempo, resultando em um processo mais lento.

Com o ciclo de trabalho, é possível definir a diferença entre o pico de potência e a média de potência. O pico de potência é a potência em Watts fornecida pela fonte de laser, enquanto a média de potência, mostrada na Equação 3, é o pico de potência vezes o ciclo de trabalho, ou seja, a potência média efetiva fornecida ao material ao longo do tempo.

$$P_{avg} = P_{peak} \cdot \delta \quad (3)$$

Outro parâmetro importante nos sistemas de ondas pulsadas é a sobreposição. Existem dois tipos de sobreposição, sendo a sobreposição de pulso (O_P), que pode ser visualizado na Figura 5, que representa o quanto os pulsos adjacentes se sobrepõem, e a sobreposição de linha (O_L), que representa o quanto os pulsos de diferentes linhas se sobrepõem. Elas podem ser calculadas a partir das Equações 4 e 5.

Figura 5 – Sobreposição de pulso



Fonte: Adaptado de Viale *et al.* (2022).

$$O_P = \frac{d_f - d_p}{d_f} \quad (4)$$

$$O_L = \frac{d_f - d_h}{d_f} \quad (5)$$

Além disso, a densidade de energia volumétrica (VED) e a energia linear (E_l), representa a quantidade de energia fornecida por unidade de volume e por unidade de comprimento, respectivamente. Desta forma, esses valores são calculados de acordo com a Equação 6 e 7.

$$VED = \frac{P_l \cdot t_{on}}{d_h \cdot d_p \cdot d_z} \quad (6)$$

$$E_l = \frac{P_l}{v_s} \quad (7)$$

A partir dessa base de fundamentação sobre os processos convencionais, torna-se possível apresentar os novos parâmetros que passam a incorporar o processo de LPBF pelo uso do RBDS.

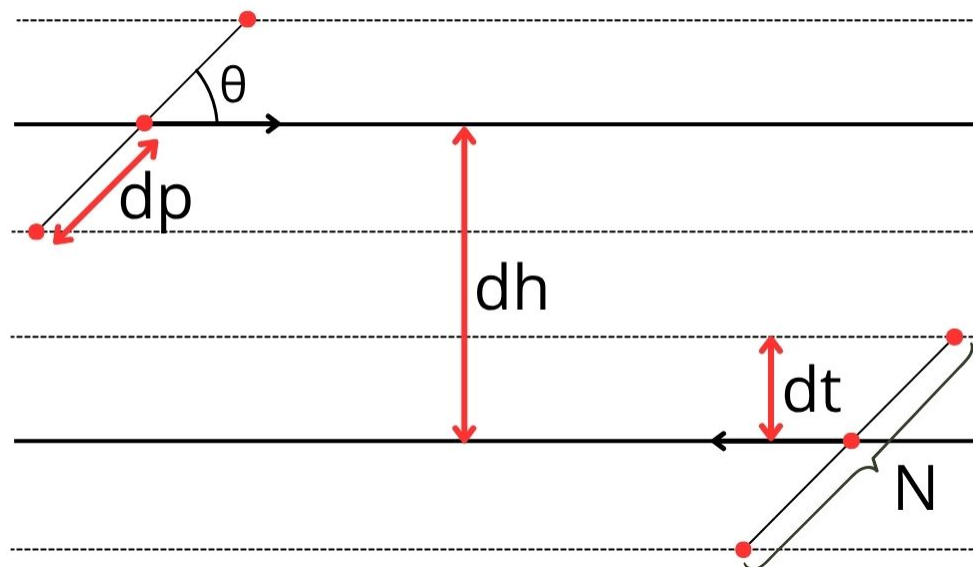
2.4 PARÂMETROS INTRODUZIDOS PELO RBDS

No RBDS, o sistema de emissão de laser é uma combinação de emissão CW e PW, uma vez que a fonte do sistema é de um único laser de emissão CW, porém seu funcionamento se assemelha ao de uma máquina de LPBF de emissão PW com múltiplos feixes de laser.

Internamente, um defletor acústico-óptico, direciona o feixe para as posições designadas pelo operador, o número de posições define o número de pontos de laser no experimento. Além disso, visto que não há pausa de descanso (t_{off}) no RBDS, o parâmetro de frequência passa a determinar a periodicidade em que a taxa de transição entre as posições dos pontos ocorre. Devido à rápida mudança de posição, o feixe se assemelha a um laser de emissão PW quando observado isoladamente em uma única trilha, embora emita luz constantemente.

Deve-se, portanto, apresentar as diferenças em comparação a um sistema PW convencional. Na Figura 6, observa-se os parâmetros fundamentais do RBDS que determinam a configuração dos pontos, entre eles, a distância entre pontos (dp), a distância entre escaneamentos (dh), que representa a trilha escaneada pelo laser, caso não houvesse deflexão do feixe, a distância entre trilhas (dt), que representa a trilha efetiva escaneada pelo laser devido a deflexão do feixe, o número de pontos de laser (N) e o ângulo dos pontos em relação à horizontal (θ).

Figura 6 – Parâmetros que determinam a configuração dos pontos



Fonte: Autoria própria (2025).

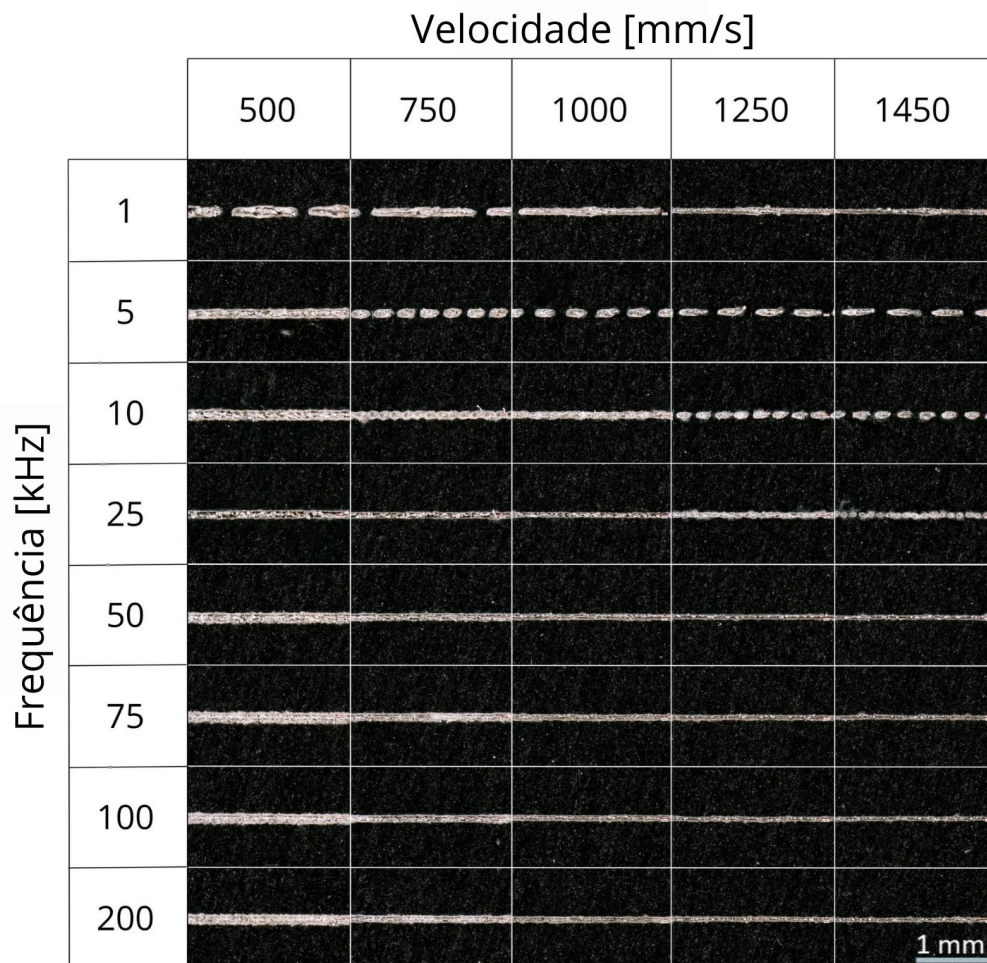
Acrescenta-se que, a frequência, configuração dos pontos e velocidade de escaneamento atuam em conjunto na determinação do resultado final das trilhas formadas. Para visualização, a Figura 8 apresenta a interação entre frequência e velocidade em relação à uma configuração de pontos utilizada de exemplo apresentada na Figura 7

Figura 7 – Configuração de pontos com $d_p = 200 \mu m$, $N = 2$ e $\theta = 0 \text{ deg}$



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 8 – Trilhas formadas a partir da relação entre frequência e velocidade para determinada configuração de pontos de laser



Fonte: Autoria própria (2025)

O comprimento (l) de cada trilha formada por um único ponto de laser, pode ser determinado pela Equação 8.

$$l = \frac{v_s}{f} \quad (8)$$

Na sequência, distância entre trilhas (d_t), é a variável de projeto análoga à distância entre escaneamentos (d_h) nos processos em LPBF convencionais. No RBDS, a unidade de escaneamento, que comanda os espelhos de varredura, opera de forma independente da unidade de direcionamento, que comanda a configuração dos pontos

de laser, executando apenas o percurso definido pelo arquivo STL (formato de arquivo de modelo 3D amplamente usado em manufatura aditiva). Por esse motivo, deve-se considerar a distância entre trilhas que se deseja na peça final e o número de pontos de laser, de modo a projetar a peça com distância entre escaneamentos de acordo com a equação 9.

$$d_h = d_t \cdot N \quad (9)$$

Além disso, devido a possibilidade de rotação dos pontos em relação ao sentido de escaneamento, a distância entre pontos (d_p) deve ser calculada por meio da equação 10, em função do ângulo dos pontos em relação a horizontal (θ) desejado.

$$d_p = \frac{d_t}{\text{sen}(\theta)} \quad (10)$$

Ademais, o uso do RBDS introduz um novo tipo de energia, denominada energia linear por trilha. Como é possível alterar as quantidades de pontos de laser e ter mais de uma trilha por vetor de escaneamento nesse sistema, a energia linear é dividida entre as trilhas de cada vetor. Portanto, a energia linear por trilha ($E_{l_{trilha}}$) deve ser calculada de acordo com a Equação 11.

$$E_{l_{trilha}} = \frac{E_l}{N} \quad (11)$$

Evidencia-se, a partir dos parâmetros abordados, a interdependência das variáveis do processo, bem como se demonstra que pequenas alterações desses parâmetros influenciarão o resultado da superfície, precisão geométrica e densidade das amostras a serem produzidas com INCONEL 625.

