Insper

Engenharia Mecatrônica

Ana Beatriz Bertolucci Henriques

Título: Caracterização de materiais para otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada (DED)

São Paulo

2021

Ana Beatriz Bertolucci Henriques

Título: Caracterização de materiais para otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada (DED)

Relatório do programa de iniciação tecnológica apresentado ao programa de Graduação em Engenharia Mecatrônica na área de manufatura aditiva de metais.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Galdino dos Santos
Coorientador(a): Profa. Dra. Joice Miagava

São Paulo

2021

Henriques, Ana Beatriz Bertolucci

Título: Caracterização de materiais para otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada (DED)

Ana Beatriz Bertolucci Henriques – São Paulo, 2020.

39 f.

Relatório de Iniciação Tecnológica – Insper, 2020

Orientador: Prof. Dr. Raphael Galdino dos Santos

Coorientador(a): Profa. Dra. Joice Miagava

1. 316L. 2. Manufatura Aditiva. 3. Deposição por energia direcionada. 4. DED

Resumo

A manufatura aditiva, principalmente de metais e polímeros, possui o potencial de ampliar as alternativas da indústria no que diz respeito a dinamização e facilitação da fabricação de peças. Tal fato se deve as características deste processo, as quais conferem a possibilidade de confecção de peças com geometrias complexas, além do conserto de dispositivos danificados. Frente ao exposto, é proposto o presente estudo que objetiva relacionar as variações paramétricas com a qualidade da peça obtida, consequentemente sendo possível determinar ou avaliar estratégias para mensurar a qualidade de peças fabricadas em aço inox 316L e aço ferramenta H13 na manufatura aditiva por energia direcionada (DED). Neste ínterim, peças foram fabricadas com variação sistemática dos parâmetros em várias rodadas de testes e posteriormente analisadas no que diz respeito a sua microestrutura e dimensões finais da amostra. No geral, as amostras demonstraram comportamentos semelhantes, sobretudo no que diz respeito a variação da potência e sua influência no aparecimento e diminuição de respectivamente, poros por prendimento de gás e poros por falta de fusão. Neste contexto a velocidade de avanço também demonstrou influência notória nas dimensões da peça, com destaque para a altura. A vazão, por sua vez, foi considerada um parâmetro significativo no processo, bem como qualquer outro parâmetro capaz de alterá-la indireta ou indiretamente, como é o caso da velocidade de avanço. Estas rodadas de teste permitiram iniciar a construção de matrizes de qualidade que auxiliaram na determinação de amostras futuras e permitirão no futuro traçar estratégias otimizar a produção de peças com boa qualidade.

Palavras-chave: 316L. Manufatura Aditiva. Deposição por energia direcionada. DED.

Abstract

The additive manufacturing, mainly the metals and polymer ones, has the potential to increase the alternatives of the industry in the regards of simplifying and dynamizing the pieces making process. This is possible due to the manufacturing characteristics that allow the user to create complex geometric pieces and repair damaged devices. In view of this, this essay has the objective correlate the parametric variations with the quality of the obtained pieces, consequently being able to determine or evaluate strategies to measure the quality of pieces made of stainless steel 316L and tool steel H13 manufactured by directed energy deposition (DED). In this interim, pieces were made with systematic variations of parameters and sample's final microstructure and dimensions was analyzed. In general, the samples showed similar behavior, especially in potency variation and it's influence in the appearing of respectively, pores by gas attachment and pores by lack of fusion. In that context, the feed rate also demonstrated notorious influence in the piece dimensions, mainly in it's height. The flow rate, was also considered a significant parameters in the process, as well as any other parameter able to modify it direct or indirectly, as in the case of feed rate. This test rounds allowed us to start the building of quality matrices that will help in the determination of future samples and create strategies to optimize the production of well quality pieces

Keywords: 316L. Additive Manufacturing. Direct energy deposition. DED.

Sumário

Ana Beatriz Bertolucci Henriques 2

1 INTRODUÇÃO 1

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

3 JUSTIFICATIVA 6

4 OBJETIVO 7

5 PROCEDIMENTOS 8

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE AMOSTRAS 8

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS DE ANÁLISE DAS AMOSTRAS 12

5.3 METALOGRAFIA 13

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 13

6.1 ESTEREOSCOPIA 13

6.1.1 AÇO FERRAMENTA H13 13

6.1.2 AÇO INOX 316L 21

6.2 METALOGRAFIA 31

6.2.2 AÇO FERRAMENTA H13 31

6.2.2 AÇO INOX 316L 32

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 36

8 REFERÊNCIAS 37

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva se trata de um processo de fabricação que possibilita a confecção de peças com geometrias complexas [1]. Este processo também é capaz de realizar a recuperação, reciclagem ou reutilização de dispositivos de alto valor agregado que sofreram desgastes, por exemplo, em função da temperatura ou tensão mecânica, além de mudanças na geometria nativa [2]. Outra vantagem encontra-se na economia de matéria-prima, uma vez que somente a quantidade necessária é adicionada, quando comparado a processos tradicionais de remoção de material, como a usinagem, bem como o menor desgaste de ferramentas [3].

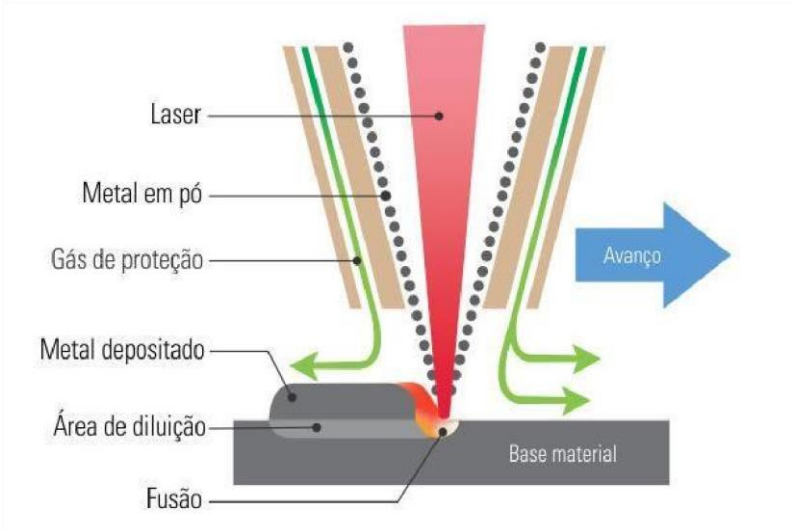
Atualmente, existe uma variedade de técnicas para a manufatura aditiva. Por exemplo, o método chamado fusão em leito de pó consiste em uma mesa com o material em pó, este é fundido no contorno desejado, camada por camada, formando a peça idealizada [3]. Outro exemplo é chamado de deposição por pulverização a frio, neste caso, o pó é impulsionado contra o substrato e a alta velocidade e o impacto devem ser suficientes para causar a adesão [3], sem necessidade, portanto, de aquecimento.

Frente ao exposto, dentre os processos de manufatura aditiva disponíveis, destaca-se, no presente estudo, a deposição por energia direcionada (DED). Ela consiste na deposição do material na forma de pó que é fundido com auxílio de um laser de alta potência (Figura 1). Além disso, existe uma atmosfera de proteção para impedir o contato do material com o oxigênio, impedindo uma possível degradação por oxidação. Tal proteção é realizada com auxílio de um gás protetor, semelhante a um processo de solda TIG (Tungsten Inert Gas), no qual existe uma atmosfera local controlada.

A configuração da manufatura aditiva por DED permite a montagem e fixação no interior de uma máquina-ferramenta CNC convencional, configurando-se uma manufatura híbrida com adição e subtração na mesma máquina. Isto aumenta ainda mais a flexibilidade deste equipamento, uma vez que dois processos de fabricação diferentes e por muitas vezes complementares passam a fazer parte do mesmo ambiente. Ademais, o processo também permite a utilização de uma ampla gama de materiais como matéria prima [4,5,6,7]. Vale notar que a deposição por DED pode ser

realizada com o pó ou fios do metal, neste estudo, serão analisadas peças fabricadas por uma máquina que utiliza o pó como material de deposição.

Figura 1 - Representação do cabeçote do processo DED em que o pó é depositado e fundido por um laser.



Fonte: [8]

Em relação a participação de cada parâmetro no processo, a potência do laser e a velocidade de avanço, por exemplo, estão correlacionadas à quantidade de energia incidida em uma região da peça. Além disso, a velocidade de avanço delimita a quantidade de pó a ser depositada na poça de fusão. Por sua vez, a granulometria do pó utilizado na deposição afeta a quantidade de calor necessária para fundir o material [9] bem como a susceptibilidade à oxidação.

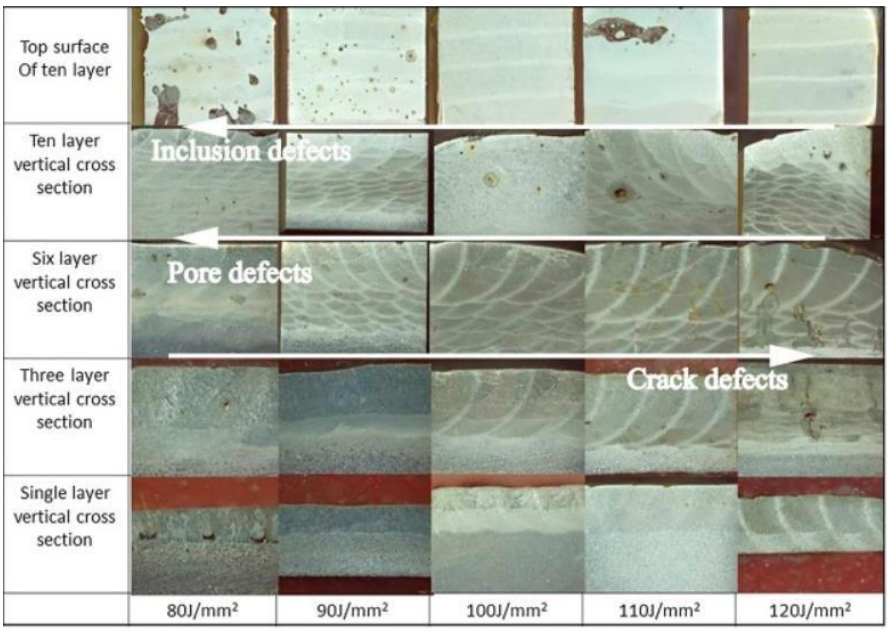
Assim, um processo de DED não planejado pode levar a diferenciações indesejadas na microestrutura da peça, tais como formação de óxidos e formação de fases metaestáveis. É necessário considerar que as altas temperaturas podem causar problemas pertinentes no objeto e, consequentemente, é possível que o material depositado perca as propriedades de interesse, tornando o processo insatisfatório. Inclusive, é comum a aplicação posterior de tratamentos térmicos na peça fabricada [10,11] para garantir que o material depositado e o substrato apresentem as características desejadas. Operações de usinagem como, por exemplo, o faceamento e fresamento de topo também podem ser posteriormente aplicados para garantir a qualidade da superfície da peça.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diferentes análises foram realizadas sobre o processo de deposição por energia direcionada, estudada no presente relatório. Dentre elas, um volume significativo de artigos realizou análises experimentais relacionadas a microestrutura e a propriedades físicas da peça fabricada.

No que diz respeito à microestrutura, tem-se uma configuração complexa e influenciada por um processo de fusão rápida, fluxo dinâmico do material fundido e resfriamento acelerado [12]. Deste modo, é frequente observar imperfeições provenientes dessa dinâmica complexa de deposição da peça. Dentre estes defeitos destacam-se a presença de trincas, de inclusões e de poros (Figura 2).

