

Inspira
Engenharia Mecatrônica

Ana Beatriz Bertolucci Henriques

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

São Paulo

2020

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

São Paulo

2020

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

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 desta manufatura, 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 avaliar ou refutar estratégias para mensurar a qualidade de peças fabricadas em aço 316L na manufatura aditiva por energia direcionada (DED). Neste ínterim, peças foram fabricadas e posteriormente analisadas no que diz respeito a sua microestrutura e dimensões finais da amostra. No geral, as amostras demonstraram comportamentos dimensionais semelhantes, embora tenham sido observadas diferenças relacionadas a quantidade de pó depositado em peças fabricadas em diferentes períodos. Os resultados também sinalizaram para uma participação significativa da vazão de pó no que diz respeito a qualidade da peça. Portanto, tal relação deve ser considerada em estudos posteriores.

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

Abstract

The additive manufacturing, mainly the metals and polymer ones, has the potencial to increase the alternatives of the industry in the regards of simplifying and dynamizing the pieces making process. This is possible due 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 to evaluate or refute the strategies to measure the quality of the pieces made of steel 316L in the additive manufacturing using directed energy. In this study, pieces were made and later their final sample microstructures and dimensions were analyzed. In general, the samples had similar dimensional behavior, although some differences were noticed in the amount of powder presented in some pieces made in different periods of time. The results showed a significant role of the amount of powder in the matter of the pieces quality. Therefore this relation needs to be considered in future research.

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

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3	JUSTIFICATIVA	5
4	OBJETIVO.....	6
5	PROCEDIMENTOS	7
5.1	DEPOSIÇÃO COM ENERGIA DIRECIONADA (DED).....	7
5.2	DENSIFICAÇÃO E ANÁLISE DE DIMENSÕES	10
5.3	METALOGRAFIA.....	10
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
6.1	CORDÕES	11
6.2	DEPOSIÇÃO MULTICAMADA E DENSIFICAÇÃO	16
6.3	METALOGRAFIA.....	24
7	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	30
8	REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

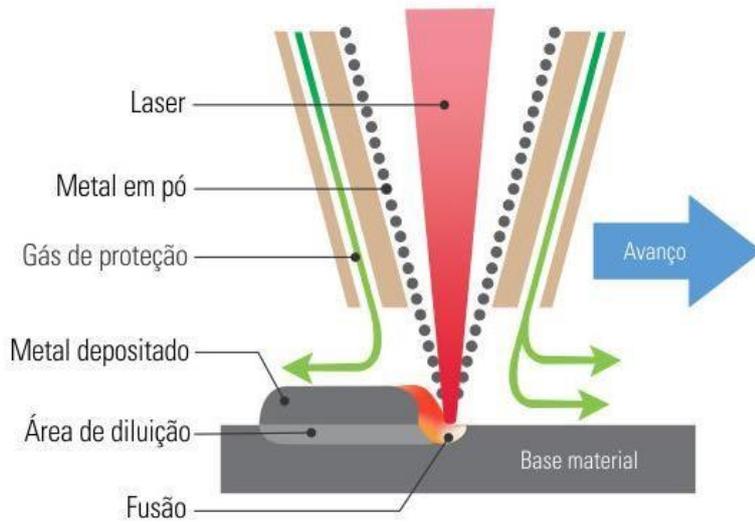
A manufatura aditiva se trata de um processo de fabricação que possibilita a confecção de peças com geometrias complexas [1]. Este processo também é capaz de realizar a recuperação, reciclagem ou reutilização de dispositivos de alto valor agregado que sofreram desgastes, por exemplo, em função da temperatura 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 "*Powder Bed*" consiste em uma mesa com o material em pó, este é esquentado no contorno desejado, camada por camada, formando a peça idealizada [3]. Outro exemplo é chamado de "*cold spraying*", 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, o que 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: [25]

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 [11] 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, conseqüentemente, 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 [15,18] 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.