2.5 INCONEL 625

O INCONEL 625 (UNS N06625) é uma superliga de níquel. Seu desenvolvimento teve início na década de 1950, com o objetivo de atender a demanda da época por um material de alta resistência, destinado à aplicação em tubulações de usinas de energia a vapor supercrítico. As exigências estabelecidas para o material incluíam alta soldabilidade, elevada resistência à deformação, alta resistência a corrosão, fá-

cil fabricação e ausência de endurecimento por envelhecimento (Eiselstein; Tillack, 1991).

A Tabela 1 apresenta a composição química da liga 625. De acordo com Floreen *et al.* (1994), os altos teores de cromo e molibdênio conferem elevada resistência à corrosão e alta resistência mecânica. Embora a adição de alumínio e titânio contribua para a resistência à oxidação e para a estabilidade térmica da liga, suas concentrações são mantidas reduzidas com o objetivo de evitar o endurecimento por envelhecimento e preservar a boa soldabilidade.

Tabela 1 – Composição química da liga INCONEL 625

Elemento	Composição (wt.%)
Níquel (Ni)	58,0 mín.
Cromo (Cr)	20,0 – 23,0
Ferro (Fe)	5,0 máx.
Molibdênio (Mo)	8,0 – 10,0
Nióbio (Nb) + Tântalo (Ta)	3,15 – 4,15
Carbono (C)	0,10 máx.
Manganês (Mn)	0,50 máx.
Silício (Si)	0,50 máx.
Fósforo (P)	0,015 máx.
Enxofre (S)	0,015 máx.
Alumínio (Al)	0,40 máx.
Titânio (Ti)	0,40 máx.
Cobalto (Co)	1,0 máx.

Fonte: Adaptado de SpecialMetals (2013, p. 1).

Devido à difícil trabalhabilidade por processos convencionais de fabricação, dada a sua alta resistência mecânica e forte encruamento, a liga 625 se mostra adequada para processos de LPBF. Segundo Tian *et al.* (2019), essa liga apresenta boa capacidade de conformação por meio de LPBF, com uma ampla faixa de parâmetros de processo, e é possível obter estruturas de alta qualidade mediante o controle adequado desses parâmetros.

3 METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada para a realização da preparação, execução e análise dos experimentos, partindo dos materiais e equipamentos utilizados e avançando até a explicação de como as amostras construídas serão analisadas.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1.1 Pó metálico

O pó metálico utilizado neste trabalho foi o Inconel 625, adquirido da empresa britânica LPW Technology. Sua granulometria está na faixa de 15 a 45 μm , e sua composição química atende à norma especificada na Tabela 1.

3.1.2 Equipamentos de LPBF

Este trabalho tem como objetivo geral validar o RBDS, um sistema capaz de direcionar o feixe através de um defletor acústico-óptico, o que se diferencia de outros sistemas de direcionamento que apenas usam espelhos para o direcionamento do feixe.

O RBDS, desenvolvido pela Inleap Photonics, é dividido em duas partes. A primeira é unidade de direcionamento, mostrada na Figura 9, que comanda o número de pontos de laser e a frequência.

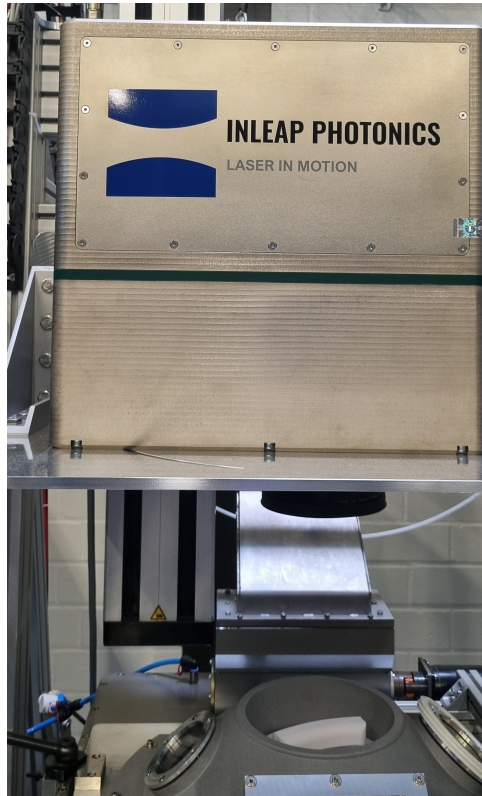
Figura 9 – Unidade de direcionamento



Fonte: Autoria própria (2025).

A segunda parte é o sistema de escaneamento, mostrado na Figura 10, controla a posição X e Y do feixe de laser e possui um diâmetro de feixe de 100 μm .

Figura 10 – Sistema de escaneamento



Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, na Figura 11, é mostrada a fonte de laser responsável por gerar o feixe de laser que será manipulado pelo RBDS, com o objetivo de fundir o pó metálico. Trata-se de uma IPG Photonics YLR-1000-WC, que opera em modo de emissão contínua (CW) com potência máxima de 1000 W e $1,07 \mu\text{m}$ de comprimento de onda.

Figura 11 – Fonte de laser usada

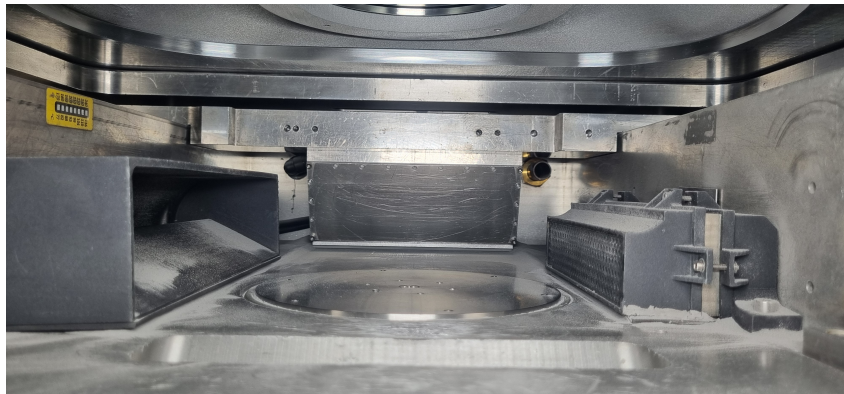


Fonte: Autoria própria (2025).

No interior da máquina, mostrado na Figura 12, encontra-se a plataforma de construção, com 17 cm de diâmetro. O recobridor de pó está localizado na parte mais

profunda do interior da máquina, enquanto o compartimento de coleta do excesso de pó está posicionado à frente da plataforma de construção. Os componentes pretos nas laterais fazem parte do sistema gerador de fluxo de gás de proteção. Além disso, todo o interior da máquina é preenchido com argônio, a fim de manter o ambiente inerte.

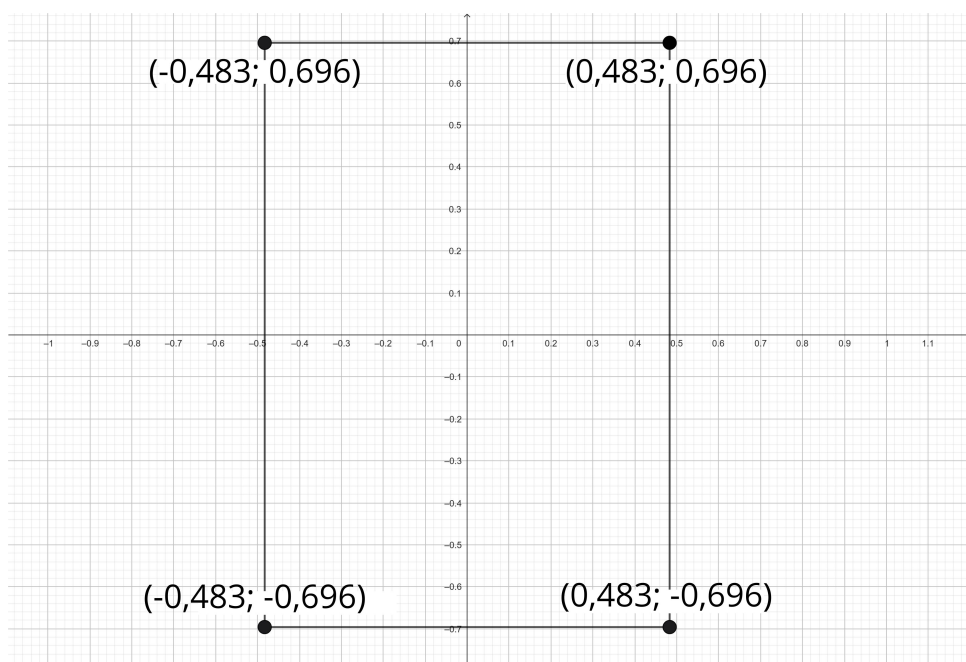
Figura 12 – Plataforma de construção usada



Fonte: Autoria própria (2025).