Figura 2 - Fotografia de amostras fabricadas com diferentes energias.

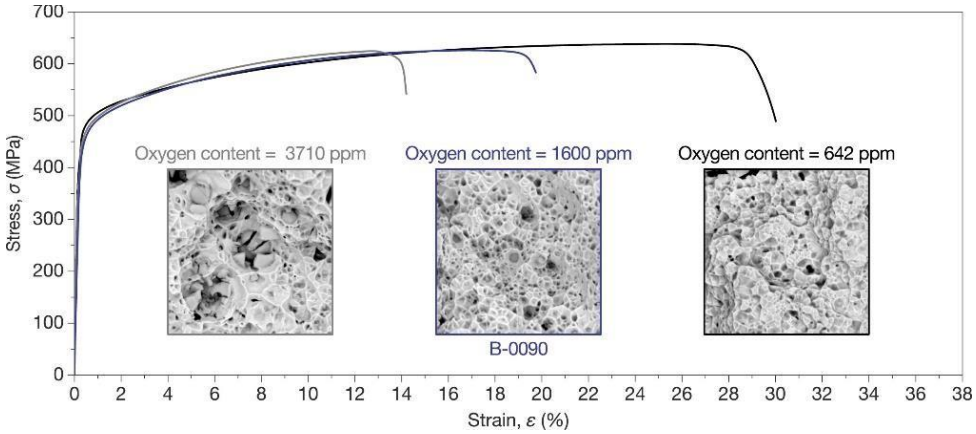


Fonte: [10]

Os principais tipos de poros identificados são aqueles ocorridos em função da falta de energia para fundir adequadamente o material, e por bolhas de gás que não foram eliminadas durante o processo de deposição [10,12,13]. Estratégias para evitar tais defeitos indesejados, estão relacionadas ao ajuste do espaçamento entre cordões ou camadas, ao aumento da densidade de energia [6,12,13], ao ajuste do foco do laser [12] e alterações na intensidade do fluxo de pó [6]. Também foram observados defeitos nas peças relacionados a presença de inclusões e trincas.

A oxidação do material depositado também é considerada um dos fenômenos indesejados e comumente observados nas peças depositadas com diferentes materiais. Estudos realizados com o aço 316L afirmam que a formação destes óxidos, influenciam negativamente no desempenho mecânico das amostras fabricadas (Figura 3). Presenças desses óxidos, ricos principalmente em Si ou Si / Mn, impactam negativamente no desempenho mecânico das amostras 316L [13].

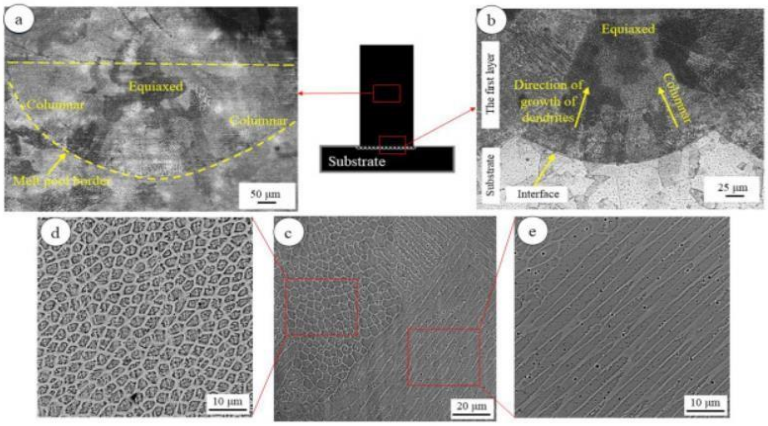
Figura 3 - Curvas de tensão-deformação de três amostras diferentes de 316L com vários teores de oxigênio.



Fonte: [13]

Demais citações pertinentes sobre a microestrutura são baseadas no crescimento dos grãos, em função da temperatura, em diferentes partes da peça. Segundo um estudo realizado em amostras de aço 316L, o gradiente de temperatura, caracteristicamente alto do processo em questão, resulta em uma alta taxa de solidificação, a qual, por consequência, oferece um tempo significativamente pequeno para o desenvolvimento completo dos dendritos [12]. Outras análises, para o mesmo material, afirmam a existência de formação de dendritas colunares nas bordas das peças, os quais seguem na direção do centro da amostra (Figura 4). Porém, nas áreas centrais, são mais prováveis dendritas equiaxiais, em função das menores taxas de transferência de calor na região. [10,13,14].

Figura 4 - Micrografias de microscopia das amostras de aço 316L produzidas (a) Poça de fusão na altura média da amostra, (b) Microestrutura da primeira camada, (c) Imagens de SEM das microestruturas colunar e equiaxial referentes a última camada depositada.



Fonte [15]

Frente ao objetivo de aprimorar as características avaliadas durante a análise da microestrutura, é proposto o tratamento térmico, antes ou depois, da deposição do metal [11]. Tratamentos térmicos pós fabricação, podem diminuir defeitos da peça tais como rachaduras e poros por falta de fusão [10], melhorando as características e desempenho físicos.

Outrossim, uma questão também relacionada a propriedades mecânicas, refere-se a maior resistência observada nas peças, de aço 316L, produzidas por DED, quando estas são comparadas as peças fabricadas por processos convencionais [15]. Em análises da deposição multicamada de Inconel 625, foram obtidos valores de dureza que variaram entre as camadas de uma mesma amostra, possivelmente em função do resfriamento distinto e, portanto, não controlado [6].

Além das análises microestruturais e mecânicas, também são realizadas pontuações sobre modelagens matemáticas. Dentre elas, tem-se estudos focados em simular as dinâmicas e interações térmicas do processo [14,16], além de prever as dimensões finais da produção de uma peça [17] ou mesurar a temperatura de qualquer local durante o processo de deposição [18].

Neste mesmo contexto de modelagem, também podem ser consideradas observações do fluxo de pó. Os objetivos destas últimas análises, estão relacionados

a contabilização de partículas efetivamente fundidas no processo [19], além apontamentos sobre o perfil do feixe, alinhamento do laser e modelo do bico [16].

Por fim, também existem análises não voltadas para o estudo do processo, mas para a avaliação da qualidade da matéria prima utilizada para deposição, no caso, o pó metálico. Segundo tais fontes, a morfologia do pó metálico, bem como sua concentração de impurezas e quantidade de poros, afeta o fluxo e a interação do laser com pó e, portanto, devem ser considerados para garantir superfícies de boa qualidade e peças sem defeitos entre camadas [9].

3 JUSTIFICATIVA

Como observado na seção 2, um número significativo de artigos encontra-se dispostos a entender, em profundidade, o processo de deposição por energia direcionada. Sobretudo, no que diz respeito ao efeito da variação de determinado parâmetro, isoladamente, durante a fabricação.

Neste contexto, as análises concentram-se em justificar falhas no processo, tais como poros e trincas, além de buscarem modelos preditivos para as dimensões da peça ou avaliarem eficiência da utilização do pó depositado e o perfil de seu fluxo. É válido notar que, nestes estudos, não existe uma estratégia para a escolha de parâmetros adequados que sejam capazes de fabricar uma peça de qualidade daquele determinado material. Os parâmetros são escolhidos com base em testes realizados na máquina e posterior análise da qualidade das peças em laboratório. Consequentemente, não se observo nos artigos relacionados a preocupação com a otimização do processo considerando a influência, individual e conjunta, dos parâmetros de processo durante a deposição com o objetivo de facilitar e acelerar a fabricação de peças com qualidade satisfatória.

Frente a esta lacuna, o presente relatório se propõe a configurar um procedimento que visa ser mais capaz de estabelecer a relação entre a variação de mais de um parâmetro e a qualidade da peça, possibilitando a criação de estratégias de deposição para otimizar o processo de produção de peças de aço inox 316L por DED. Ou seja, é desejado eliminar ou otimizar a etapa de testes, criando estratégias mais sistemáticas e planejadas, de modo que seja possível determinar com rapidez os parâmetros mais adequados do processo para aquele material específico.

4 OBJETIVO

O presente estudo, concentra-se em relacionar as variações paramétricas com a qualidade da peça obtida. Dessa forma, é possível determinar como objetivos gerais:

- Avaliar estratégias para otimizar a deposição de determinado material no processo de manufatura aditiva por DED.
- Determinar um caminho lógico e simplificado para deliberar os melhores parâmetros na fabricação de uma peça.
- Diminuir a necessidade de testes empíricos com a máquina e dinamizando o processo, sobretudo no quesito tempo.

Os resultados observados em estudos anteriores apontaram para a ineficácia da estratégia de otimização que utilizava uma equação de energia [22], portanto, foi concluído que os parâmetros do processo interferem de maneiras distintas e, possivelmente, não proporcionais no processo. Consequentemente, neste relatório foram criados os seguintes objetivos específicos:

- Mapear a influência isolada da variação sistemática de cada parâmetro, com ênfase na velocidade e potência do laser.
- Iniciar a análise da variação da vazão de pó e *shield gas*.
- Avaliar as melhores estratégias para fabricação de amostras futuras.
- Formar uma matriz, na qual constará a evolução e classificação da qualidade da peça, no que diz respeito a formação de poros, densificação entre camadas e adesão ao substrato, frente a variação de cada parâmetro analisado.

5 PROCEDIMENTOS

Frente ao objetivo de analisar a qualidade da peça para a variação de determinados parâmetros é necessária uma caracterização completa. A caracterização visa compreender quais parâmetros devem ser alterados no processo para a sua otimização, considerando as dimensões do depositado, a densificação, as fases presentes e o tamanho de grão.

Nesse trabalho, a análise dimensional das peças (denominadas *features*) foi realizada em lupa estereoscópica com o objetivo de analisar o impacto dos diferentes parâmetros do processo.

Para visualização da microestrutura, foi utilizado o ataque metalográfico e observação em microscópio óptico. Quando o material do substrato e do pó depositado é o mesmo, a comparação visual dessas duas regiões pode indicar o desempenho do material depositado.

Após as análises individuais de cada rodada foi construída uma matriz de qualidade para mapear as variações paramétricas realizadas para o avanço e potência. Este mapeamento auxiliará, de maneira qualitativa, na tomada de decisão do operador da máquina para obtenção de uma amostra com características satisfatórias para aquele determinado material. Além disso, a matriz fornecerá uma visão geral necessária para estabelecer relações mais complexas entre os parâmetros e a qualidade da peça. Este fato pode auxiliar na descoberta de índices ou equações que forneçam, de maneira mais direta, os valores mais apropriados dos parâmetros a serem utilizados para cada material.

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE AMOSTRAS

O processo de manufatura aditiva por DED foi realizado com a máquina ferramenta ROMI DCM 620-5x Hybrid. Essa máquina hibrida é composta por um centro de usinagem de 5 eixos e um laser de fibra-óptica com potência de até 500 W. A deposição foi realizada com dois materiais em pó: aço inoxidável 316 L e aço ferramenta H13, com granulometria 45 a 106 µm. O pó de 316L foi depositado em substrato de mesma composição, enquanto o de H13 foi depositado em substratos de mesma composição ou de aço 1045.

Foram utilizadas combinações diferentes de potência do laser, velocidade de avanço do cabeçote, vazão de pó e *shield gas*. Uma combinação dos valores escolhidos para cada parâmetro é denominada receita. Vale notar que, para facilitar a identificação e entendimento da influência de determinado parâmetro no processo, foi variado apenas um valor por vez. Determinados grupos de amostras foram fabricadas em períodos distintos, denominados rodadas de teste. Em cada nova rodada, os parâmetros foram variados ou mantidos constantes com base nas análises das amostras anteriores. Dessa forma, existiram 3 rodadas de teste para peças fabricadas em aço ferramenta H13 e 2 rodadas de teste para peças compostas por aço 316L.