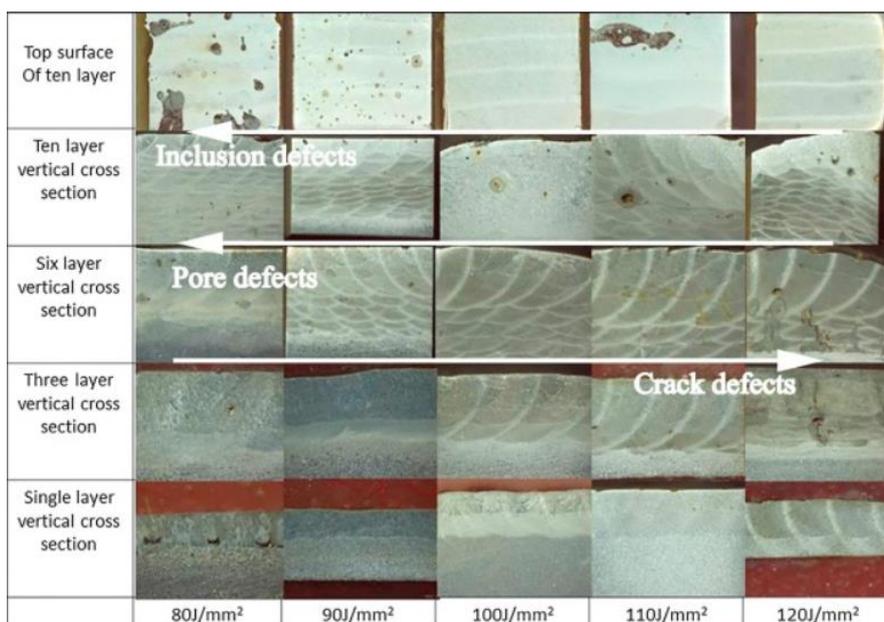
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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 [19]. 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.

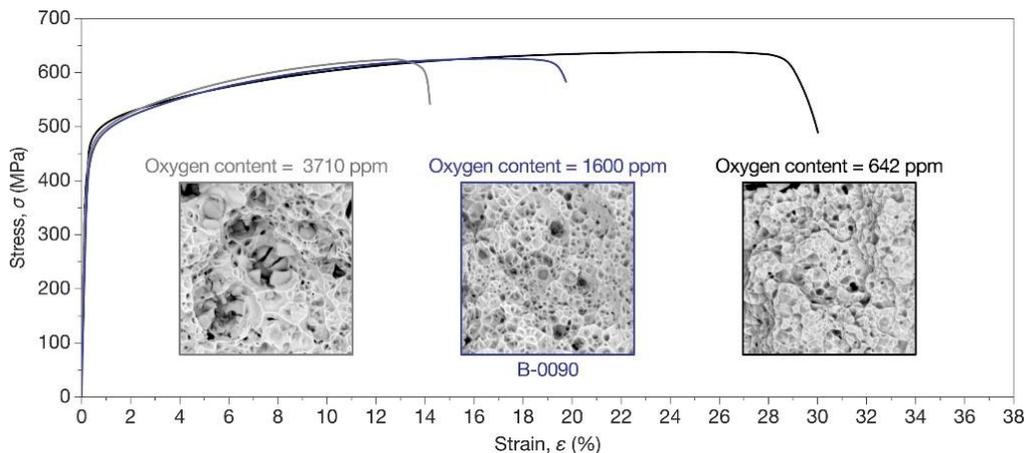


Fonte: [15]

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 [15,19,20]. Estratégias para evitar tais defeitos indesejados, estão relacionadas ao ajuste do espaçamento entre cordões ou camadas, ao aumento da densidade de energia [6,19,20], ao ajuste do foco do laser [19] 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 de inclusões também prejudicam a tenacidade do material, tornando-o mais propenso a fratura [20].

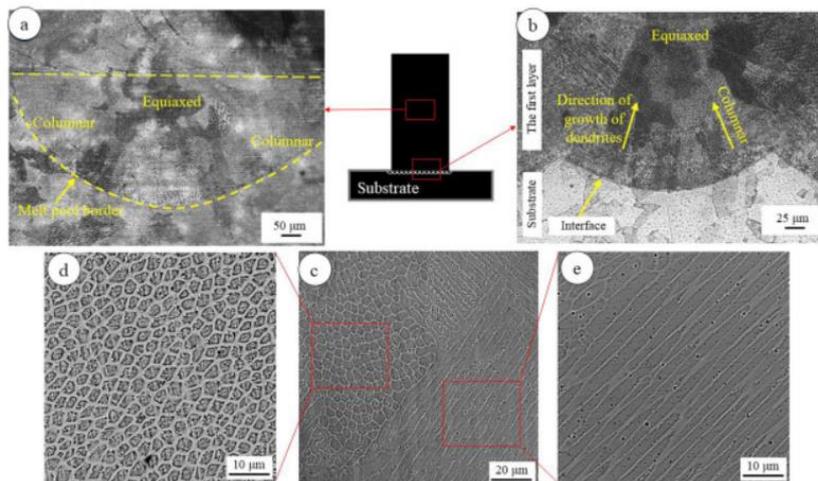
Figura 3 - Curvas de tensão-deformação de três amostras diferentes de 316L com vários conteúdos de oxigênio.