O sistema, entretanto, apresenta duas limitações. Existe um intervalo máximo em que o defletor acústico-óptico deflete o feixe de laser. Portanto, os pontos de laser só podem estar dentro do intervalo de $-0,483$ a $0,483$ mm no eixo X, e de $-0,696$ a $0,696$ mm no eixo Y. Essa região é apresentada na Figura 13. Onde o ponto $X = 0$ e $Y = 0$ é o ponto de escaneamento principal indicado pelo arquivo STL.

Figura 13 – Faixa permitida para a posição dos pontos de laser



Fonte: Autoria própria (2025).

A outra limitação apresentada pelo sistema, é a impossibilidade de alterar a sequência do RBDS durante a operação. A sequência define os parâmetros de quantidade de pontos, posição dos pontos e a frequência de mudança entre os pontos de laser. Isso impede que diferentes combinações desses parâmetros sejam testadas em um único experimento. Por este motivo, vários experimentos devem ser realizados a fim de estudar diferentes sequências.

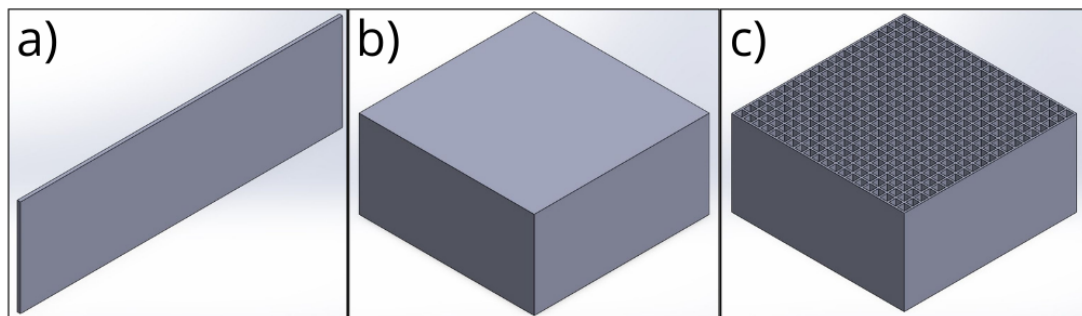
Dessa forma, embora a máquina permita a construção simultânea de diversas amostras, as limitações do RBDS impedem essa possibilidade. Com isso, torna-se necessário a realização de diferentes experimentos sempre que se deseja alterar a frequência ou o número de pontos de laser, mesmo que sejam poucas amostras. Essas limitações tornam o ciclo experimental mais lento e trabalhoso, uma vez que é necessário realizar a limpeza da máquina e substituir a cama de construção a cada novo experimento.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 Modelos

Três diferentes modelos foram utilizadas no trabalho, sendo elas paredes finas, blocos lattice e blocos densos, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Modelos construídos: a) paredes finas, b) blocos densos, c) blocos lattice



Fonte: Autoria própria (2025).

Na indústria aeroespacial e biomédica, estruturas leves e de alta resistência são fundamentais, por este motivo, as paredes finas e blocos lattice têm grande aplicabilidade para quando se deseja componentes que aliam a eficiência estrutural e redução de peso, atendendo as demandas desses setores.

3.2.1.1 Paredes finas

A construção de paredes finas por meio de LPBF é complexa devido ao acúmulo de calor, que não se dissipa de forma eficiente, podendo causar deformações

térmicas. Tornando-as boas candidatas à análise da precisão dimensional e qualidade superficial gerada pelo RBDS.

A parede possui geometria retangular com dimensões de 3 mm de altura, 10 mm de comprimento e sua espessura corresponde à largura de uma única trilha fundida pelo laser, que pode variar de acordo com os parâmetros selecionados.

3.2.1.2 Blocos lattice

Visto que o RBDS possibilita a emulação de diversos pontos de laser, a construção de blocos lattice é adequada para avaliar a capacidade do sistema de fundir múltiplas trilhas simultaneamente, em uma única varredura. Além disso, é possível analisar cada trilha separadamente, a fim de quantificar imperfeições como a adesão de partículas e uniformidade da superfície.

O bloco lattice tem dimensões de 10 mm de largura, 10 mm de comprimento e 5 mm de altura, sua base possui uma estrutura em formato de dentes, a fim de facilitar a remoção da amostra da placa de construção.

3.2.1.3 Blocos densos

A construção de blocos densos é fundamental para encontrar parâmetros que gerem estruturas de alta densidade, próxima a 100%. Deseja-se alta densidade devido ao desempenho mecânico ideal que é conferido às peças, visto que os pontos concentradores de tensão são reduzidos, aumentando a resistência à fadiga e diminuindo a variabilidade nas propriedades de resistência, tornando o material mais previsível (Praveena *et al.*, 2022). Em aplicações em indústrias como a aeroespacial, biomédica e automobilismo de alta performance, peças com poros comprometem a segurança e confiabilidade.

Por este motivo, blocos densos são produzidos para avaliar as diferentes combinações de parâmetros previamente aplicados nos blocos lattice, agora adotando menor distância entre trilhas, com o objetivo de validar aquelas que produzem peças com densidade superior a 99,8%, que, segundo Bittner *et al.* (2025), demonstra a processabilidade adequada do material em uma máquina LPBF.

3.2.2 Parâmetros de Impressão

A fim de atingir os principais critérios da pesquisa, diferentes parâmetros são testados para cada tipo de geometria.

3.2.2.1 Paredes finas

Os parâmetros N , θ , e dp são mantidos constantes em todo o experimento. As variáveis modificadas foram a potência de laser (P), variando entre 100 e 300 W,

a energia linear (E_l), entre 0,14 e 0,56 J/mm, e a frequência (f), entre 10 e 75 kHz. Apresenta-se na Tabela 2 os valores utilizados.

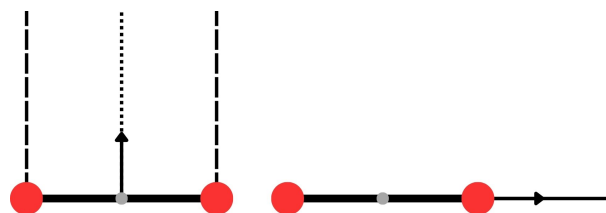
Tabela 2 – Tabela com as variáveis utilizadas para o experimento

Parâmetro	Valores
P	100, 140, 180, 210, 240, 275, 300 W
E_l	0,14; 0,28; 0,56 J/mm
f	10, 25, 75 kHz
N	2
θ	0°
d_p	200 μm

Fonte: Autoria própria (2025)

As paredes serão construídas na orientação vertical e horizontal, como apresentado na Figura 15. Quando orientado horizontalmente, o comprimento da parede é escaneado pelos dois pontos de laser, um seguindo o outro. Já na orientação vertical, o comprimento da parede será escaneado perpendicularmente à orientação dos pontos de laser. Nesse caso, cada ponto de laser gera uma trilha distinta, de modo que duas paredes serão formadas com a metade da energia linear.

Figura 15 – Configuração de pontos usada para a construção das paredes



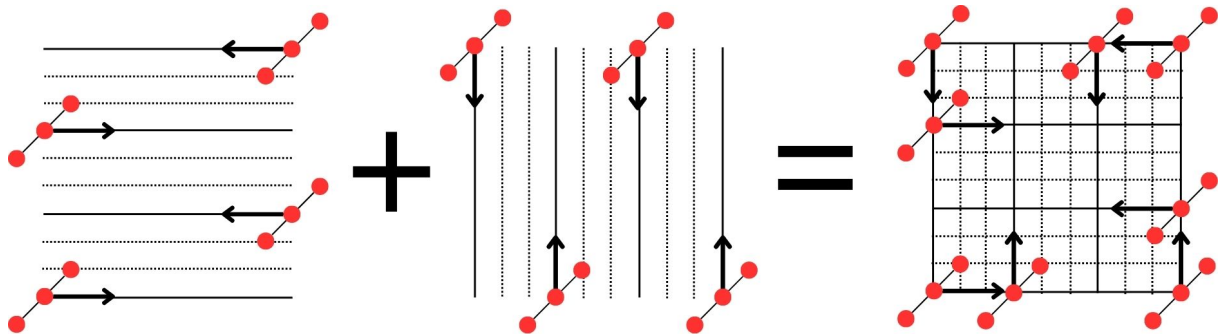
Fonte: Autoria própria 2025

Além disso, implementou-se um parâmetro de controle, que consiste em um único ponto, com a mesma potência de laser e configurações de energia linear.

3.2.2.2 Blocos lattice

Devido às limitações de posição dos pontos de laser, e visando manter a distância entre trilhas igual à 300 μm , apenas três pontos de laser foram usados. Além disso, para contornar a limitação de mudança de sequência, os pontos foram orientados a 45 graus em relação ao movimento do recobridor. Deste modo, a mesma configuração dos pontos de laser pode ser usada tanto horizontalmente quanto verticalmente. Para a criação da estrutura lattice, a configuração de varredura foi escaneada em duas direções perpendiculares entre si, na mesma camada, conforme a Figura 16.

Figura 16 – Configuração dos pontos de laser para o experimento



Fonte: Autoria própria (2025).