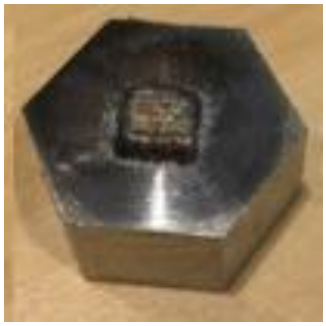
Análises anteriores [20,21,22] apontaram que a velocidade de avanço influencia significativamente em mais de um fator dentro do processo de fusão e durante o resfriamento da peça. Este parâmetro é capaz, por exemplo, de interferir na energia e quantidade de pó disponíveis para cada seção da peça, bem como limitar o tempo do material recém fundido na atmosfera controlada formada por gases de proteção.

Dessa forma, na primeira rodada de testes do 316L e nas duas primeiras rodadas do H13 o avanço foi mantido constante em 6 mm/s e os demais parâmetros, tais como *Shield gas,* vazão e potência, foram variados.

Após análise dos resultados, optou-se por adicionar mais duas velocidades nos testes seguintes. Logo, as velocidades de 5mm/s e 7 mm/s foram testadas dentro da mesma faixa de potência utilizada nas rodas anteriores para ampliar a observação dos efeitos de cada parâmetro no processo.

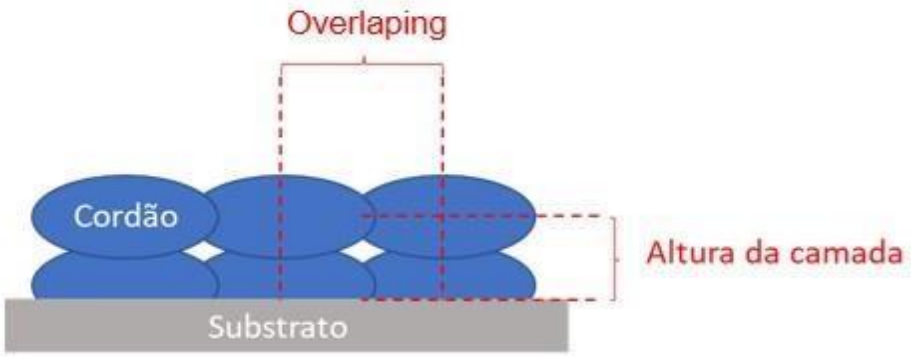
Para cada receita dentro de cada rodada de teste, foram fabricadas duas peças com camadas sobrepostas de maneira cruzada, o resultado dessa sobreposição no substrato é denominado *feature* (Figura 5). Vale notar que essa geometria depende da determinação de outros dois parâmetros, o overlaping e a altura da camada. O overlaping pode ser definido como a distância entre os centros de dois cordões adjacentes depositados (Figura 6).

Figura 5 – *Feature.*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 - Imagem ilustrativa dos parâmetros de overlaping e altura da camada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros utilizados para cada receita e material, bem como a nomenclatura utilizada e sua rodada de testes associada, encontram-se nas Tabelas 1 a 5.

Tabela 1 - Nomenclatura e parâmetros utilizados nas *features* fabricadas com aço inoxidável 316L para a primeira rodada de teste.

ID	Potência do laser (W)	Velocidade de avanço (mm/s)	Vazão (g/min)	Shield Gas (L/min)	Overlaping (mm)	Altura da camada (mm)
I1-260.6.7	260	6	3,3	7	0,60	0,40
I1-280.6.7	280	6	3,3	7	0,60	0,40
I1-300.6.7*	300	6	8	7	0,60	0,40
I1-300.6.7	300	6	3,3	7	0,60	0,40

I1-300.6.9	300	6	3,3	9	0,60	0,40
I1-320.6.7	320	6	3,3	7	0,60	0,40
I1-340.6.7	340	6	3,3	7	0,60	0,40
I1-350.6.7	350	6	3,3	7	0,60	0,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 - Nomenclatura e parâmetros utilizados nas *features* fabricadas com aço inoxidável 316L para a segunda rodada de testes.

ID	Potência do laser (W)	Velocidade de avanço (mm/s)	Vazão (g/min)	Shield Gas (L/min)	Overlaping (mm)	Altura da camada (mm)
I2-260.6.7	300	5	3,3	7	0,60	0,40
I2-280.6.7	320	5	3,3	7	0,60	0,40
I2-300.6.7*	340	5	3,3	7	0,60	0,40
I2-300.6.7	280	7	3,3	7	0,60	0,40
I2-300.6.9	300	7	3,3	9	0,60	0,40
I2-320.6.7	320	7	3,3	7	0,60	0,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3. Nomenclatura e parâmetros utilizados nas *features* fabricadas em aço ferramenta H13 na primeira rodada de testes.

ID	Substrato	Potência do laser (W)	Velocidade de avanço (mm/s)	Vazão (g/min)	Shield Gas (L/min)	Overlaping (mm)	Altura da camada (mm)
H1-300.6	H13	300	6	8	7	0,60	0,4
H1-300*.6	SAE1045	300	6	8	7	0,60	0,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4. Nomenclatura e parâmetros utilizados nas *features* fabricadas em aço ferramenta H13 na segunda rodada de testes.

ID	Substrato	Potência do laser (W)	Velocidade de avanço (mm/s)	Vazão (g/min)	Shield Gas (L/min)	Overlaping (mm)	Altura da camada (mm)
H2-280 .6	H13	260	6	8	7	0,60	0,4
H2-280*.6	SAE1045	280	6	8	7	0,60	0,4
H2-300.6	H13	300	6	8	7	0,60	0,4
H2-300*.6	SAE1045	300	6	8	7	0,60	0,4
H2-320.6	H13	320	6	8	7	0,60	0,4
H2-320*.6	SAE1045	320	6	8	7	0,60	0,4

Tabela 5. Nomenclatura e parâmetros utilizados nas *features* fabricadas em aço ferramenta H13 na terceira rodada de testes.

ID	Substrato	Potência do laser (W)	Velocidade de avanço (mm/s)	Vazão (g/min)	Shield Gas (L/min)	Overlaping (mm)	Altura da camada (mm)
H3-280.6	H13	260	6	8	7	0,60	0,4
H3-280*.5	H13	320	5	8	7	0,60	0,4
H3-300 .6	H13	320	6	8	7	0,60	0,4
H3-300*.7	H13	320	7	8	7	0,60	0,4
H3-340.6	H13	340	6	8	7	0,60	0,4
H3-360.6	H13	360	6	8	7	0,60	0,4

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS DE ANÁLISE DAS AMOSTRAS

A densificação foi analisada por imagens obtidas em lupa estereoscópica (Zeiss Stemi 508). Para isso, as amostras de *feature* foram seccionadas transversalmente, com auxílio da cortadora policorte (ATM Brillant 200). Posteriormente, as amostras foram embutidas em baquelite, lixadas com lixas de grão 180 a 1200 e polidas com suspensões de diamantes de 3 e 1 µm. O lixamento e polimento foram necessários para garantir planicidade da superfície de interesse, assegurando o foco e a identificação de porosidade.

5.3 METALOGRAFIA

A metalografia foi utilizada sobretudo para observar e comparar a microestrutura entre o material do substrato e o material depositado. Esta análise contribuiu com informações adicionais para o que foi observado nas imagens de estereoscopia. Portanto, auxilia na determinação da qualidade da peça, principalmente no que diz respeito a formação da microestrutura em função do resfriamento e identificação de defeitos, tais como poros e fissuras.

Para a observação das amostras em microscópio óptico (Zeiss Axio Vert A1), as peças de *feature* foram seccionadas, embutidas em baquelite, lixadas e polidas. Posteriormente, as amostras de aço ferramenta H13, pertencentes a primeira *rodada* de testes, foram submetidas ao ataque em solução de 5% de nital por 30 segundos. As peças de aço inox 316L, por sua vez, foram submetidas ao ataque eletrolítico em solução com concentração de 10% de ácido oxálico, aplicando corrente de aproximadamente 2 A (1 A/cm²), durante um período de 1,5 minutos por amostra. Assim, foi possível atacar os contornos de grão, revelando a microestrutura.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ESTEREOSCOPIA

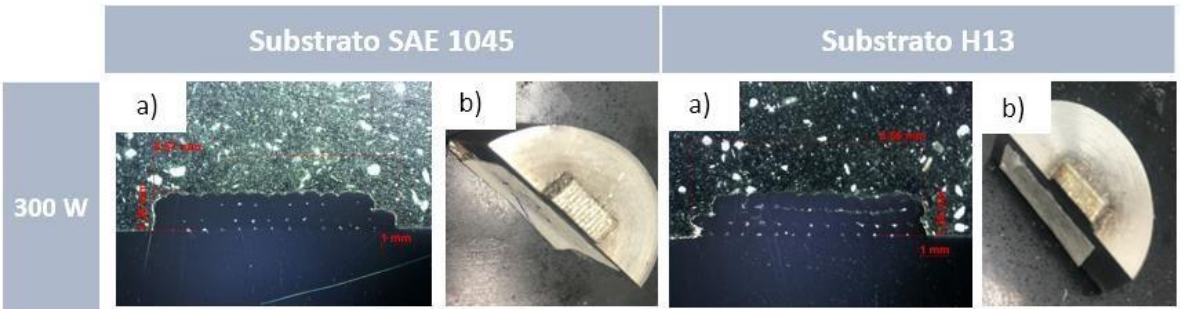
A densificação bem como a variação da altura das camadas depositadas foram analisadas nas amostras *features* (peças). Foram fabricadas, para ambos os materiais, amostras *features* com 3 camadas.

6.1.1 AÇO FERRAMENTA H13

6.1.1.2 PRIMEIRA RODADA

Inicialmente, foram fabricadas amostras com os mesmos parâmetros, porém substratos distintos, isto é, H13 e SAE1045. As imagens destas peças além de suas informações dimensionais, encontram-se, respectivamente, na Figura 7 e Tabela 6.

Figura 7 - Estereoscopia das amostras fabricadas na primeira rodada com pó de H13(a). Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 -Dimensões compiladas das amostras de deposição fabricadas na primeira rodada de teste
.

Potência (W)	Substrato	Altura (mm)	Largura (mm)
300	H13	1,44	8,56
300	SAE 1045	1,36	8,57

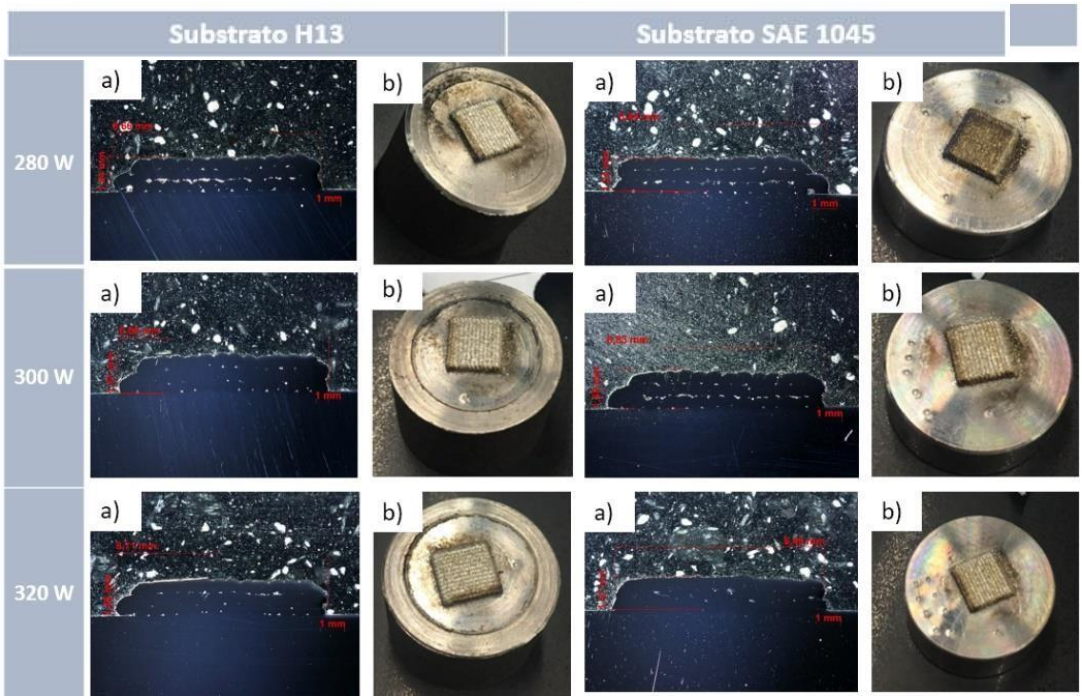
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 7 é possível observar a presença significativa de espaçamentos entre as camadas depositadas. Tais espaçamentos foram classificados nesta etapa como poros por falta de fusão, sinalizando densificação insatisfatória.