Fonte: [20]

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 [19]. Outras análises, para o mesmo material, afirmam a existência de formação de dendritos colunares nas bordas das peças, os quais seguem na direção do centro da amostra (Figura 4). Porém, nas áreas centrais, são mais prováveis dendritos equiaxiais, em função das menores taxas de transferência de calor na região. [15,20,23].

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 [21]

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 [18]. Experimentos com tratamento térmico pós fabricação, realizados com peças de 18Ni300, sinalizam para a promoção das propriedades de tração do material, enquanto, por outro lado, ocorreu ligeiro decaimento de valores relacionados a deformação elástica [15].

Outrossim, uma questão também relacionada a propriedades mecânicas, refere-se a maior resistência observada nas as peças, de aço 316L, produzidas por DED, quando estas são comparadas as peças fabricadas por processos convencionais [21]. 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 [23,24], além de prever as dimensões finais da produção de uma peça [8] ou mesurar a temperatura de qualquer local durante o processo de deposição [9].

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 [22], além apontamentos sobre o perfil do feixe, alinhamento do laser e modelo do bico [24].

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 a interação do laser com pó e, portanto, devem ser considerados para garantir superfícies de boa qualidade e peças sem defeitos entre camadas [11].

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. Conseqüentemente, não existe preocupação com a otimização do processo, no que diz respeito a facilitar e acelerar a fabricação de peças com qualidade satisfatória.

Frente a esta lacuna, o presente relatório se propõe a elaborar e avaliar uma estratégia para otimizar o processo de produção de peças de aço inox 316L por DED. Ou seja, é desejado eliminar a etapa de testes, determinando os valores mais adequados para os parâmetros do processo, inicialmente, utilizando valores da equação de energia incidida.

4 OBJETIVO

O presente, concentra-se em validar ou refutar estratégias para otimizar a deposição de determinado material no processo de manufatura aditiva por DED. Ou seja, é desejado fornecer um caminho lógico e simplificado para deliberar os melhores parâmetros na fabricação de uma peça, diminuindo a necessidade de testes empíricos com a máquina e dinamizando o processo, sobretudo no quesito tempo. Neste estudo e nos relatórios anteriores a estratégia utilizada para otimização do processo concentrou-se em um parâmetro de energia. Tal parâmetro, é calculado mediante uma relação entre potência do laser [8], velocidade de avanço do cabeçote [8,9] e spot size do laser.

Vale notar que, além dos parâmetros mencionados, no estudo anterior [10] também foi analisado a influência da granulometria, isto é, o tamanho da partícula de pó depositado, na microestrutura da peça. Resumidamente, foi concluído que partículas menores possuem maior facilidade em fundir, devido a sua menor área de aquecimento. Porém, no material de menor granulometria, foram observados episódios recorrentes de oxidação e poros com regiões não fundidas.

Com isso, de modo a garantir as propriedades de interesse nas peças produzidas por DED, 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 de cordões individuais (sem material adjacente depositado) e 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. Uma vez que o material do substrato e do pó depositado é o mesmo, a comparação visual dessas duas regiões pode indicar o desempenho do material depositado. Além disso, a metalografia também auxiliou na análise dimensional da poça de fusão dos cordões depositados, possibilitando o estudo desses valores frente a variação de determinados parâmetros.

5 PROCEDIMENTOS

5.1 DEPOSIÇÃO COM ENERGIA DIRECIONADA (DED)

O processo de manufatura aditiva por DED foi realizado com a máquina-ferramenta

ROMI DCM 620-5x Hybrid. Essa máquina híbrida 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 material em pó do aço inoxidável 316 L sobre substratos de mesmo material. O pó utilizado possui granulometria 44 a 106 μm .