Para este experimento, foram usados valores de frequência entre 10 e 400 kHz, valores de energia linear por trilha entre 0,075 e 0,225 J/mm e valores de potência do laser entre 150 e 750 W. A velocidade deve ser ajustada em função da potência do laser, usando a Equação 11, a fim de manter os valores de energia linear por trilha constantes. Apresenta-se na Tabela 3 os parâmetros utilizados.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no experimento para a construção dos blocos lattice

Parâmetro	Valores
P	150, 225, 300, 375, 450, 600, 750 W
E_l	0,075; 0,150; 0,225 J/mm
f	10, 25, 75, 200, 400 kHz
N	3
θ	45°
d_t	300 μm

Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.2.3 Blocos densos

Para a construção dos blocos densos, manteve-se os mesmos parâmetros utilizados na construção dos blocos lattice, tanto os valores de potência, velocidade e energia linear, quanto ao posicionamento, configuração de escaneamento e quantidade de pontos de laser, com exceção da distância entre trilhas. Nos blocos densos, adotou-se distância de 100 μm entre as trilhas, promovendo suas sobreposições e eliminando os vazios característicos dos blocos lattice. Esse experimento foi conduzido utilizando as frequências de 200 e 400 kHz, assim como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados no experimento para a construção dos blocos densos

Parâmetro	Valores
P	150, 225, 300, 375, 450, 600, 750 W
E_l	0,075; 0,150; 0,225 J/mm
f	200, 400 kHz
N	3
θ	45°
d_t	100 μm

Fonte: Autoria própria (2025)

3.3 ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Para a análise das amostras, utilizou-se dois microscópios diferentes: o Keyence VHX 6000 e o Keyence VR-3000. O primeiro teve como objetivo capturar imagens de alta qualidade das amostras para a análise visual comparativa, enquanto o segundo, foi usado para fazer análises de rugosidade nas amostras.

Realizou-se a avaliação qualitativa da adesão de partículas e continuidade nas amostras por inspeção visual, utilizando-se de imagens-referência das amostras que representam melhor cada categoria (pouca, moderada e muita adesão) para adesão de partículas e (contínuo, não contínuo e apenas sinterizado) para continuidade, a fim de comparar as demais amostras com essas referências.

4 RESULTADOS
















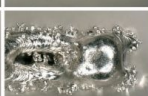
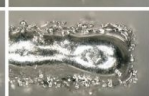

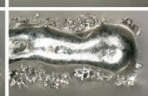
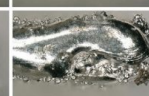
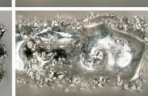








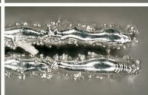

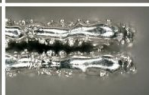
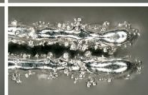
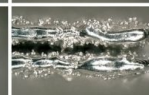
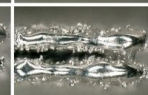
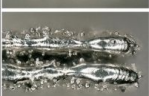

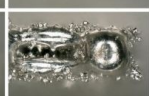
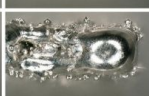
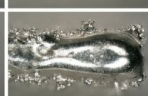










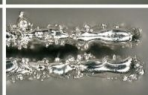

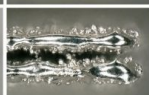
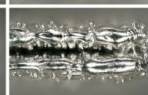
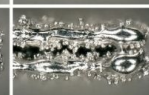

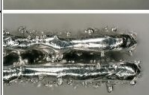


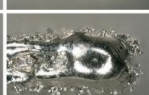
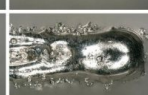























4.1 PAREDES FINAS

Após a bateria de experimentos, foi realizada a documentação fotográfica em alta resolução através do microscópio Keyence VHX 6000 das amostras para serem analisada posteriormente. A partir das fotos, construiu-se uma tabela demonstrando a visão superior das paredes.

Dividiu-se em duas tabelas, onde cada uma representa uma orientação de construção diferente. As paredes construídas na orientação vertical, são duplas, devido ao uso de dois pontos de laser orientados horizontalmente. As paredes construídas na orientação horizontal são simples, pois os pontos de laser percorrem o comprimento da parede um seguido do outro.

Portanto, nas Tabelas 5 e 6, apresentam-se as amostras das paredes construídas verticalmente e horizontalmente, respectivamente. É importante salientar que a E_l corresponde à densidade de energia depositada no comprimento da amostra, ou seja, esse valor representa a E_l total depositada nas duas paredes, então para as paredes duplas, cada parede recebeu metade da E_l .

Tabela 5 – Amostras das paredes finas fabricadas verticalmente e organizadas por parâmetros

		Potência [W]						
		100	140	180	210	240	275	300
		10 kHz						
Energia Linear [J/mm]	0.14							
	0.28							
	0.56							
		25 kHz						
Energia Linear [J/mm]	0.14							
	0.28							
	0.56							
		75 kHz						
Energia Linear [J/mm]	0.14							
	0.28							
	0.56							
		Um ponto (escaneado na vertical)						
Energia Linear [J/mm]	0.14							
	0.28							
	0.56							

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 6 – Amostras das paredes finas fabricadas horizontalmente e organizadas por parâmetros

		Potência [W]						
		100	140	180	210	240	275	300
		10 kHz						
Energia Linear [J/mm]	0.14							
	0.28							
	0.56							
	25 kHz							
	0.14							
	0.28							
	0.56							
	75 kHz							
	0.14							
0.28								
0.56								
Um ponto (escaneado na horizontal)								
0.14								
0.28								
0.56								

Fonte: Autoria própria (2025).

A fim de analisar a uniformidade da superfície superior das paredes, usou-se o microscópio Keyence VR-5000 para a análise de rugosidade, deste modo, foi possível comparar o efeito dos parâmetros em cada amostra. A Tabela 7 foi construída

com o intuito de facilitar a visualização da rugosidade média linear (Ra) para cada parâmetro das paredes duplas, já a Tabela 8 mostra as paredes simples, onde as cores verde representam rugosidade linear menor que 20 μm , ou seja, alta uniformidade da superfície, enquanto o vermelho representa baixa uniformidade da superfície com rugosidade linear maior que 40 μm .

Tabela 7 – Rugosidade média linear gerada por cada parâmetro e relacionada com a E_i das paredes duplas

Rugosidade média linear [μm]	Potência [W]						
	100	140	180	210	240	275	300
10 kHz							
0,14	33,09	38,35	29,24	31,13	39,69	36,13	34,54
0,28	28,91	26,65	31,63	23,75	25,49	33,82	34,03
0,56	14,13	61,99	32,01	22,67	30,58	27,90	30,77
25 kHz							
0,14	33,73	24,62	21,71	23,78	20,67	21,48	18,90
0,28	22,37	19,81	17,03	17,25	16,94	18,89	26,78
0,56	14,88	54,87	65,21	54,18	44,56	29,18	41,55
75 kHz							
0,14	39,59	31,71	27,63	18,88	18,71	15,26	14,24
0,28	19,78	19,96	14,76	16,67	15,54	16,11	13,91
0,56	14,95	23,62	56,64	57,26	47,82	34,38	38,72
Ponto Único							
0,14	37,05	25,20	23,06	17,20	20,45	19,82	16,91
0,28	15,80	46,53	44,32	32,00	24,39	24,64	34,28
0,56	45,40	62,07	122,66	150,38	216,36	214,86	179,63

■ Ra < 20 μm
■ 20 μm < Ra < 40 μm
■ Ra > 40 μm

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 8 – Rugosidade média linear gerada por cada parâmetro e relacionada com a E_l das paredes simples

Rugosidade média linear [μm]	Potência [W]						
	100	140	180	210	240	275	300
	10 kHz						
0,14	71,80	40,65	25,72	37,54	23,59	43,78	21,62
0,28	31,56	66,04	104,26	103,79	53,60	25,33	28,95
0,56	70,57	116,51	214,39	146,65	55,20	41,73	137,38
	25 kHz						
0,14	51,20	47,77	42,85	18,79	25,03	18,69	19,57
0,28	18,87	34,08	36,45	44,96	37,06	42,94	42,62
0,56	52,49	104,78	127,55	113,87	82,04	43,31	38,46
	75 kHz						
0,14	48,58	60,29	78,73	23,70	13,96	12,66	12,56
0,28	18,32	29,16	42,98	31,90	32,76	30,05	33,57
0,56	21,05	52,56	92,67	89,06	49,77	61,13	50,68
	Ponto Único						
0,14	30,94	28,16	17,15	18,86	20,87	16,35	22,37
0,28	19,98	40,52	59,24	46,13	26,68	18,56	23,11
0,56	35,47	75,36	146,25	154,60	205,07	217,14	192,97

■ $R_a < 20 \mu\text{m}$
 ■ $20 \mu\text{m} < R_a < 40 \mu\text{m}$
 ■ $R_a > 40 \mu\text{m}$