6.1.1.2 SEGUNDA RODADA

A segunda rodada de testes foi organizada seguindo a premissa observada na primeira rodada de falta de energia para fusão do material em pó. Desta forma, a potência foi variada acima e abaixo de 300 W gerando mais duas receitas para analisar o aumento e a diminuição de poros respectivamente. A combinação utilizada, com potência de 300 W, na primeira rodada foi novamente fabricada na segunda para avaliar a repetibilidade do processo. Os resultados para cada receita destes testes são demonstrados na Figura 8 e na Tabela 7.

Figura 8 - Estereoscopia das amostras fabricadas com pó de H13 na segunda rodada de testes(a). Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 -Dimensões compiladas das amostras de deposição fabricadas na rodada de teste 2.

Potência (W)	Substrato	Altura (mm)	Largura (mm)
280	SAE 1045	1,44	8,66
300	SAE 1045	1,51	8,68
320	SAE 1045	1,37	8,46
280	H13	1,34	8,44
300	H13	1,58	8,83
320	H13	1,46	8,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

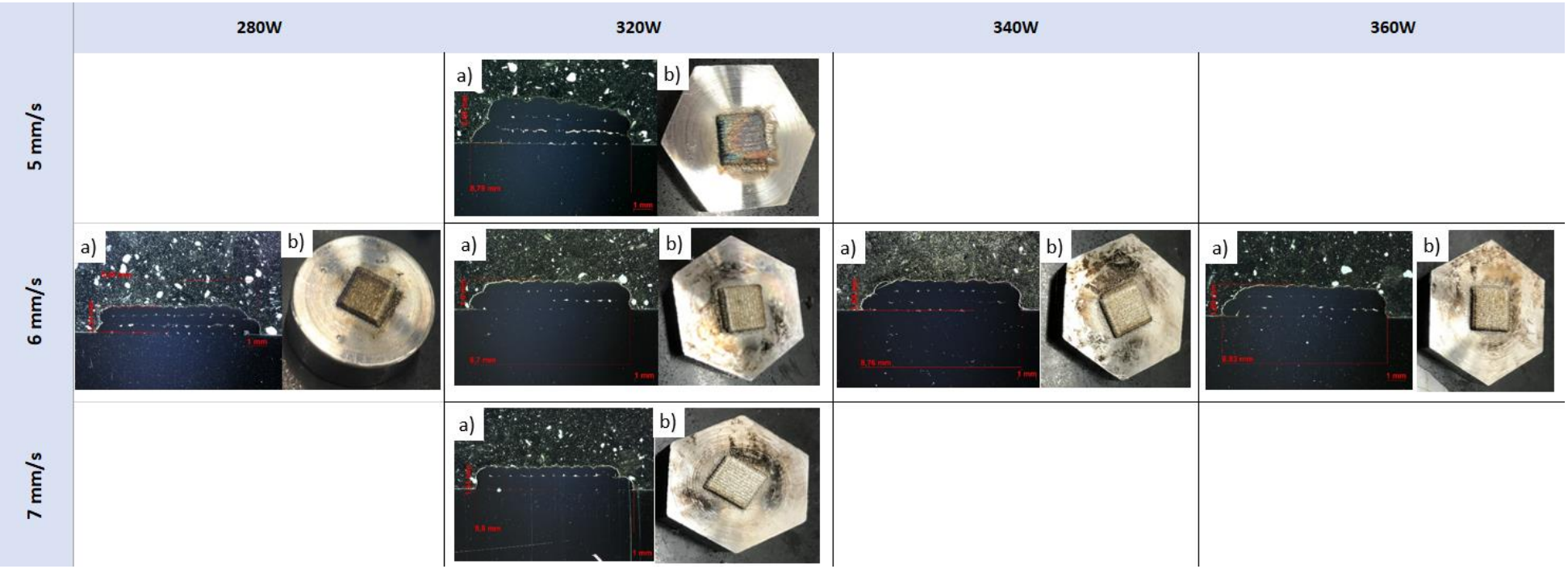
As imagens da segunda rodada apresentaram, como esperado, diminuição na quantidade de poros com a elevação do valor da potência relacionada, neste caso, a um aumento direto da energia disponível para fundir o material. Porém, embora a densificação tenha sofrido melhoras, com destaque para a amostra fabricada com 300 W de potência em substrato H13, ainda é possível observar a existência de espaçamentos entre as camadas. Tem-se, portanto, a persistência da densificação insatisfatória, fato que pode contribuir para perda das características finais esperadas para uma peça de H13, sobretudo relacionadas as propriedades físicas.

Outrossim, no que diz respeito as dimensões da peça, os valores de altura e largura observados para potências de 280 W e 300 W são semelhantes, porém estes passam a decair significativamente para a potência superior de 320 W. A explicação para este fato possivelmente está relacionada ao aumento de adesão entre camadas e consequente diminuição dos poros, impedindo que estes espaçamentos ampliem e distorçam as dimensões das peças.

6.1.1.2 TERCEIRA RODADA

Na terceira rodada de testes a velocidade de avanço foi variada para observar seu efeito no processo de deposição. Além disso, novamente o valor da potência foi ampliado, desta vez para 340W e 360W com velocidade constante igual a 6 mm/s, no intuito de fornecer a energia suficiente fusão adequada das camadas ocasionando a diminuição dos poros anteriormente observados. Todas as peças desta rodada foram depositadas em substrato compostos por H13. A Figura 9 e a Tabela 8, resumem os resultados obtidos nesta rodada para as variações paramétricas comentadas.

Figura 9- Estereoscopia das amostras fabricadas com pó de H13 na terceira rodada de testes(a). Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 -Dimensões compiladas das amostras de deposição fabricadas na rodada de teste 3.

Potência (W)	Avanço (mm/s)	Substrato	Altura (mm)	Largura (mm)
320	5	H13	2,63	9,01
320	7	H13	1,30	8,82
320	6	H13	1,66	8,70
340	6	H13	1,67	8,77
360	6	H13	1,64	8,80

Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente é possível afirmar que embora o aumento da potência forneça mais energia para a fusão do material, os poros observados não diminuíram nesta terceira rodada. Este fato sinalizou para a hipótese de que os espaçamentos encontrados nas amostras de H13 não estão relacionados apenas a falta de energia, mas também a uma possível ocorrência de oxidação. Ou seja, o tempo de resfriamento da peça encontra-se amplo o suficiente para que o material ainda fundido entre em contato com o oxigênio do ar causando a oxidação de algumas porções dos cordões depositados. Consequentemente, a próxima camada não é capaz de aderir de maneira adequada nos pontos oxidados. Frente a esta nova teoria, é aconselhado que as amostras futuras de H13 sejam fabricadas com valores superiores de *Shield Gas*, gás responsável por criar uma atmosfera de proteção para o material depositado, podendo evitar a oxidação entre as camadas e aumentar a qualidade da densificação entre elas.

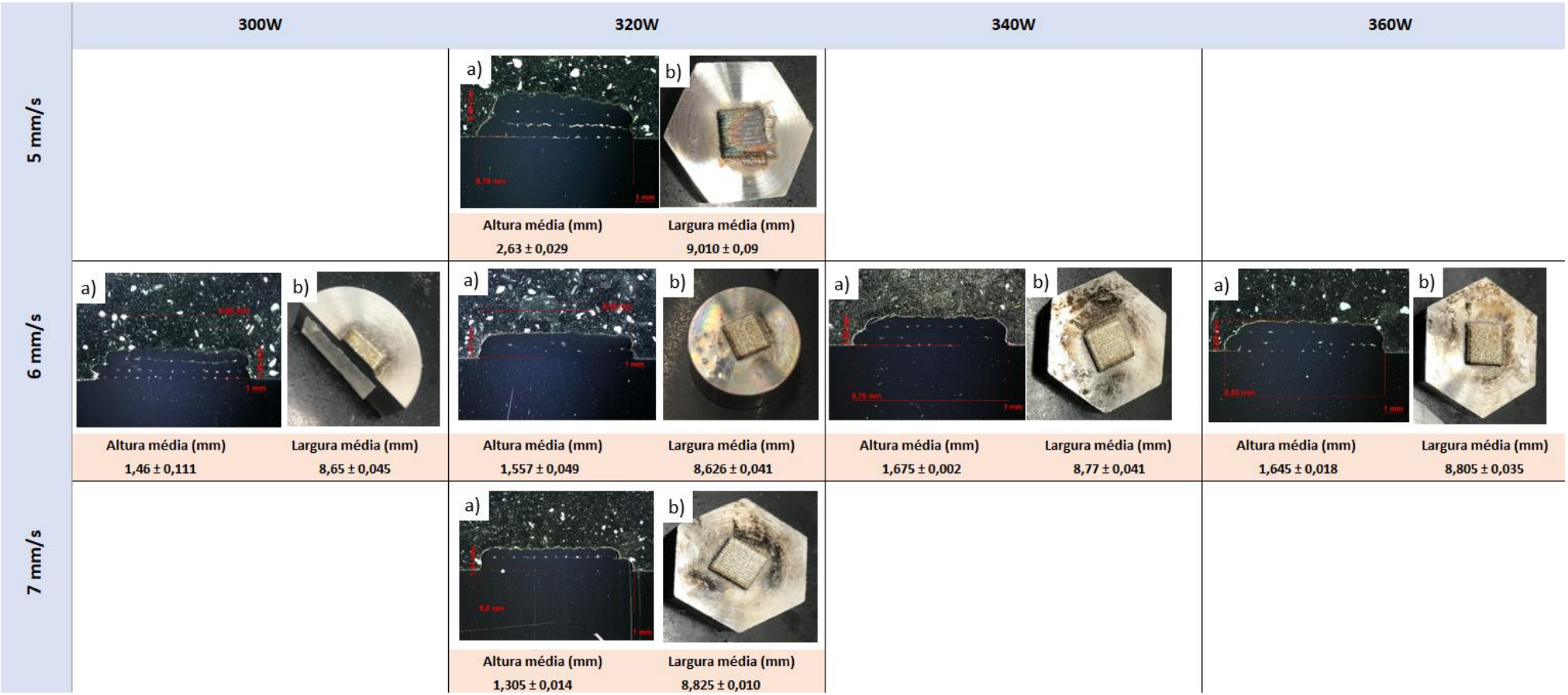
Com relação as dimensões, no que diz respeito a velocidade de avanço, é notório o impacto deste parâmetro com os valores de altura (Tabela 8). Isto é, o aumento da velocidade ocasiona uma diminuição da quantidade de pó disponível para fundir, logo as dimensões da peça também diminuirão, neste caso, com destaque para a altura da amostra. Outrossim, o aumento da potência nesta rodada não ocasionou mudanças significativas nas dimensões da peça, mantendo valores praticamente constantes para altura e largura.