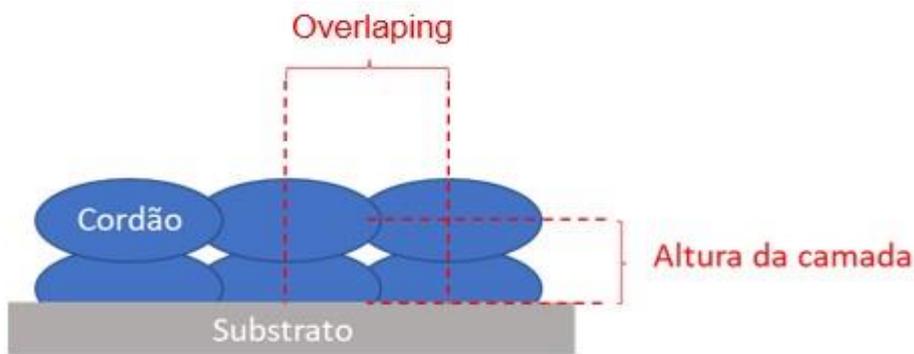
Foram utilizadas combinações diferentes de potência do laser e velocidade de avanço do cabeçote, as quais são denominadas receitas. Esses dois fatores, junto ao *spot size* (diâmetro do feixe), determinam a energia incidida sobre uma unidade de área (J/mm^2 – equação 1). O *spot size* foi mantido constante e é definido pela distância focal do laser. Vale notar que foram realizadas 3 rodadas de teste, em períodos distintos, nas quais foram produzidas peças mediante análise do resultado da campanha anterior. Tais campanhas são numeradas de 1 a 3.

$$Energia\ Incidida = \frac{Pot\ência\ do\ Laser}{(Velocidade\ de\ Avanço \cdot Spot\ size)} \quad (1)$$

Foram fabricadas peças com duas geometrias diferentes para determinadas receitas (Figura 6). A primeira geometria, trata-se da deposição de quatro cordões individuais. Porém, vale notar que a produção de cordões não foi realizada nas amostras mais recentes, isto é, pertencentes a rodada 3.

Em relação a segunda geometria, trata-se de *features* com camadas sobrepostas de maneira cruzada. Essa última geometria, depende da determinação de outros dois parâmetros, o *overlapping* e a altura da camada. O *overlapping* pode ser definido como a distância entre os centros de dois cordões adjacentes depositados (Figura 5).

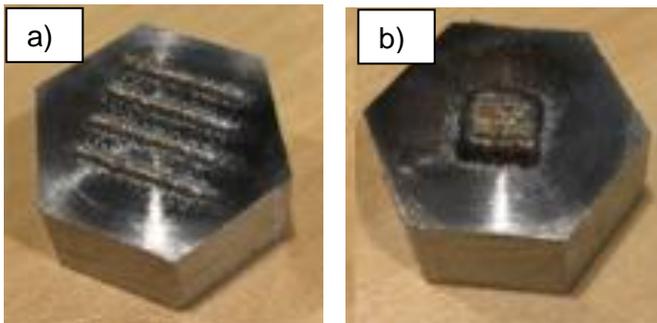
Figura 5 - Imagem ilustrativa dos parâmetros de *overlapping* e altura da camada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste relatório, também foram adicionadas features mistas, ou seja, de camadas construídas com diferentes energias, logo, diferentes receitas. Esta estratégia foi montada em função da falta de adesão com o substrato, fato observado nas amostras fabricadas, para a maioria das peças fabricadas na rodada 2. Dessa forma, para garantir a adesão da primeira camada, utilizou-se a maior energia analisada, isto é, 60J/mm². Nas demais camadas, a energia aplicada foi aquela que apresentou os melhores resultados de densificação entre camadas para as rodadas 1[13] e 2[10], isto é, a energia de 50J/mm².

Figura 6 - Tipos de deposição. a) cordões e b) feature.



Fonte: Elaborado pelo autor

Vale notar que ocorreu uma mudança quanto ao valor do parâmetro denominado “shield gás”, responsável por criar a atmosfera de proteção durante o processo. As amostras das campanhas 2 e 3 foram fabricadas com vazão de 7L/min e, as amostras da rodada 1, com 5L/min. A intenção era de melhorar a qualidade da peça e impedir oxidação.