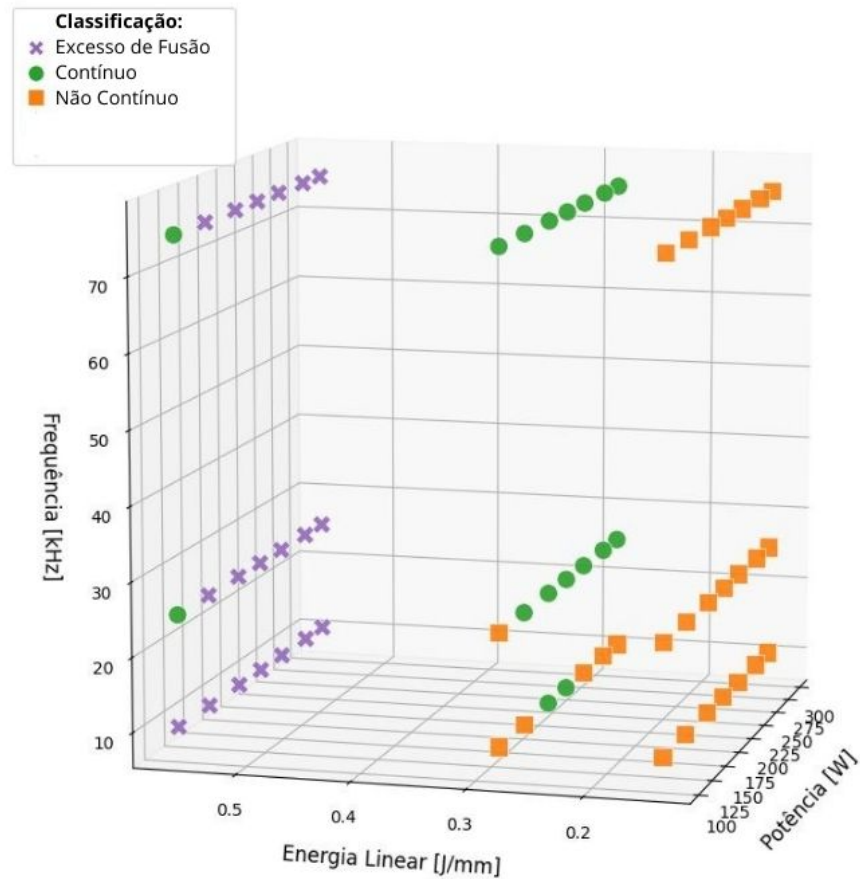
Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, observa-se que para os parâmetro de controle com apenas um ponto de laser, os valores de rugosidade média linear foram semelhantes entre as amostras construídas com orientação horizontal e vertical, o que sugere que a variação da orientação de construção, quando utilizados os mesmos parâmetros, não interfere significativamente no resultado final da amostra.

Analisando-se a continuidade das paredes, observa-se na Figura 17 que as parede duplas (construídas verticalmente), apresentaram desempenho ótimo para um energia linear de 0,28 J/mm, com ausência de descontinuidades. Entretanto, para 0,56

J/mm, ocorreu fusão excessiva do pó metálico resultando em união com as paredes adjacentes, afetando a integridade geométrica.

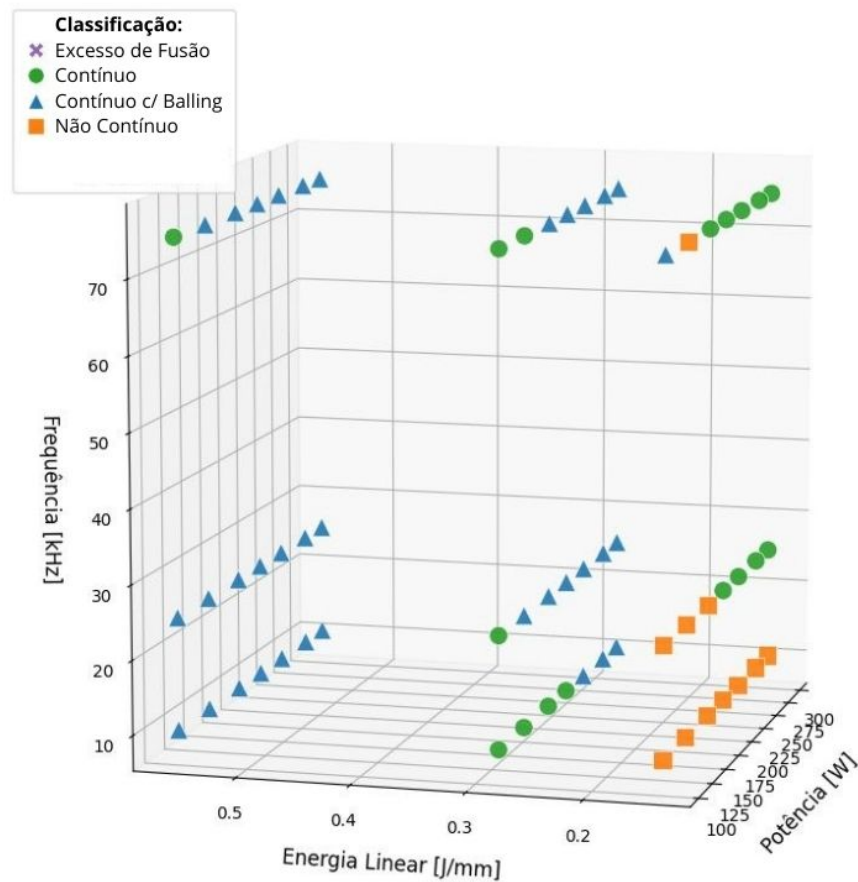
Figura 17 – Gráfico tridimensional para a categorização da continuidade das paredes duplas



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 18, observa-se que as paredes simples foram amplamente afetadas pelo fenômeno de balling, caracterizado pela formação de esferas ao longo do comprimento da trilha. Esse fenômeno ocorre devido instabilidades na fusão e na solidificação do material, decorrentes da combinação inadequada dos parâmetros do processo. Para valores de energia menores, verifica-se a melhora do fenômeno, resultando em amostras mais contínuas.

Figura 18 – Gráfico tridimensional para a categorização da continuidades das paredes simples



Fonte: Autoria própria (2025).

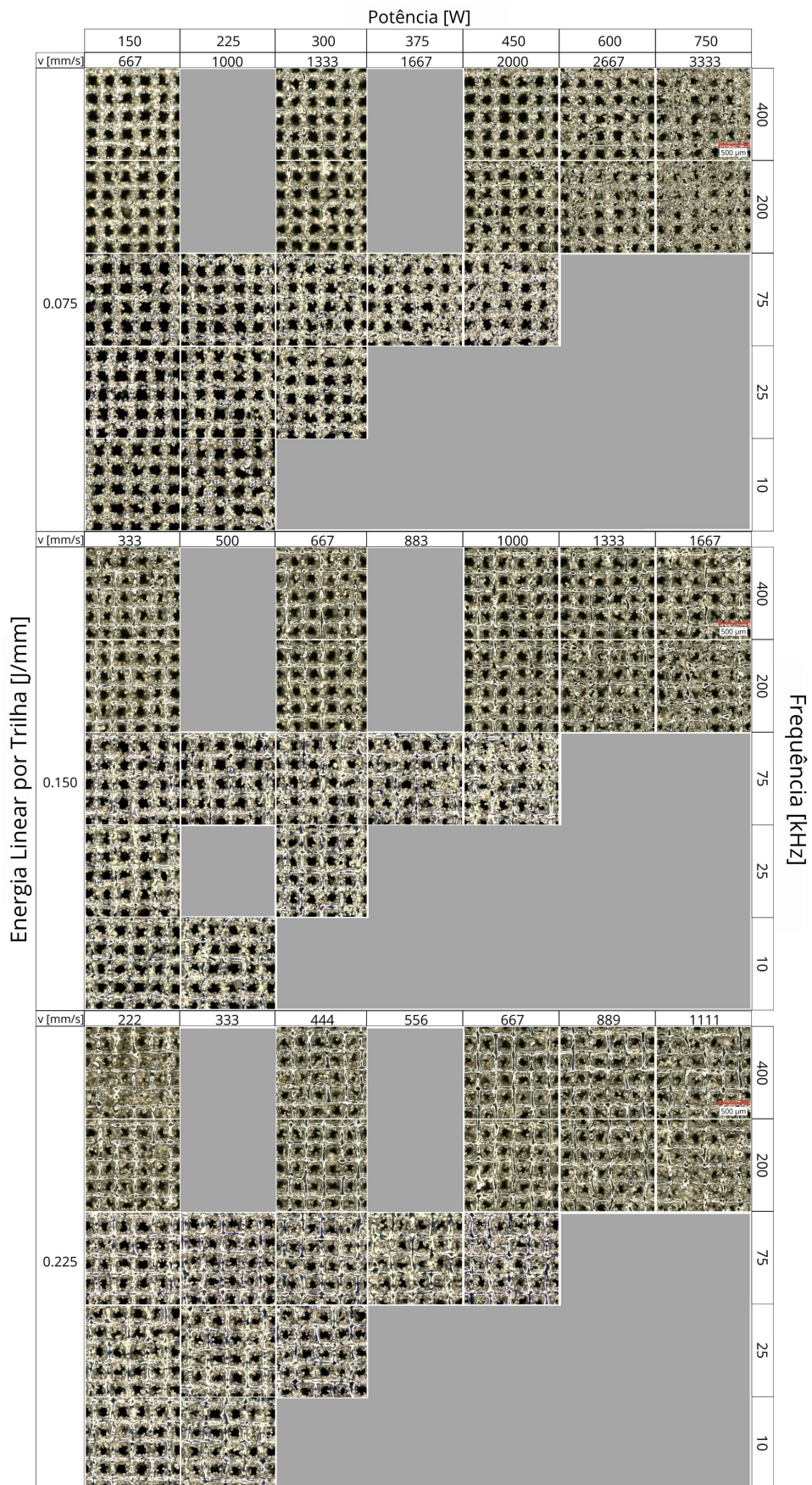
Além disso, todas as amostras fabricadas com apenas um ponto de laser apresentaram o balling. Percebe-se que, quando essas amostras são comparadas às paredes simples feitas com 75 kHz, há uma diminuição significativa na ocorrência do fenômeno de balling, o que indica que, para as energias lineares de 0,14 e 0,28 J/mm², o uso de dois pontos de laser apresenta desempenho superior em relação ao uso de um único ponto.

4.2 BLOCOS LATTICE

Durante a bateria de experimentos, observou-se a projeção de partículas fundidas, denominadas spatters (respingos de fusão), para conjuntos de parâmetros com baixa frequência (10 e 25 kHz) e alta potência (acima de 300 W). Esse fenômeno compromete o vidro de quartzo protetor da tampa, pois o acúmulo dessas partículas pode provocar superaquecimento e risco de fusão do quartzo quando o feixe de laser incide sobre elas, o que requereria sua substituição.