6.1.1.2 MATRIZ DE QUALIDADE

Considerando os resultados das três rodadas de experimentos realizados para o H13, foi possível iniciar a construção de uma matriz capaz de mapear a evolução

da qualidade da peça e de suas dimensões frente as variações paramétricas. A Figura 10 representa esta matriz.

Figura 10 – Matriz de qualidade apresentando imagem estereoscópica (a), visão superficial (b) e dimensões médias das amostras fabricadas com pó de H13 com substrato de mesmo material.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Figura 10, é possível notar com facilidade a tendência de aumento da altura, quando a potência aumenta ou a velocidade de avanço diminui. No primeiro caso, o acréscimo nesta dimensão ocorre em função da maior quantidade de energia disponível para fundir uma mesma quantidade de pó. No segundo caso, o decréscimo da altura ocorre em função da diminuição da quantidade de pó disponível para fundir em cada região do substrato, uma vez que a velocidade de avanço interfere indiretamente na vazão de pó.

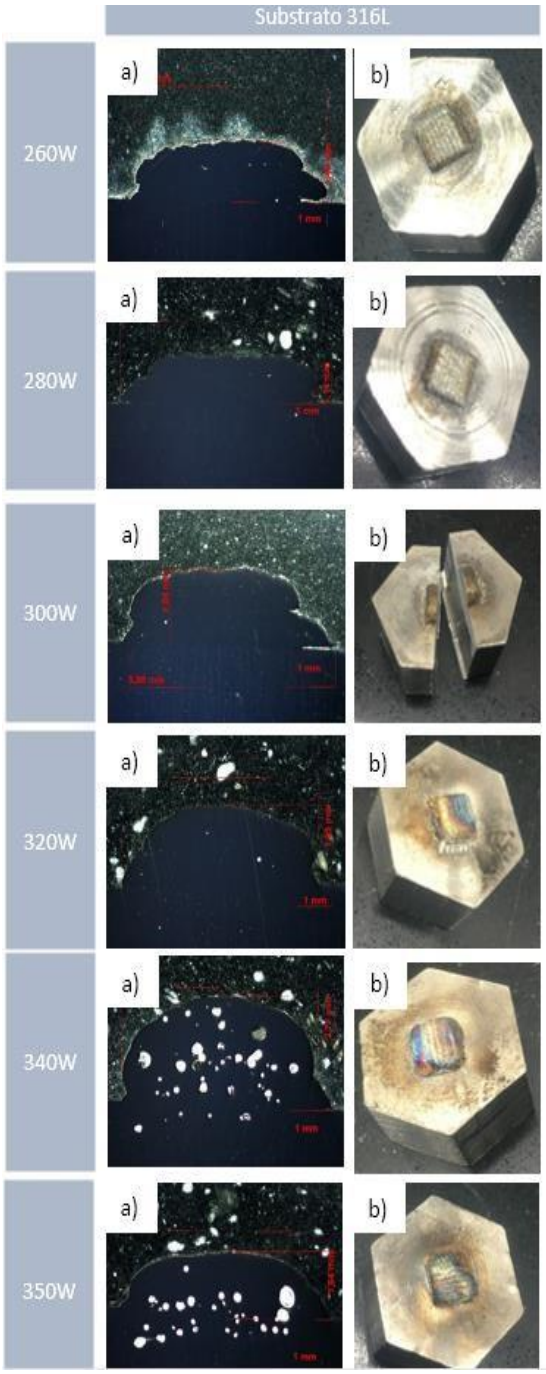
A permanência dos poros também pode ser reafirmada mesmo com o aumento da potência associada a amostra. Logo, a matriz de qualidade possui potencial para auxiliar na visualização da influência de cada parâmetro no processo. Consequentemente, ela poderá contribuir para dinamizar a comparação com amostras futuras e para a formulação de estratégias focadas na otimização da escolha dos valores mais adequados para ofertar uma peça ótima.

6.1.2 AÇO INOX 316L

6.1.2.2 PRIMEIRA RODADA

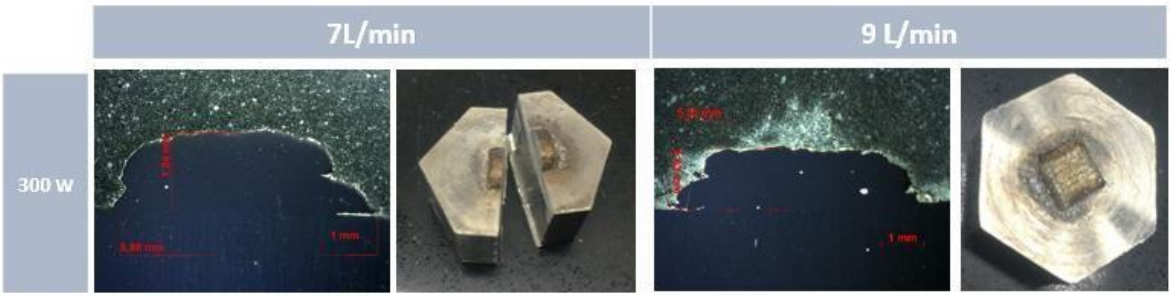
A estratégia adotada, na primeira rodada de testes, para as amostras de aço 316L se concentrou, principalmente, em manter o avanço constante, igual a 6 mm/s e variar o parâmetro de potência (Figura 11). O objetivo estava focado em analisar a progressão e aparecimento de defeitos na peça, principalmente poros por falta de fusão ou por gás aprisionado. Além disso, também foram realizadas mais duas receitas mantendo constante a potência e a velocidade em respectivamente, 300 W e 6 mm/s, porém variando a vazão de pó (Figura 12) e *Shield gas* (Figura 13). Os valores médios das dimensões obtidas para as *features* de todas as receitas mencionadas encontram-se na Tabela 9.

Figura 11 - Estereoscopia das amostras da primeira rodada com variação da potência e demais parâmetros constantes(a). Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



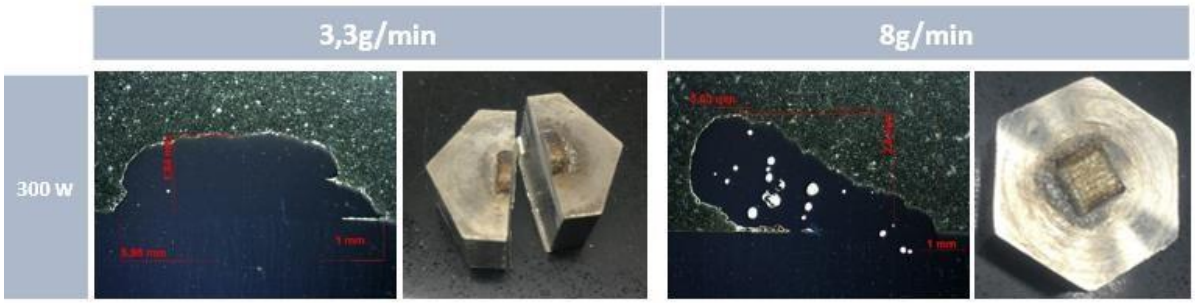
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Estereoscopia das amostras da primeira rodada de potência igual a 300 W e variação no *Shield Gas*(a). Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Estereoscopia das amostras da primeira rodada de potência igual a 300 W e variação na vazão(a).
Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Dimensões médias das amostras para cada receita da primeira rodada com os principais parâmetros variados.

Potência do laser (W)	Vazão (g/min)	Shield Gas (L/min)	Altura (mm)	Largura (mm)
260	3,3	7	2,06	5,4
280	3,3	7	1,33	5,53
300	3,3	7	2,08	5,95
300	3,3	9	1,39	5,43
300	8	7	3,19	5,99
320	3,3	7	1,83	5,56
340	3,3	7	2,47	5,63
350	3,3	7	1,64	6,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que diz respeito a variação da potência, é notória, na Figura 9, a relação deste parâmetro com a quantidade e tipo de poros da amostra. Isto é, potências menores ofertam menos energia por seção depositada, o que pode acarretar adesão insatisfatória entre camadas e aparecimento de poros por falta de fusão. A imagem

que ilustra mais adequadamente este cenário trata-se da amostra com potência de 260 W na Figura 11. Conforme o valor do parâmetro analisado é elevado a energia por seção e disponível para fusão aumenta e observa-se uma significativa melhora na densificação e qualidade da peça com características próximas aquelas desejadas para a peça final. Este é o caso das amostras de potência 280 W e 300 W, as quais apresentam adesão entre camadas satisfatória, presença de poros baixa ou nula, bem como visão superficial da peça com aspecto menos queimado, sinalizando para ausência da possibilidade de oxidação ou criação de poros por bolhas de gás em função da energia e tempo de resfriamento elevados.

A partir de certo valor, a quantidade de energia, neste caso diretamente relacionada a potência, pode ser considerada significativamente alta para alterar o período e a dinâmica de resfriamento da peça e ocasionar poros por prendimento de gás. Esta energia em excesso pode ser sinalizada pela tonalidade azulada, com aspecto de queimado, das amostras nas imagens de visão superficial. Tais poros se diferenciam daqueles relacionados a falta de fusão principalmente em função de seu aspecto visual mais arredondado. Além disso eles podem ocorrer em qualquer região da peça, não se limitando a interface dos cordões que formam as camadas.

Uma hipótese de solução que foi testada na segunda rodada para diminuir poros por bolhas de gás está relacionada a diminuição da velocidade de avanço. Dessa forma o gás terá tempo para se desprender da amostra antes que a próxima camada seja depositada.

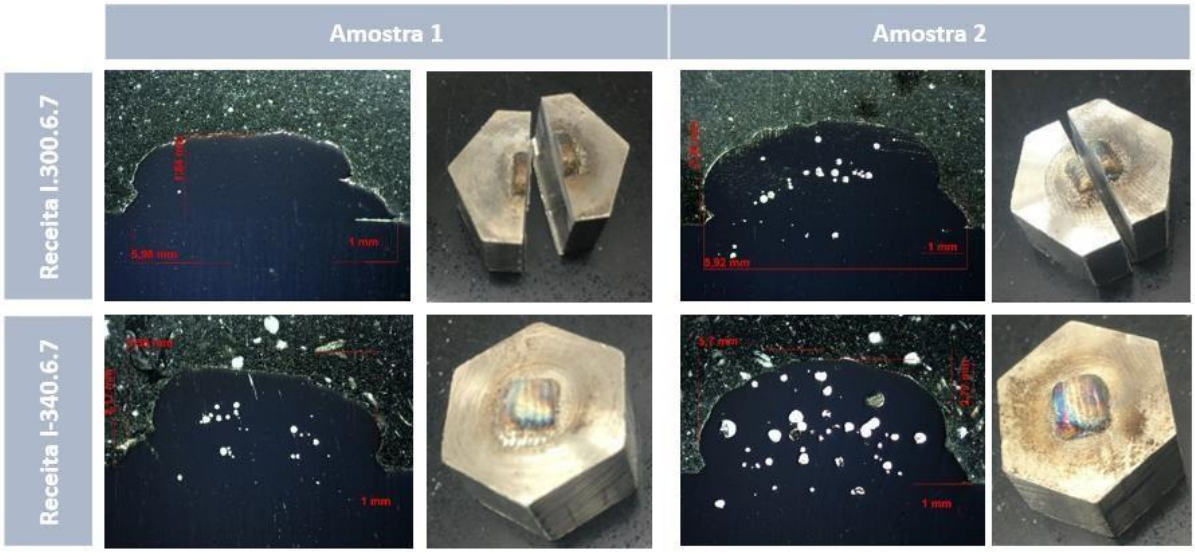
Em relação aos demais parâmetros variados, foi observado que a alteração na vazão de pó impacta significativamente na qualidade e, principalmente, nas dimensões da peça como demonstrado na Tabela 6. Aumentar este parâmetro ofertou a deposição de uma quantidade de material em demasia que tornou a energia disponível insuficiente para o processo de fusão adequado. A Figura 12 ilustra este fato, pois, amostras fabricadas com vazão de 8 g/min apresentam grande quantidade de poros, além de possuírem distorções no que diz respeito a forma da *feature* e a organização dos cordões das camadas depositadas. Frente a contribuição significativa da vazão no processo de fusão, é necessário atentar-se, em amostras futuras, para a influência de parâmetros do processo que podem direta ou indiretamente alterar a quantidade de pó depositado por seção, como é o caso da velocidade de avanço.