Os parâmetros utilizados para cada receita, bem como a nomenclatura utilizada, encontram-se nas **Tabelas 1 e 2**.

Tabela 1 - Nomenclatura e parâmetros utilizados nos cordões e features fabricados nas rodadas de teste 1 e 2.

ID	Potência do laser (W)	Velocidade de avanço (mm/s)	Overlapping (mm)	Altura da camada (mm)	Energia incidida (J/mm ²)
40.200.5	200	5,00	0,50	0,40	40
50.250.5	250	5,00	0,50	0,40	50
50.300.6	300	6,25	0,50	0,40	50
60.300.5	300	5,00	0,50	0,40	60
40.250.6	250	6,25	0,50	0,40	40
60.250.4	250	4,16	0,50	0,40	60

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2. Nomenclatura e parâmetros utilizados nas features fabricados na rodada de teste 3.

ID	Potência do laser (W)	Velocidade de avanço (mm/s)	Overlapping (mm)	Altura da camada (mm)	Energia incidida (J/mm ²)
50.200.4	200	4,00	0,50	0,40	40
50.350.7	350	7,00	0,50	0,40	50
60.210.3,5	210	3,50	0,50	0,40	50
60.360.6	360	6,00	0,50	0,40	60
60.360.6 / 50.350.7*	250	6,25	0,50	0,40	40
60.210.3,5 / 50.200.4*	250	4,16	0,50	0,40	60

*Features mistas.

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 DENSIFICAÇÃO E ANÁLISE DE DIMENSÕES

A densificação foi analisada por imagens obtidas em lupa estereoscópica (Zeiss Stemi 508). Para isso, as amostras de *feature* e cordão 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 analisar as dimensões da poça de fusão dos cordões, relacionando seus valores a variação de determinados parâmetros. Além disso, também era desejado observar e comparar a microestrutura entre o material do substrato e o material depositado, tanto no caso dos cordões individuais quanto no caso das *features*.

Para a observação das amostras em microscópio óptico (Zeiss Axio Vert A1), as peças de cordão e *feature* foram seccionadas, embutidas em baquelite, lixadas e polidas. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao ataque eletrolítico em

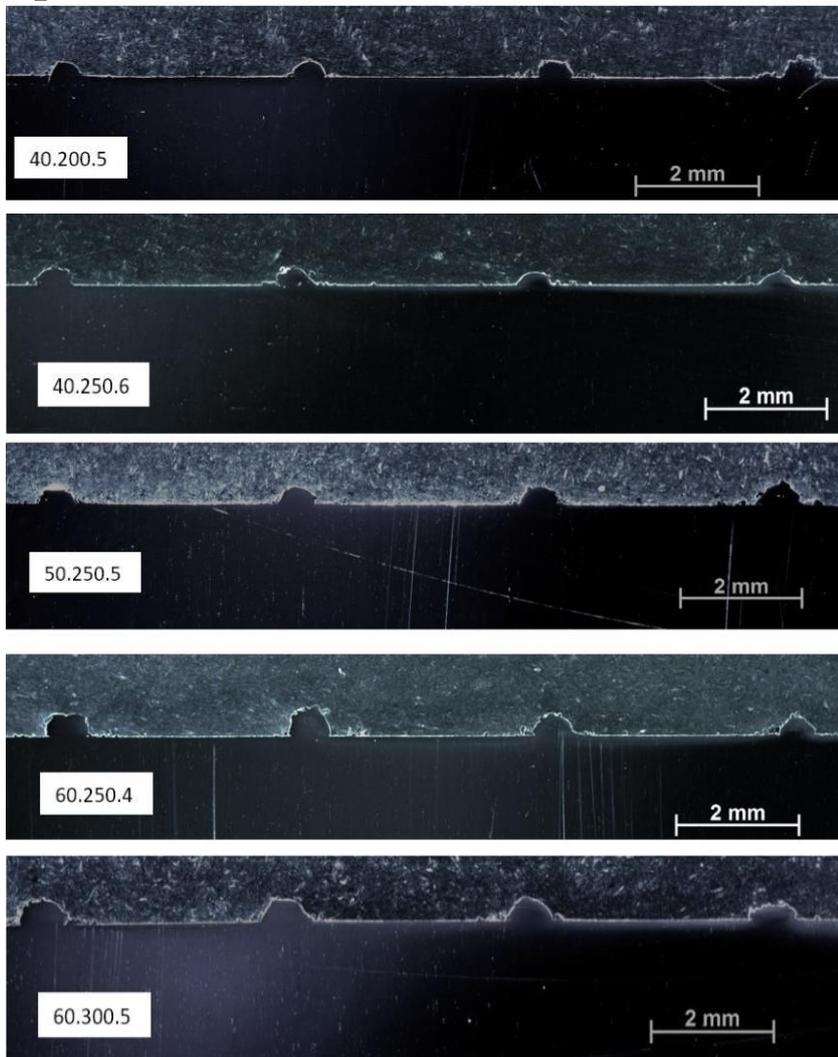
solução com concentração de 10% de ácido oxálico, aplicando corrente de aproximadamente 2 A (1 A/cm²), durante um período de 1,5 minutos por amostra. Assim, foi possível atacar os contornos de grão, revelando a microestrutura.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CORDÕES