O mesmo princípio para a construção da tabela para as paredes finas foi usado para a construção da Tabela 9. No entanto, ao invés do uso da E_l , foi usado a energia linear por trilha, representando a E_l depositada em cada trilha. Além disso, o eixo da velocidade foi adicionado apenas para visualização, pois ela está diretamente relacionada com a potência pela Equação 11.

Tabela 9 – Tabela com amostras de blocos lattice organizadas por parâmetro

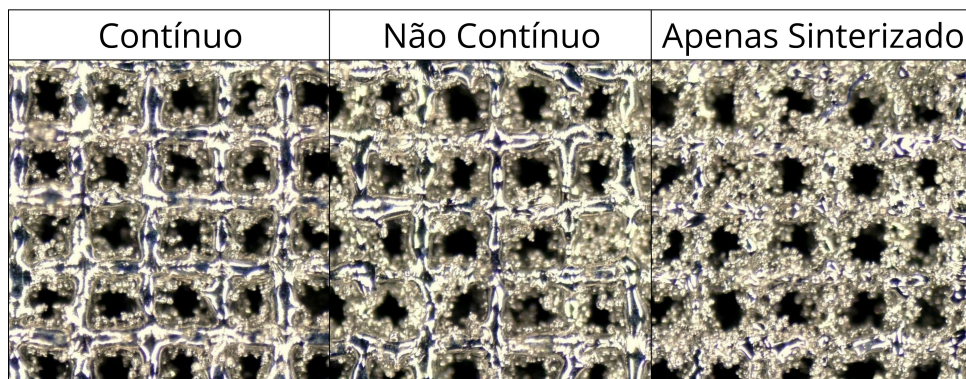


Fonte: Autoria própria (2025).

Nessa tabela, observam-se lacunas de dados para todas as frequências. Para 10 e 25 kHz, o experimento com as potências mais altas foi interrompido, devido a projeção de spatters, para não avariar o vidro de quartzo da máquina. Para 75 kHz, o teste foi feito apenas para potências abaixo ou igual a 450 W pelo risco de criação de spatters. Nas faixas de 200 e 400 kHz, optou-se por não construir amostras com 225 e 375 W com intenção de reduzir o número de amostras sem prejuízo da análise geral, uma vez que é possível estimar o comportamento dessas faixas a partir dos resultados obtidos com os outros valores de potência, pois apresentam tendência consistente de variação.

Para a análise de continuidade das trilhas, foi usado o microscópio digital VHX 6000 e as amostras foram categorizadas em 4 diferentes categorias: contínua, não contínua, apenas sinterizado e não construído. A Figura 19 apresenta imagens de referências de cada uma das categorias, com o objetivo de servir como base comparativa na classificação visual das demais amostras.

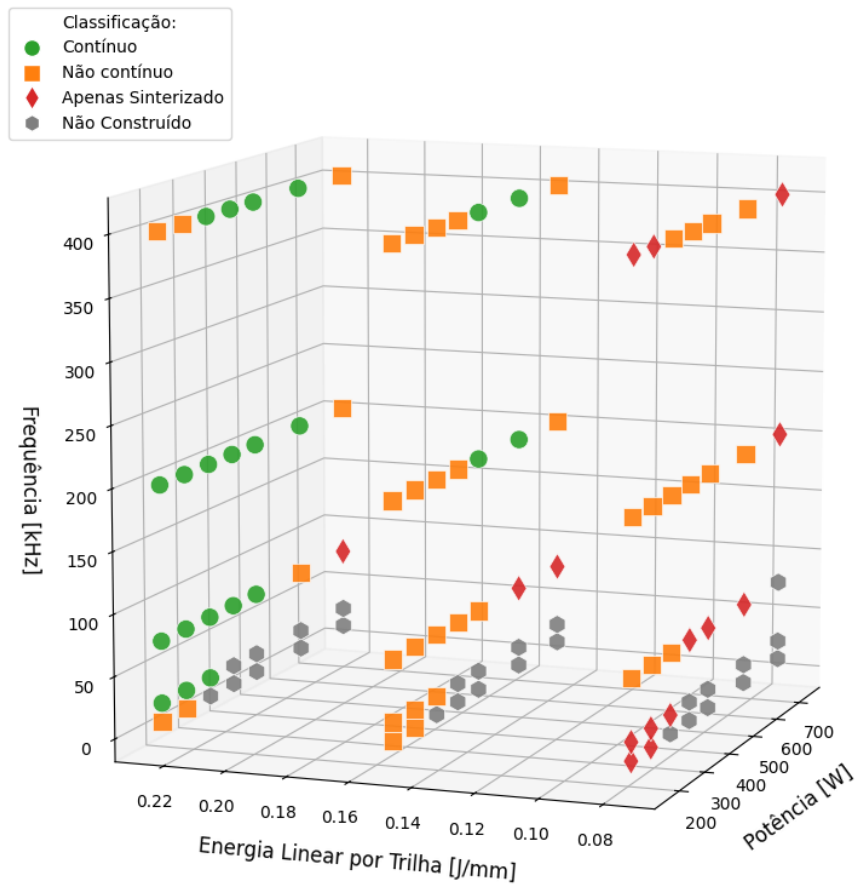
Figura 19 – Imagens de referência como base comparativa para o critério de continuidade



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir da categorização das amostras, foi elaborado a Figura 20, um gráfico tridimensional com eixos de potencia, energia linear por trilha e frequência, permitindo a análise da distribuição das categorias ao longo dos parâmetros de processo.

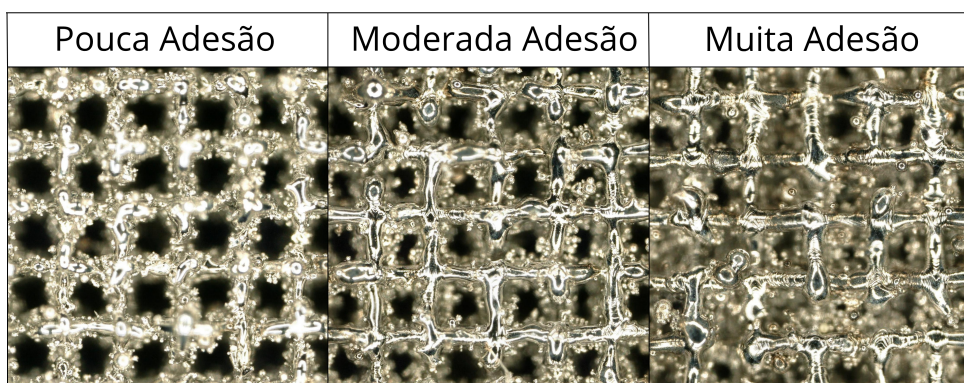
Figura 20 – Gráfico tridimensional para a categorização da continuidade das amostras



Fonte: Autoria própria (2025).

Do mesmo modo, ao analisar a adesão de partículas na estrutura construída, três amostras foram usadas de referência e divididas entre as categorias de baixa, moderada e alta adesão. A Figura 21 apresenta as imagens-referência utilizadas como base comparativa para a categorização das demais amostras.

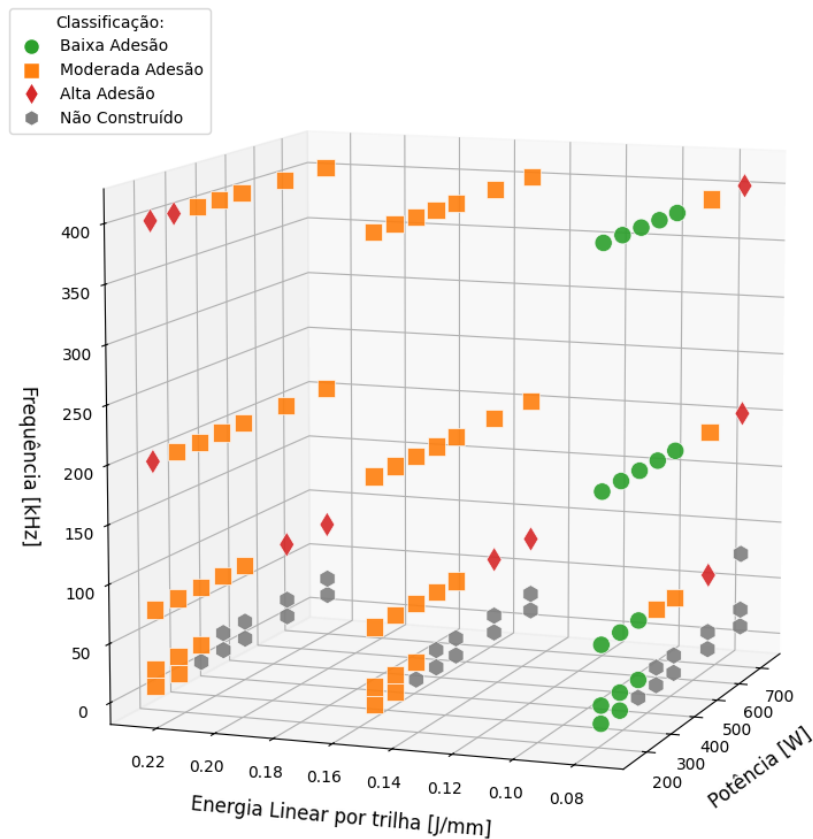
Figura 21 – Imagens de referência como base comparativa para o critério de adesão



Fonte: Autoria própria (2025).

Em seguida, foi elaborado o gráfico tridimensional mostrado na Figura 22, semelhante ao utilizado no critério de continuidade, com o objetivo de permitir comparações.