Observando a alteração do *shield gas*, na Figura 13, é possível afirmar que o aumento deste parâmetro pode auxiliar e acelerar o resfriamento da peça, ocasionando poros por falta de fusão. Observando a Tabela 6, esta aceleração no resfriamento também proporciona a diminuição das dimensões da peça. Além disso, elevar o fluxo de gás pode dificultar o espalhamento de pó, formando uma barreira para seu escoamento. Isto pode ser uma justificativa para a diminuição da largura observada na Tabela 6 quando o valor do *shield gas* é aumentado de 7 L/min para 9 L/min.

No que diz respeito as dimensões das amostras, observando a Tabela 9, tem-se que o aumento da potência, com os demais parâmetros constantes, está relacionada a um aumento da largura da peça. Isto pode ser justificado pela energia elevada do material, ampliando o tempo de resfriamento e permitindo que o pó fundido se espalhe para as bordas da peça. Outra análise pertinente está relacionada a correlação entre altura e potência. Neste caso, potência superiores permitem a fusão de uma maior quantidade de pó agregando positivamente nas dimensões da peça. Este cenário é ilustrado ao comparar a amostra de potência 280 W com a amostra de energia 300 W com os demais parâmetros idênticos. Entretanto, a presença de poros agrega espaços vazios na peça, ampliando o valor da altura. Tal questão interfere e dificulta a análise da dimensão, uma vez que, esta é influenciada tanto pela presença de poros quanto pela quantidade de pó aderida na peça.

Outrossim, cada receita origina a fabricação de duas ou mais amostras. Para a maioria das receitas, as peças fabricadas com os mesmos parâmetros possuem as mesmas características, sinalizando para a repetibilidade do processo. Porém, ocorreram exceções e, nestes casos, a principal diferença entre as amostras se concentra na formação ou acentuação dos poros por gás (Figura 14). Este fato pode estar atrelado a erros isolados do processo ou problemas com a máquina responsável pela deposição.

Figura 14 - Comparação entre amostras de mesma receita da primeira rodada. Estereoscopia(a). Respectiva visão superficial (b). As receitas analisadas são a I.300.6.7 e a I-340.6.7.

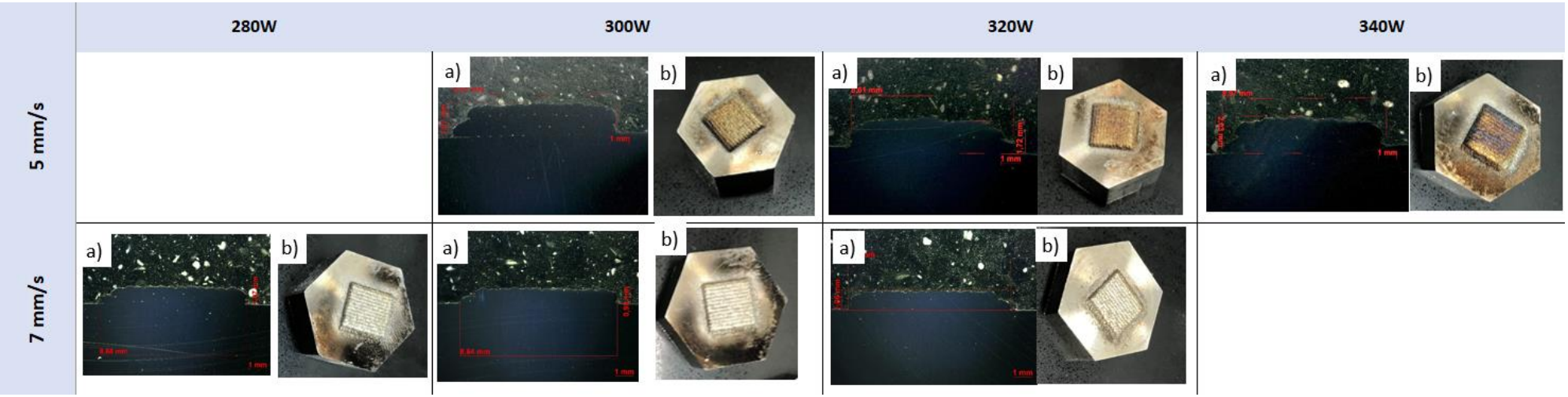


Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.2.2 SEGUNDA RODADA

Frente aos resultados observados na primeira rodada e a relação direta e clara da potência com a qualidade da peça, nas amostras da segunda rodada foi variado o avanço acima e abaixo de 6 mm/s mantendo a potência dentro da faixa de valores anteriormente testados. O objetivo desta variação está relacionado ao dimensionamento e entendimento da contribuição do avanço dada sua complexidade devida sua influência em mais de um fator do processo, como é o caso energia, também dependente da potência, e vazão de pó. Os valores médios das dimensões obtidas para as *features e a estereoscopia* das receitas da segunda rodada de 316L encontram-se, respectivamente na Tabela 10 e Figura 15.

Figura 15 - Estereoscopia das amostras da primeira rodada com variação da potência e demais parâmetros constantes(a). Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Dimensões médias das amostras para cada receita da segunda rodada com os principais parâmetros variados.

Potência do laser (W)	Vazão (g/min)	Shield Gas (L/min)	Altura (mm)	Largura (mm)
280	3,3	7	0,825	8,785
300	3,3	7	0,985	8,72
320	3,3	7	1,06	8,7
300	3,3	5	1,635	8,63
320	3,3	5	1,645	8,61
340	3,3	5	1,945	8,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta rodada, a maioria das peças apresentou boa densificação entre camadas, adesão ao substrato satisfatória, além de poucos ou nenhum poro por falta de fusão (Figura 15). A maioria destes poros se concentrou em amostras de baixa potência, como a amostra de 7 mm/s com 280W, e amostras com volume de pó depositado em demasia por seção em função da diminuição da velocidade de avanço, tal como ocorreu na amostra de avanço 5 mm/s com potência 300W.

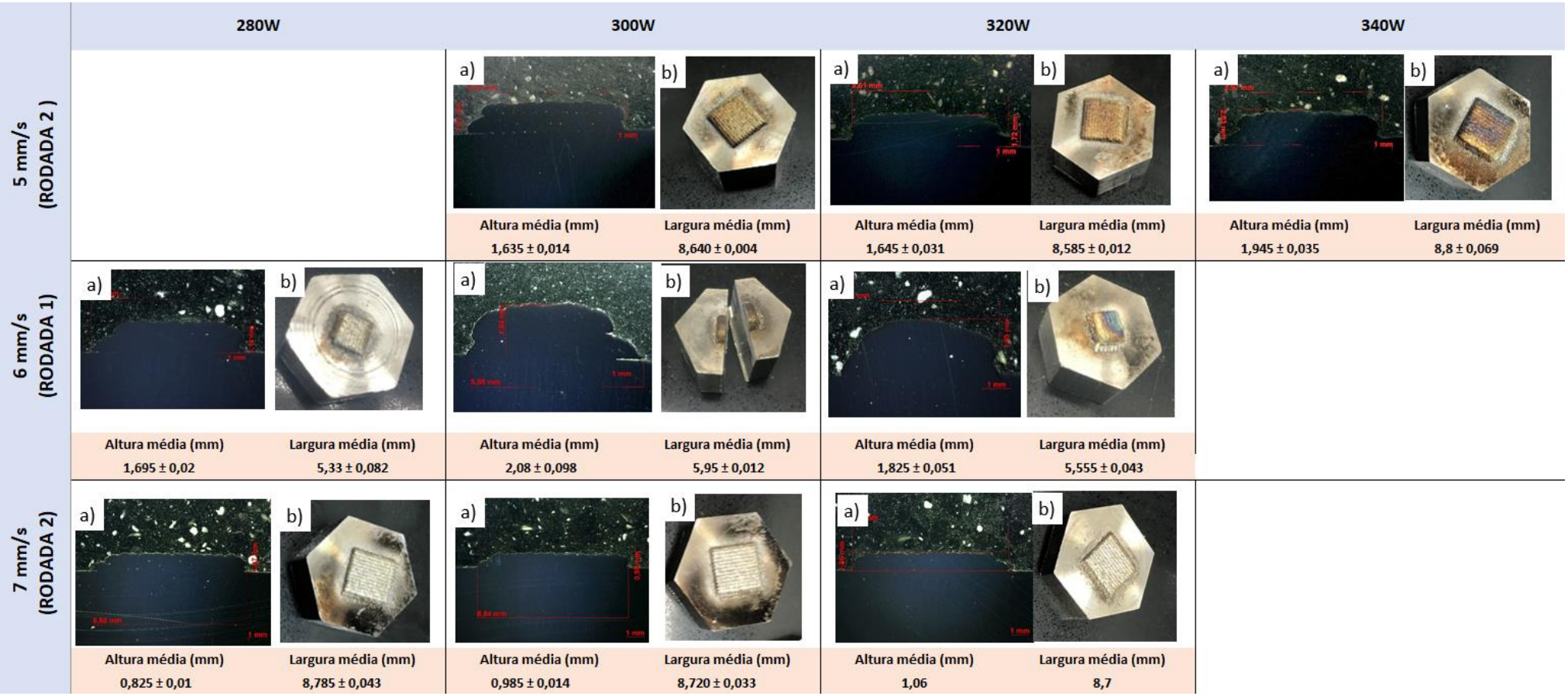
Outrossim, não foram observados poros por bolhas de gás, inclusive frente a velocidade de avanço superiores. Neste contexto, a hipótese criada na primeira rodada que atrelava a dificuldade do gás em escapar com a velocidade avanço muito elevada foi refutada pelas amostras de velocidade 7 mm/s. Ou seja, mesmo com avanço superior quando comparado as amostras da primeira rodada, o gás foi capaz de desprender sem ser aprisionado pela deposição da próxima camada. Estas observações sinalizam para equívocos ou problemas durante o processo de produção das peças da primeira rodada, sendo o aparecimento das bolhas de gás um indicativo destes erros.

No que diz respeito as dimensões, assim como observado para as amostras de H13 na seção 6.1.1.2, existe uma relação clara entre o avanço e a altura da peça (Tabela 10). Quando maior a velocidade de avanço, menor o volume de pó disponível para fusão por seção da peça, consequentemente, menores serão as dimensões da amostra fabricada, com destaque para a altura.

6.1.2.3 MATRIZ DE QUALIDADE

Frente os resultados das duas rodadas de experimentos realizados para o 316L, foi possível, assim como no H13, iniciar a construção de uma matriz capaz de mapear a evolução da qualidade da peça e de suas dimensões frente as variações paramétricas. A Figura 16 representa esta matriz.