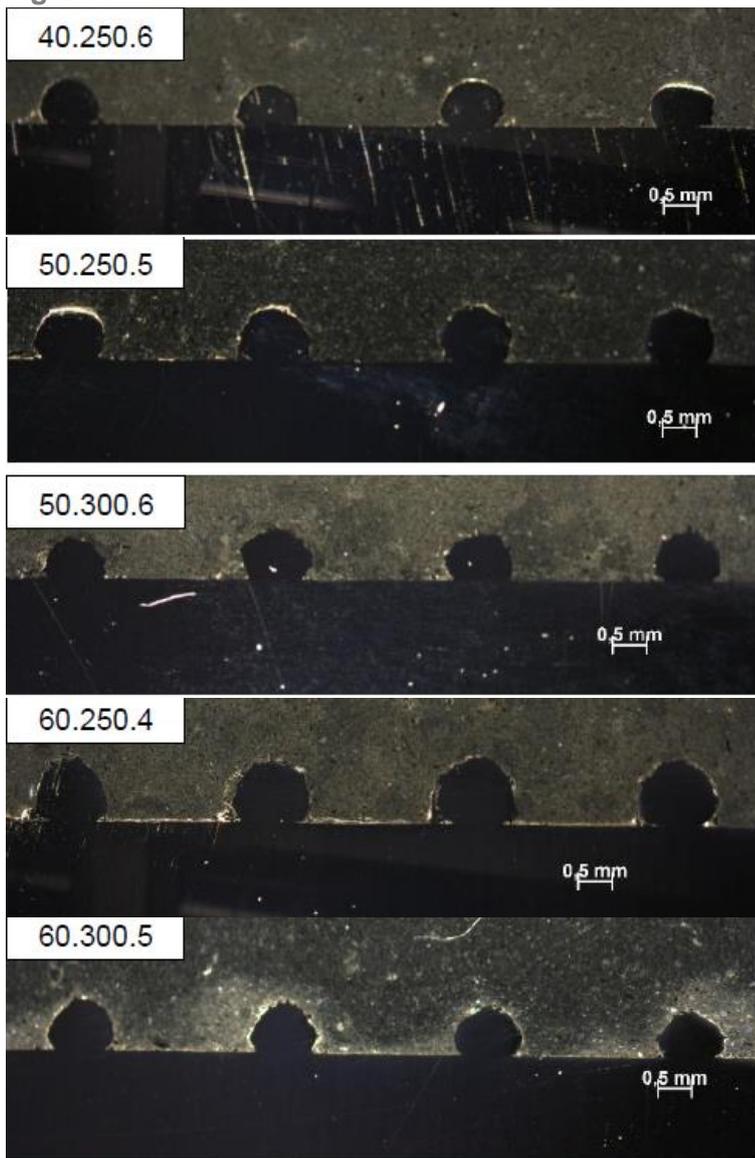
As imagens obtidas por estereoscopia são apresentadas nas Figura 7 e Figura 8. A partir dessas imagens, a altura e a largura dos cordões depositados foram medidas. Vale notar que, os cordões comparados neste estudo, foram fabricados apenas para as amostras das rodadas de teste 1 e 2.

Figura 7- Vista lateral dos cordões nas diferentes amostras fabricadas. Rodada de teste 1.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 8 - Vista lateral dos cordões nas diferentes amostras fabricadas. Rodada de teste 2.