Figura 22 – Gráfico tridimensional para a categorização da adesão de partículas nas amostras



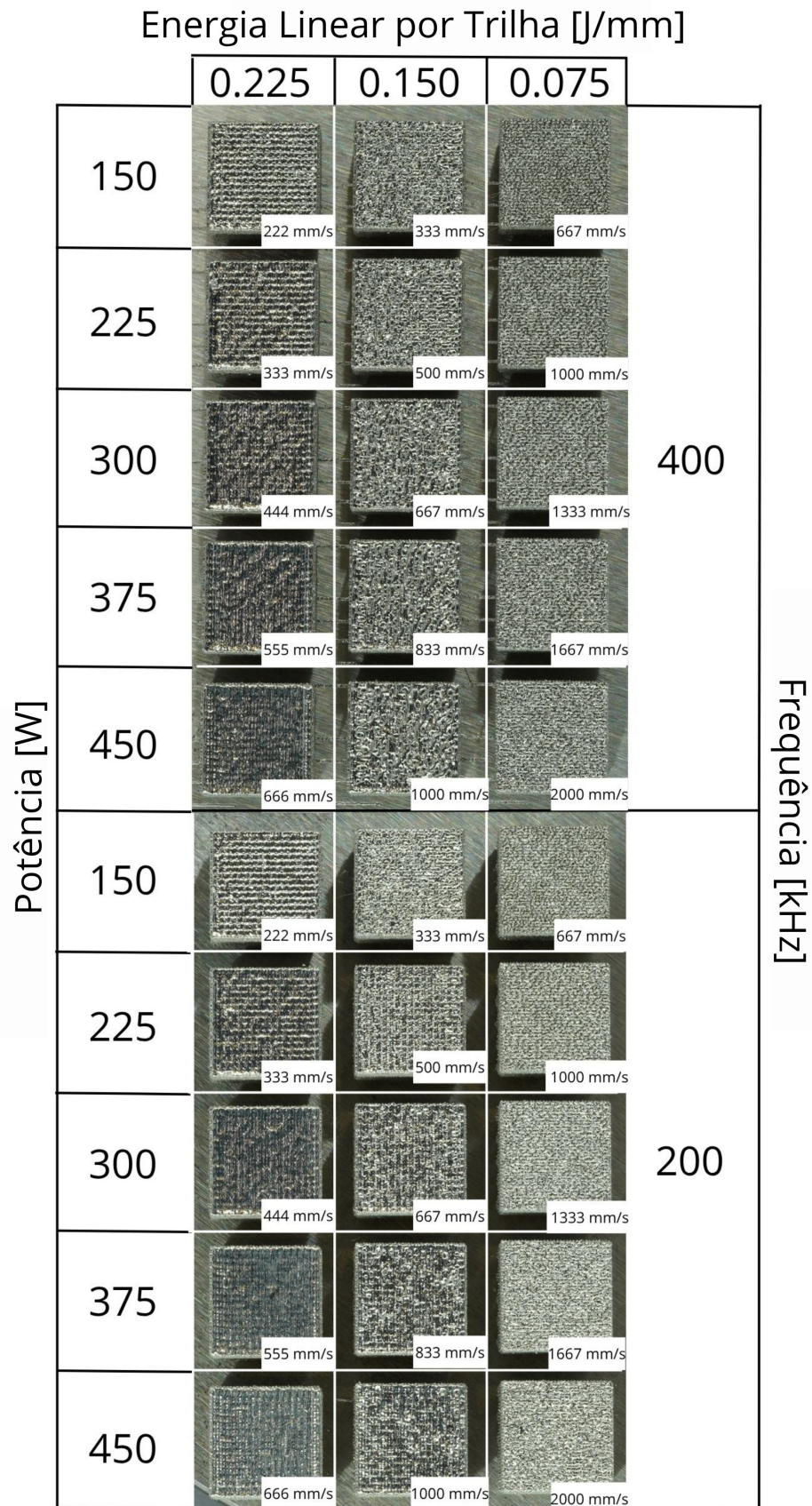
Fonte: Autoria própria (2025).

Nota-se que altos valores de energia linear por trilhas, geram amostras mais contínuas, no entanto, a adesão de partículas aumenta. O oposto também se aplica, baixos valores de energia linear por trilhas geram amostras não contínuas porém com baixa adesão de partículas. Ou seja, verifica-se que a otimização de um critério ocorre às expensas do outro.

4.3 BLOCOS DENSOS

A fim de analisar os blocos densos, construiu-se a Figura 23 com os parâmetros utilizados e as fotografias das faces superiores das amostras, com o objetivo de facilitar a visualização de como os blocos densos se comportam com a mudança de parâmetros.

Figura 23 – Amostras de blocos densos organizadas por parâmetros



Fonte: Autoria própria (2025).

Com auxílio do microscópio Keyence VR-5000, foi analisada a rugosidade superficial das amostras. A Figura 24 segue o mesmo formato da tabela anterior, apresentando os valores para cada parâmetro.

Figura 24 – Rugosidade superficial gerada por cada parâmetro

		Potência [W]						
		150	225	300	375	450		
Energia Linear por Trilha [J/mm]	v [mm/s]	667	1000	1333	1667	2000		
	0,075		60,73	68,27	70,29	68,51	66,12	400
			61,59	62,27	60,79	57,86	58,27	200
	v [mm/s]	333	500	667	883	1000		
	0,150		69,97	69,15	65,95	90,40	103,81	400
			58,73	35,68	30,73	29,39	30,32	200
	v [mm/s]	222	333	444	556	667		
	0,225		38,39	20,40	15,42	20,00	18,37	400
			25,90	15,36	31,78	15,51	22,89	200

Frequência [kHz]

■ Ra < 20 μm
 ■ 20 μm < Ra < 40 μm
 ■ Ra > 40 μm

Fonte: Autoria própria (2025).

Ao observar a figura, nota-se que amostras fabricadas com valores mais altos de energia linear por trilha tendem a apresentar menor rugosidade superficial. Ainda, as amostras produzidas com baixa energia linear por trilha e baixa potência apresentaram falta de fusão, resultando em uma superfície excessivamente rugosa.

Além disso, por se tratar de um cubo denso, a densidade das amostras foi avaliada por meio de um algoritmo que divide a área da seção transversal que não apresenta poros pela área total da peça, de acordo com a Equação 12.

$$\rho = \frac{A_{densa}}{A_{total}} \cdot 100 \quad (12)$$

O objetivo é investigar como os parâmetros tem influência sobre esse resultado e se a rugosidade linear e continuidade das paredes finas e dos blocos lattice tem relação com a densidade em um bloco denso. Para a densidade, a Figura 25 foi feita no mesmo modelo das figuras anteriores, a fim de facilitar a compreensão.

Figura 25 – Densidade gerada por cada parâmetro

		Potência [W]						
		150	225	300	375	450		
Energia Linear por Trilha [J/mm]	v [mm/s]	667	1000	1333	1667	2000		
	0,075		68,41	71,90	77,24	73,45	69,91	400
			69,52	76,87	75,75	74,08	74,43	200
	v [mm/s]	333	500	667	883	1000		
	0,150		90,40	92,54	97,82	96,39	92,43	400
			92,26	91,65	98,34	97,87	97,91	200
	v [mm/s]	222	333	444	556	667		
	0,225		97,39	99,69	99,99	99,89	99,99	400
			98,12	99,98	99,97	99,99	99,99	200

Frequência [kHz]

■ $\rho > 99,95\%$
 ■ $99,5\% < \rho < 99,95\%$
 ■ $\rho < 99,5\%$

Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se que, assim como ocorre com a rugosidade, a densidade melhora conforme a energia linear por trilha aumenta. Para valores mais baixos dessa energia, as densidades obtidas são drasticamente reduzidas, situando-se muito abaixo do requisito mínimo para demonstrar a processabilidade adequada de um material em uma máquina LPBF.

As baixas densidades observadas quando a energia linear por trilha é 0,075 J/mm, de acordo com Herzog *et al.* (2016) decorrem da insuficiente entrada de energia, a qual resulta em falta de fusão do material, o que contribui para a formação de vazios irregulares que comprometem a densidade da peça. A Figura 26 apresenta uma comparação entre as seções transversais das amostras com a menor e maior densidade obtidas nos experimentos.

Figura 26 – Seções transversais das amostras com a menor (68,410%) e maior densidade (99,993%), apresentadas, respectivamente, na parte superior e na parte inferior.



Fonte: Autoria própria (2025).

A fim de avaliar a produtividade do RBDS, comparou-se as amostras produzidas com as amostras obtidas por Wong *et al.* (2019) em 2 sistemas distintos. Em um sistema multi-lasers de quatro lasers, obteve-se densidade próxima a 99,99% e taxa de construção de 14 cm³/h, enquanto no sistema LBPF convencional de um laser, alcançou-se densidade similar com taxa de construção de 5 cm³/h (Wong *et al.*, 2019).

No RBDS foram produzidas seis amostras com densidades próximas a 99,99% e taxas de construção superior a 5 cm³/h. Dessas, destacam-se os ensaios realizados com 450 W e 666 mm/s (tanto com 200 kHz quanto 400 kHz) e com 375 W e 555 mm/s (200 kHz), os quais alcançaram uma taxa de construção acima de 14 cm³/h.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho objetivou-se demonstrar as vantagens e as limitações do uso do RBDS na construção de paredes finas, blocos lattice e blocos densos por LPBF. Buscou-se identificar os parâmetros de processamento que determinam a faixa operacional adequada do RBDS para cada geometria, além de evidenciar quais condições geram amostras com superfície morfologicamente uniforme, elevada precisão dimensional e alta densidade. Por fim, validou-se a viabilidade do RBDS na manufatura aditiva.