Figura 16 – Matriz de qualidade apresentando imagem estereoscópica (a), visão superficial (b) e dimensões médias das amostras fabricadas com pó de 316L com substrato de mesmo material.



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao comparar as amostras das diferentes rodadas, é possível notar que a tendência observada para o avanço na segunda rodada não se concretizou. Isto é, as amostras da primeira rodada não seguem a tendência de diminuição da altura conforme o avanço e, logo, a quantidade de pó disponível para fundir decaem. Novamente, os fatos apontam para problema ocorridos durante a produção da primeira rodada de testes impactaram significativamente na repetibilidade da máquina durante a produção das peças de 6mm/s. Esta hipótese é sustentada frente a distorção dimensional e visual das peças da segunda rodada tornando seu formato arredondado, bem como fatores explicitados em seções anteriores, tais como, a presença de poros por bolhas de gás e as diferenças significativas entre amostras fabricadas com os mesmos parâmetros. Portanto é necessário repetir determinadas receitas pertencentes as duas rodadas para reavaliar a repetibilidade do processo e averiguar os motivos que levaram a esta diferenciação entre as peças.

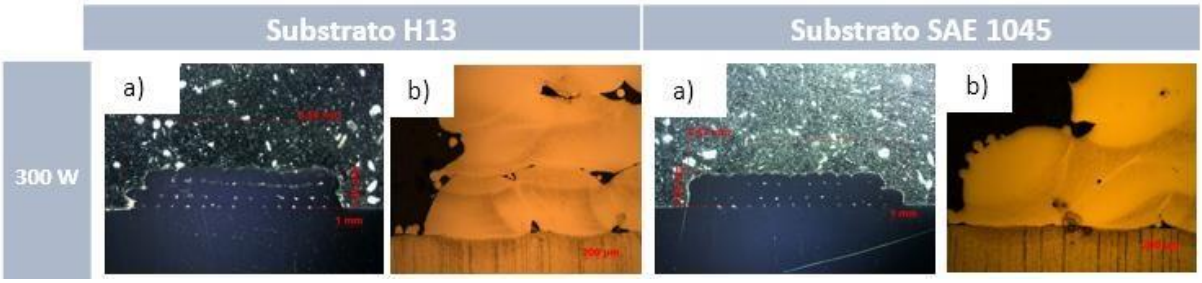
6.2 METALOGRAFIA

Com o ataque metalográfico, é possível determinar e avaliar a adesão da primeira camada depositada com o substrato, bem como observar a microestrutura e detalhar defeitos e poros analisado na lupa estereoscópica. Além disso, quando o pó utilizado e o substrato possuem a mesma composição é possível comparar e estabelecer diferenças na microestrutura deste material considerando os diferentes processos de produção e resfriamento associados ao substrato e ao pó metálico. Vale notar que a análise da microestrutura foi realizada apenas para algumas rodadas das amostras fabricadas.

6.2.2 AÇO FERRAMENTA H13

No caso das amostras fabricadas com pó metálico de H13, foram analisadas apenas as duas receitas da primeira rodada de testes. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 17.

Figura 17 - Imagens de estereoscopia fabricadas com H13 na rodada de teste 1, para potência 300 W e dois substratos distintos(a) e micrografia de cada receita (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

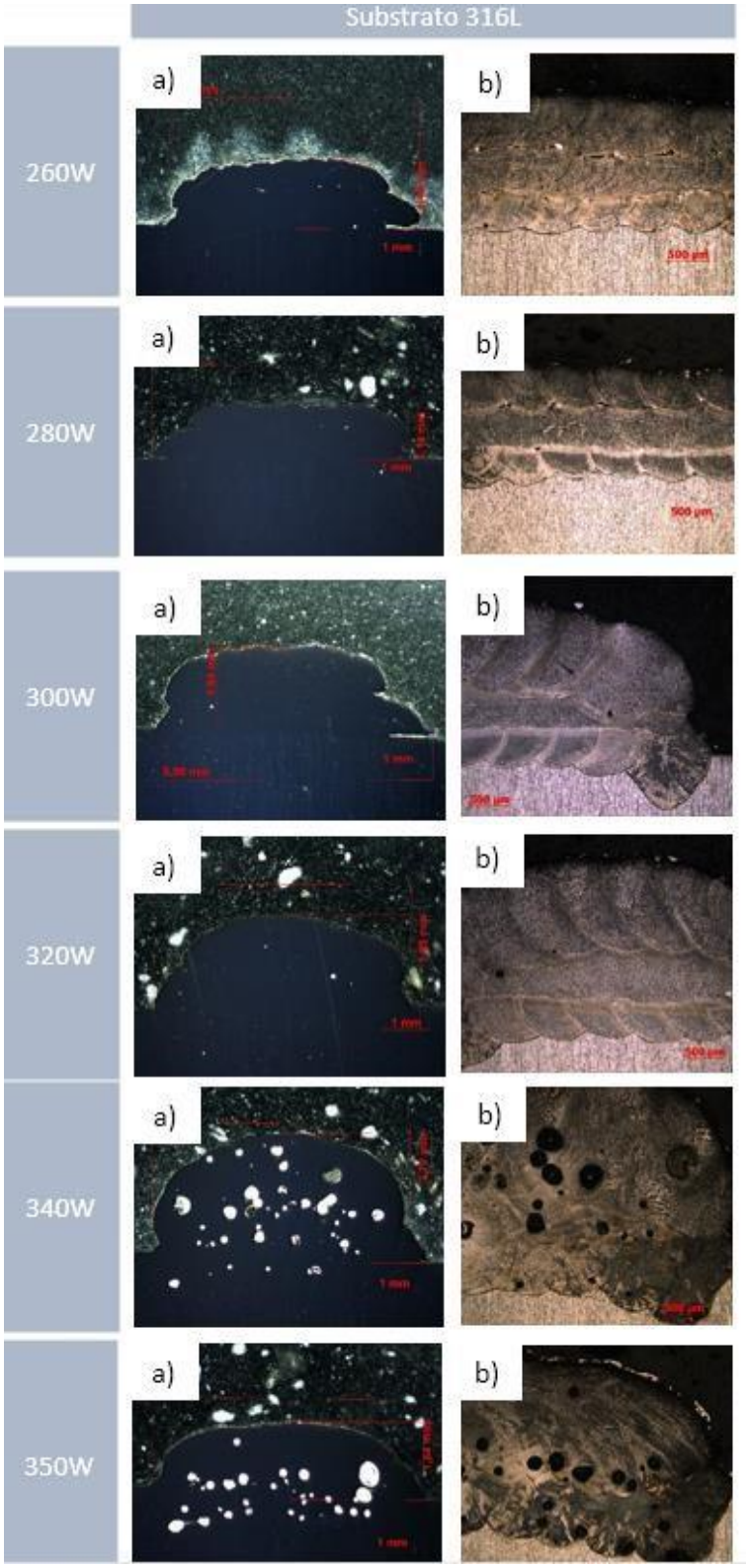
Dentre os principais resultados tem-se adesão precária da primeira camada, possivelmente pela energia insuficiente, fato também responsável pela presença de poros por falta de fusão. Ademais, é possível notar poças de fusão ligeiramente maiores para cordões depositados em substrato de mesmo material do pó, isto é, H13.

6.2.2 AÇO INOX 316L

Os resultados metalográficos para as amostras de aço inox 316L da primeira rodada de testes são demonstrados nas Figuras 18 e 19. Não foram apresentados os resultados da receita com variação de vazão, posto que as imagens de estereoscopia já sinalizavam para distorções nas dimensões da peça além de um nítido desprendimento da primeira camada em relação ao substrato. Também foi realizada uma comparação com a peças obtidas em relatórios anteriores [20,21], na Figura 20.

-

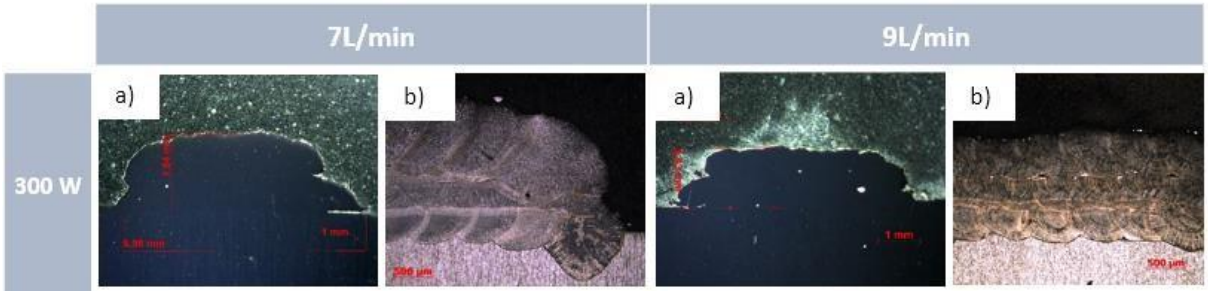
Figura 18- Imagens de estereoscopia das amostras fabricadas com aço 316L na primeia rodada de teste, para potência 300 W e dois substratos distintos(a) e micrografia de cada receita (b).



Fonte: Elaborado pelo autor

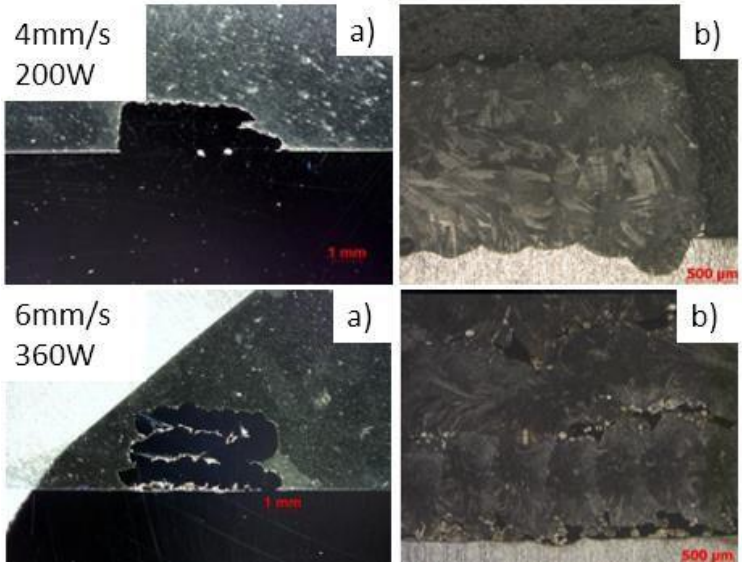
-

Figura 19- Imagens de estereoscopia das amostras fabricadas com aço 316L na ´rimeira rodada de teste para potência e avanço constantes em, respectivamente 300 W e 6 mm/s com variação do *shield gas*(a) e micrografia de cada receita (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Imagens de estereoscopia duas receitas fabricadas com aço 316L em estudos anteriores (a) e micrografia de cada receita (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre as principais questões observadas, tem-se adesão satisfatória da primeira camada para a maioria das peças. Inicialmente, na Figura 18, foi observado um contorno escuro na interface entre cordão e substrato. Este contorno poderia significar adesão insatisfatória relacionada, por exemplo, a impurezas ou oxidação do material. Neste contexto, imagens de aumentos crescentes foram realizadas para uma das amostras, presentes na Figura 21. Ao observá-las, é possível notar que o processo de fusão e adesão ao material ocorreu corretamente. Portanto, o aparecimento do contorno preto nas imagens de menor aumento, pode estar relacionada a ligeira diferença na microestrutura da interface entre cordão e substrato quando comparado com a restante da estrutura depositada.