Fonte: Elaborado pelo autor

Frente ao exposto, com o auxílio das figuras 7 e 8, deve ser observado que, o formato dos cordões das amostras na segunda rodada(Figura 8) demonstrou ser mais arredondado quando comparado ao formato das amostras obtidas em análises passadas (primeira rodada), que assemelhavam-se a metade de um círculo (Figura 7). O estudo [14], afirma que quando os centros dos cordões se encontram significativamente acima do substrato, como é o caso das amostras testadas na rodada 2, isto significa que a velocidade não é grande o suficiente para evitar acúmulo de material depositado.

Não obstante, os valores obtidos nas figuras 10 a 13 também ressaltam esta diferença geométrica e de quantidade de pó entre cordões fabricados em ocasiões

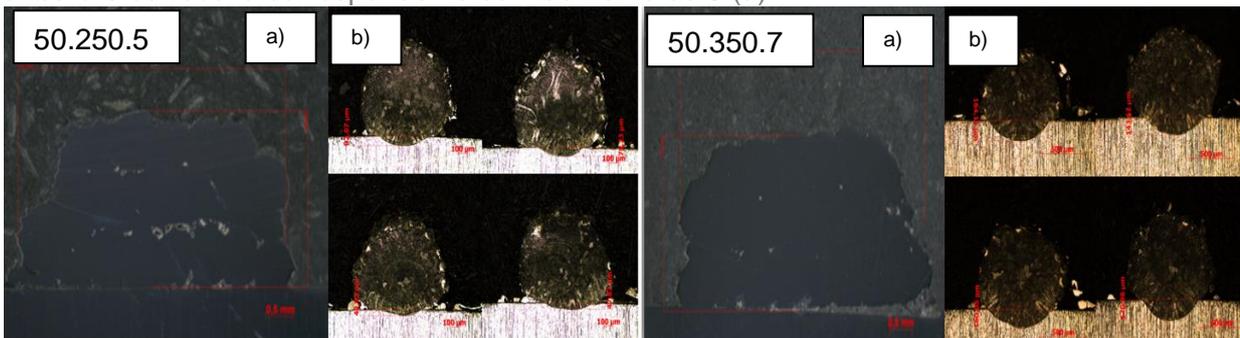
distintas. É possível notar que os valores de altura e largura são significativamente superiores nas peças fabricadas na segunda rodada.

Uma possibilidade para esta ocorrência se encontra em mudanças mecânicas sofridas pela máquina durante um período de manutenção, no qual ocorreu a substituição de peças danificadas. Tais peças danificadas, influenciaram negativamente no fluxo de pó. Deste modo, as amostras da primeira rodada, realizadas antes da manutenção, podem ter sido afetadas, sendo construídas com valores de vazão inferiores aqueles presentes nas amostras da segunda rodada.

Frente a esta diferença, é possível formar a hipótese de que sejam também observadas mudanças na densificação das camadas das features, em decorrência da forma do cordão depositado que, por sua vez, pode interferir na maneira como cordões adjacentes se fundem, assim como afirma o estudo [15]. Por exemplo, caso os cordões tenham seu centro significativamente distantes do substrato, as bordas de contato com cordões adjacentes estarão mais distantes do centro da poça de fusão. Por consequência, menor será a energia na região das bordas e mais rápido será seu resfriamento, ocasionando poros por fusão inadequada nestas regiões [14].

Um exemplo deste fato, encontra-se na comparação de duas features, com mesma energia de $50\text{J}/\text{mm}^2$, e seus respectivos cordões (Figura 9). Nas figuras, deve-se notar que, a feature 50.250.5, cujos cordões apresentam maior poça de fusão, logo centro mais próximo do substrato, possui menos porosidades. Além disso, é possível observar a questão da importância da vazão no processo, posto que, notoriamente, o aumento da distância entre o centro do cordão e o substrato da amostra 50.250.5 para a amostra 50.350.7, ocorreu devido a diminuição do avanço, o qual ocasionou o aumento do volume de pó fundido por seção.

Figura 9 - Comparação da geometria dos cordões individuais, com aumento de 100x (b) com a feature da receita correspondente com aumento de 8 (a).