A metodologia adotada partiu das práticas convencionais de pesquisa em sistemas LPBF, fabricou-se as amostras por meio de diversos parâmetros, analisou-se as amostras obtidas, comparou-se os resultados e selecionou-se os conjuntos que melhor atendiam aos critérios definidos. Essa abordagem foi adaptada ao RBDS para alcançar os objetivos propostos.

No caso das paredes finas, com 25 kHz foram obtidas algumas amostras aceitáveis usando 0,14 J/mm de energia linear por trilha, contudo, os parâmetros de melhor desempenho foram identificados em 75 kHz. Nessa frequência, a energia linear por trilha ideal foi 0,14 J/mm. Observou-se que valores de energia linear por trilha superiores a este provocaram efeitos indesejáveis, balling nas paredes simples e excesso de fusão nas paredes duplas.

Para os blocos lattice, a combinação de 0,225 J/mm de energia linear por trilha, 200 kHz e uma faixa de velocidade de escaneamento entre 1333 mm/s e 2667 mm/s, mostrou-se a mais apta a atender os critérios estabelecidos. No entanto, nessa condição foi observada adesão moderada de partículas, passível de remoção por técnicas de limpeza adequadas, por exemplo, a usinagem de fluxo abrasivo, no qual um fluido com partículas abrasivas é forçado através da estrutura.

Nos blocos sólidos, a energia linear de 0,225 J/mm e 200 kHz, com velocidades de varredura entre 1000 e 2000 mm/s, gerou amostras com superfície morfologicamente uniforme e baixa rugosidade, além de elevada densidade (entre 99,97% e 99,99%). Embora 400 kHz tenha produzido algumas amostras com densidade alta (até 99,99%), essa frequência mostrou maior instabilidade nos resultados, apresentando amostras com 99,69% de densidade dentro do mesmo intervalo de velocidade de varredura.

Quanto à escolha da frequência, concluiu-se que, independentemente da geometria, a faixa entre 75 e 200 kHz é a mais indicada. Frequências mais baixas tendem a causar problemas de continuidade e maior propensão à formação de spatters em energias elevadas, já frequências mais altas mostraram instabilidades na continuidade, rugosidade e densidade das peças.

Portanto, os resultados obtidos, validam a viabilidade do RBDS dentro das faixas de operação indicadas neste trabalho. Blocos densos com energia linear de 0,225 J/mm e 200 kHz com velocidades entre 1000 e 2000 mm/s apresentaram superfície morfológicamente uniforme e densidade elevada de 99,97% a 99,99%. Paredes finas que satisfazem os critérios foram produzidas usando 0,14 J/mm de energia linear por trilha e 75 kHz, enquanto blocos lattice apresentaram desempenho satisfatório com 0,225 J/mm a 200 kHz, embora com moderada adesão de partículas. Assim, define-se que o RBDS é viável para LPBF, quando operado dentro das condições dos parâmetros recomendados para Inconel 625.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Apesar do objetivo ter sido concluído, ainda permanecem questões em aberto que podem ser exploradas em trabalhos futuros. Recomenda-se investigar o comportamento dos blocos lattice durante os processos de remoção das partículas aderidas, bem como avaliar métodos de limpeza que causem o menor impacto possível à geometria e à integridade da peça.

Sugere-se também fazer uma análise que permita verificar em como o aumento de potência e velocidade, mantendo a mesma energia linear, afeta o consumo energético da máquina, a fim de avaliar a relação entre consumo energético e produtividade.

Além disso, recomenda-se desenvolver pesquisas sobre o uso do RBDS com mais pontos de laser, a fim de avaliar o ganho de produtividade e determinar limites práticos para o escalonamento do processo, visto que o RBDS não impõe um limite teórico ao número de pontos.

Por fim, propõe-se investigar a fusão e a solidificação de poças de fusão espacialmente separadas, com o objetivo de construir peças com melhor acabamento superficial e controle microestrutural.

Sendo assim, o RBDS se mostra como alternativa viável aos sistemas convencionais de LPBF e, com o avanço das pesquisas futuras, contribuirá para ganhos significativos em produtividade e qualidade no processo de fusão a laser em leito de pó.

REFERÊNCIAS

- AHMED, N. *et al.* Process parameter selection and optimization of laser powder bed fusion for 316l stainless steel: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 75, p. 13–14, 2022.
- ATTARAN, M. 3d printing: enabling a new era of opportunities and challenges for manufacturing. *International Journal of Research in Engineering and Science*, v. 4, n. 10, p. 30–38, 2016.
- ATTARAN, M. The rise of 3-d printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, v. 60, n. 5, p. 17–18, 2017.
- BASKIN, N.; YUCE, C. Effect of process parameters on the mechanical behavior of ti6al4v alloys fabricated by laser powder bed fusion method. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 30, p. 16–19, 2024.
- BELFORTE, D. Manufacturing industry expects 75% growth in additive. *Laser Focus World*, 2021. Disponível em: <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14221905/manufacturing-industry-expects-75-growth-in-additive>. Acesso em: 25 mar. 2025.
- BITTNER, F. *et al.* Efficient lpb-f-process development by design of experiments. *In: Proceedings of the FRAUNHOFER DIRECT DIGITAL MANUFACTURING CONFERENCE 2025*. p. 1–2, 2025. Disponível em: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/5db78b1a-ed75-4d57-aa78-b5712aae8a45/content>. Acesso em: 22 mar. 2025.
- BULGAREVICH, D. S. *et al.* Crystal plasticity simulations with representative volume element of as-build laser powder bed fusion materials. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 03–04, 2023.
- CAO, L. *et al.* Optimization of surface roughness and dimensional accuracy in lpb-f additive manufacturing. *Optics & Laser Technology*, v. 142, p. 10–11, 2021.
- CAPRIO, L. *et al.* Comparative study between cw and pw emissions in selective laser melting. *Journal of Laser Applications*, v. 30, n. 3, p. 03–04, 2018.
- DEMIR, A. G. *et al.* From pulsed to continuous wave emission in slm with contemporary fiber laser sources: effect of temporal and spatial pulse overlap in part quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 91, p. 05–06, 2017.
- DUBEY, D. *et al.* A review on recent advancements in additive manufacturing techniques. *In: Proceedings of the INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS, PART E: JOURNAL OF PROCESS MECHANICAL ENGINEERING*. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/383576218_A_review_on_recent_advancements_in_additive_manufacturing_techniques. Acesso em: 22 mar. 2025.
- EISELSTEIN, H.; TILLACK, D. The invention and definition of alloy 625. *Superalloys*, v. 718, n. 625, p. 1–14, 1991.

FLOREEN, S. *et al.* The metallurgy of alloy 625. *Superalloys*, v. 718, n. 625, p. 13–37, 1994.

GLAUBITZ, E. B. *et al.* Contour parameters, melt pool behavior, and surface roughness relationships across laser powder bed fusion platforms and metallic alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1–19, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-025-15066-0>. Acesso em: 28 mar. 2025.

HERZOG, D. *et al.* Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, v. 117, p. 371–392, 2016.

MERGULHÃO, M. M.; NEVES, M. D. M. Análise da potência do laser e velocidade de varredura da fusão seletiva a laser na consolidação de estruturas colunares por varreduras únicas na liga de co-cr-mo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUFATURA ADITIVA. On line. *Anais [...]*. 2020. Disponível em: <https://eventos.congresso.me/cbmadi/resumos/7517.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2025.

NGO, T. D. *et al.* Additive manufacturing (3d printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, v. 143, p. 17–19, 2018.

PASCHOTTA, R. Continuous-wave operation. *RP Photonics Encyclopedia*, 2005. Disponível em: https://www.rp-photonics.com/continuous_wave_operation.html. Acesso em: 29 mar. 2025.

PFALZ, T. *et al.* Comparison of different multi-laser powder bed fusion exposure strategies and their influence on the part quality of in718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 128, n. 9, p. 14–15, 2023.

PRAVEENA, B. *et al.* Experimental investigation on density and volume fraction of void, and mechanical characteristics of areca nut leaf sheath fiber-reinforced polymer composites. *International Journal of Polymer Science*, v. 2022, n. 1, p. 05–07, 2022.

RAJAN, K. *et al.* Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 120, n. 3, p. 15–17, 2022.

SPECIALMETALS. *Inconel Alloy 625*. 2013. 18 pages PDF. Disponível em: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2025.

TIAN, Z. *et al.* A review on laser powder bed fusion of inconel 625 nickel-based alloy. *Applied Sciences*, v. 10, n. 1, p. 8–9, 2019.

VIALE, V. *et al.* Optimisation of downskin parameters to produce metallic parts via laser powder bed fusion process: an overview. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 123, 11 2022.

WOHLERS, T. *et al.* History of additive manufacturing. *Wohlers Associates, Inc.*, p. 1–21, 2023. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4474824. Acesso em: 20 mar. 2025.

WONG, H. *et al.* Multi-laser powder bed fusion benchmarking—initial trials with inconel 625. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 105, n. 7, p. 2891–2906, 2019.

YADROITSEV, I. *et al.* *Fundamentals of laser powder bed fusion of metals*. Amsterdam: Elsevier, 2021.

YAVARI, R. *et al.* Part-scale thermal simulation of laser powder bed fusion using graph theory: Effect of thermal history on porosity, microstructure evolution, and recoater crash. *Materials & Design*, v. 204, p. 10–12, 2021.

ZHANG, Z. *et al.* 3-dimensional heat transfer modeling for laser powder-bed fusion additive manufacturing with volumetric heat sources based on varied thermal conductivity and absorptivity. *Optics & Laser Technology*, v. 109, p. 12–13, 2019.