-

Figura 21- Micrografias com aumentos progressivos e crescentes na região do contorno entre a interface do cordão e o substrato para uma mesma receita com potência 320 W e avanço 6 mm/s.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outrossim, embora as amostras tenham ofertado adesão satisfatória e comprovada, vale notar que as peças de potência 300 W, 280 W e 260W, todas para avanço 6 mm/s, apresentaram desprendimento nos primeiros cordões, ou seja, nas bordas de contato das *features* com o substrato.

Outro apontamento está focado na aparência da microestrutura das peças obtidas (Figura 18) quando relacionadas a estudos anteriores (Figura 20). As amostras recentes apresentam aspecto menos queimado e microestrutura mais fina, sobretudo aquelas de potência 260 W a 300 W. Apenas o primeiro cordão depositado destas peças possui aparência semelhante à de deposições anteriores. Entretanto, em amostras recentes de potências mais elevadas, com valores de 340 W e 350 W, é possível notar que a microestrutura é mais próxima daquelas observadas em peças anteriores, formada por grãos maiores e escuros.

Portanto, esta diferenciação para peças recentes de menor potência pode estar relacionada a quantidade de energia ofertada nos relatórios anteriores para a deposição do material e sua consequente influência na forma de resfriamento da peça e formação de sua microestrutura. Ou seja, quantidades de energia superiores, proporcionam tempo para a formação de grãos maiores, tal como aqueles vistos nas amostras anteriores e nas amostras recentes de maior potência. Entretanto, vale notar que mais de um parâmetro foi variado durante a fabricação das amostras da Figura 18, dessa forma não é possível averiguar qual parâmetro pode ter causado

-
efetivamente aumento de energia mencionado, posto que, a energia está relacionada a, por exemplo, valores de vazão de pó, de gás, velocidade de avanço e potência.

Por fim, em relação a variação do *shield gas*, é possível notar a diminuição da poça de fusão e consequentemente menor adesão ao substrato quando este parâmetro é aumentado de 7 L/min para 9 L/min (Figura 19). Novamente, este fato ocorre em função do resfriamento causado pelo fluxo de gás em cima da peça e do pó sendo depositado. Porém, é válido notar que, embora a poça de fusão tenha sofrido diminuição, ambas as receitas persistem em termos de adesão satisfatória da primeira camada.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que diz respeito as amostras de aço ferramenta H13, nas primeiras rodadas foi observada a existência de espaçamentos e poros por falta de fusão. As análises metalográficas corroboraram para a hipótese de falta de energia observadas na lupa estereoscópica, posto que foram notadas adesão precária da primeira camada com o substrato. Entretanto, o aumento da potência realizado nas rodadas posteriores não melhorou significativamente a densificação entre camadas. Portanto, a existência destes poros não se dá em função da falta de energia, mas provavelmente pela oxidação das camadas durante o processo de fusão. Análises futuram devem considerar o aumento do *Shield gas* a fim de impedir este fenômeno.

Outrossim, nas amostras de aço inox 316L, foi possível observar a relação direta entre o aumento da potência e da energia disponível para fusão, diminuindo defeitos causados por poros e melhorando a adesão da primeira camada com o substrato. Outra relação pertinente diz respeito ao aumento da velocidade de avanço ocasionando a diminuição do volume de pó disponível para fundir, dessa forma a altura das peças torna-se inferior.

A variação da vazão no processo, por sua vez, foi considerada como fator de influência significativa, causando, inclusive, distorções dimensionais nas peças da primeira rodada. Tal fato sinaliza para atenção acentuada durante a variação de parâmetros que alterem direta ou indiretamente a quantidade de pó por seção, como é o caso da velocidade de avanço.

-

Na primeira rodada de testes foram notadas diferenças significativas entre peças fabricadas com os mesmos parâmetros, além da presença exagerada de poros por bolhas de gás. Isto, somado a inconsistências dimensionais quando comparadas as amostras da segunda rodada, gerou a hipótese de ocorrência de problemas na máquina ou equívocos do operador durante a fabricação das peças da primeira leva de testes. No futuro as amostras devem ser produzidas novamente para avaliar a repetibilidade de máquina e averiguar o que causou as diferenças observadas.

Por fim, frente aos resultados apresentados, nota-se que é possível estabelecer relações claras entre a potência, velocidade de avanço e a qualidade da peça para ambos os materiais, quando os demais parâmetros se mantêm constantes. Também é possível montar matrizes de qualidade que podem auxiliar no objetivo do estudo de otimizar o processo de escolha dos parâmetros, pois elas permitem realizar correlações entre diferentes variações paramétricas além de fornecerem uma avaliação visual e dimensional do grau de influência de cada valor no processo. Portanto, trabalhos futuros devem se concentrar em variar outros parâmetros para expandir essas matrizes que servirão como base para facilita de estratégias para a produção de uma peça pelo operador da máquina.

8 REFERÊNCIAS

[1] Michael A. Melia Hai-Duy A. Nguyen Jeffrey M. Rodelas Eric J. Schindelholz, Corrosion properties of 304L stainless steel made by directed energy deposition additive manufacturing, **Corrosion Science**, 2019, volume 152, p.20-30.

[2] Caiazzo, F., Alfieri, V., Argenio, P., e Sergi, Additive manufacturing by means of laseraided directed metal deposition of 2024 aluminium powder: Investigation and optimization**, Advances in Mecanical Engineering**, ago. 2017

[3] JOSEPH M.FLYNN; ALBORZSHOKRANI; STEPHENT.NEWMAN; VIMALDHOKIAN, Hybrid additiveandsubtractivemachinetools – Research and industrialdevelopments, **International Journal of Machine Tools & Manufacture,** 2016, p. 79-101.

[4] SHIM, Do-Sik; BAEK, Gyeong-Yun; SEO, Jin-Seon; SHIN, Gwang-Yong; KIM, Kee-Poong; LEE, Ki-Yong. Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process, **Optics & Laser Technology**, 2016, Volume 86, p.69-78.

-

[5] KOIKE, Ryo; ASHIDA, Ryo; YAMAZAKI, Keiichi; KAKINUMA, Yasuhiro; AOYAMA, Tojiro; ODA, Yohei; KURIYA, Tatsuhiko; FUJISHIMA, Makoto. Graphical evaluation method for void distribution in direct energy deposition, **Procedia Manufacturing**, 2016, Volume 6, p. 105-112.

[6] FUJISHIMA, Makoto; ODA, Yohei; ASHIDA, Ryo; TAKEZAWA, Kotaro; KONDO, Masaki. Study on factors for pores and cladding shape in the deposition processes of Inconel 625 by the directed energy deposition (DED) method**, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 2017, Volume 19, p. 200-204.

[7] KONO, Daisuke; MARUHASHI, Akihiro; YAMAJI, Iwao; ODA, Yohei; MORI, MASAHIKO. **E**ffects of cladding path on workpiece geometry and impact toughness in Directed Energy Deposition of 316L stainless steel, **CIRP Annals**, 2018, Volume 67, Issue 1, p. 233-236.

[8] ROMI DCM 620-5X HYBR D. Romi. Disponível em: https://www.romi.com/wpcontent/uploads/2017/10/fol_romi_dcm_hybrid_po_aa_052017_baixa.pdf. Acesso em: Agosto de 2020.

[9] BOISSELIER, Didier; SANKARÉ, Simon. Influence of powder characteristics in laser direct metal deposition of SS316L for metallic parts manufacturing, **Physics Procedia**, 2012, Volume 39.

[10] LIN CAO; SUIYUAN CHEN; MINGWEI WEI; QIAN GUO; JING LIANG; CHANGSHENG LIU; MEI WANG, Effect of laser energy density on defects behavior of direct laser depositing 24CrNiMo alloy steel, **Optics & Laser Technology**,2019,p.541553.

[11] Pinheiro, Chloé. Tratamentos térmicos podem melhorar as propriedades de aços feitos por impressão 3D. Agência FAPESP, 2019. Disponível em: http://agencia.fapesp.br/tratamentos-termicos-podem-melhorar-as-propriedades-deacosfeitos-por-impressao-3d/32185/

[12] B. Zheng, J.C. Haley, N. Yang, J. Yee, K.W. Terrassa, Y. Zhou, E.J. Lavernia, J.M. Schoenung, On the evolution of microstructure and defect control in 316L SS components fabricated via directed energy deposition, **Materials Science and Engineering: A**, Volume 764, 2019.

[13] Abdollah Saboori, Gabriele Piscopo, Manuel Lai, Alessandro Salmi, Sara Biamino, An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by Directed Energy Deposition, **Materials Science and Engineering: A**, Volume 780, 2020,

-

[14] Wei Li, Masakazu Soshi, Modeling analysis of grain morphologies in Directed energy deposition (DED) coating with different laser scanning patterns, **Materials Letters**, Volume 251, 2019,p. 8-12.

[15] Abdollah Saboori, Alberta Aversa, Federico Bosio, Emilio Bassini, Erica Librera, Michele De Chirico, Sara Biamino, Daniele Ugues, Paolo Fino, Mariangela Lombardi, An investigation on the effect of powder recycling on the microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by Directed Energy Deposition, **Materials Science and Engineering: A**, Volume 766, 2019.

[16] Wu Jiazhu, Tongwei Liu, Huanyu Chen, Fazhi Li, Haiying Wei, Yi Zhang, Simulation of laser attenuation and heat transport during direct metal deposition considering beam profile**, Journal of Materials Processing Technology**, Volume 270,2019, p. 92-105.

[17] Hua Tan, Weixun Shang, Fengying Zhang, Adam T. Clare, Xin Lin, Jing Chen, Weidong Huang, Process mechanisms based on powder flow spatial distribution in direct metal deposition, **Journal of Materials Processing Technology**, 2018,Volume 254, p.361-372.

[18] AMINE, Tarak; NEWKIRK, Joseph N.; LIOU, Frank. An investigation of the effect of direct metal deposition parameters on the characteristics of the deposited layers, **Case Studies in Thermal Engineering**, 2014, Volume 3, p. 21-34.

[19] Daniel Eisenbarth, Paulo Matheus Borges Esteves, Florian Wirth, Konrad Wegener, Spatial powder flow measurement and efficiency prediction for laser direct metal deposition, **Surface and Coatings Technology**, Volume 362, 2019,p. 397-408.

[20] MIAGAVA JOICE; HENRIQUES ANA, Relatório final: Caracterização de materiais para otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada (DED), 2019.

[21] GALDINO RAPHAEL; HENRIQUES ANA, Relatório intermediário: Caracterização de materiais para otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada (DED), 2020.

[22] GALDINO RAPHAEL;MIAGAVA JOICE; HENRIQUES ANA, Relatório final: Caracterização de materiais para otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada (DED), 2020.

[23] DU, Wei; BAI, Qian; ZHANG, Bi. A Novel Method for Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic Parts, **Procedia Manufacturing**, 2016, Volume 5, p. 10181030.

[24] CARROLL, Beth E. ; OTIS, Richard A. ; BORGONIA, John Paul ; SUH, Jong Ook ; DILLON, R. Peter ; SHAPIRO, Andrew A. ; HOFMANN, Douglas C. ; LIU, Zi-kui ; BEESE, Allison Michelle**.** Functionally graded material of 304L stainless steel and

-
inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling**, Acta Materialia**, 2016, Volume 108, p. 46-54.

[25] CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, v. 8° Edição.

[26] Hussam El Cheikh, Bruno Courant, Samuel Branchu, Jean-Yves Hascoët, Ronald Guillén, Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process, **Optics and Lasers in Engineering**, 2012, Volume 50,p. 413-422,