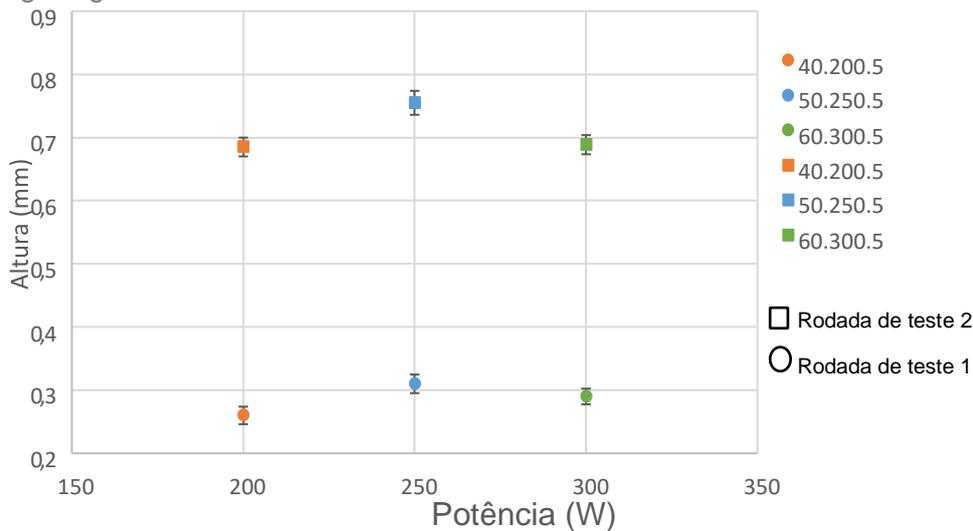


Fonte: Elaborado pelo autor.

No que diz respeito a tendência nos valores das dimensões dos cordões de ambas as ocasiões de fabricação, observando a Figura 11, mesmo com a diferença significativa entre os valores, é possível notar uma proporcionalidade entre potência do laser e largura do cordão. A mesma proporcionalidade se pode observar para a altura, excetuando os pontos que representam uma energia incidida de 60 J/mm² (Figura 10).

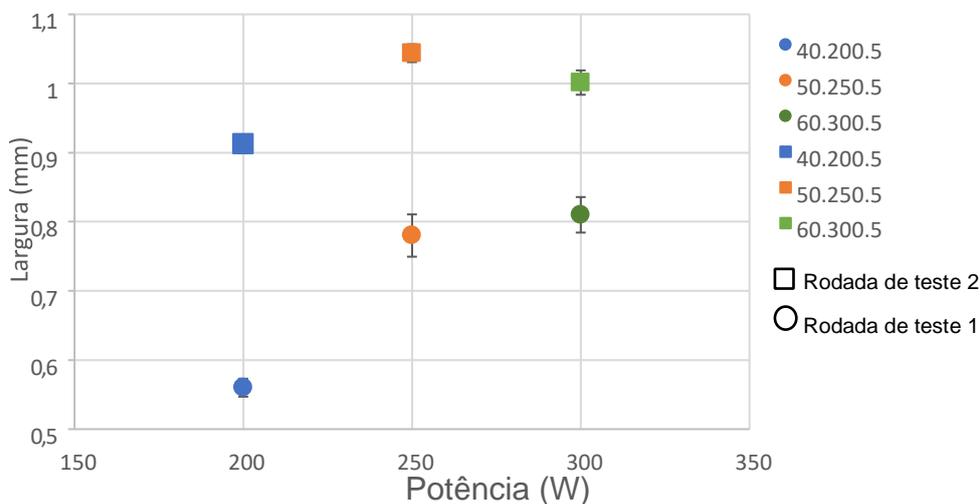
Ademais, observando a Figura 11, é possível levantar a hipótese de que a largura tende a um valor fixo a partir de determinada potência. Porém, maior variedade de dados são necessários para consolidar esta afirmação.

Figura 10 - Altura do cordão por potência sob mesmo avanço. Cores iguais significam energias iguais e símbolos semelhantes sinalizam amostras fabricadas na mesma ocasião.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Largura do cordão por potência sob mesmo avanço. Cores iguais significam energias iguais e símbolos semelhantes sinalizam amostras fabricadas na mesma ocasião.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Valores médios e desvios padrão das dimensões dos cordões de deposição para os valores de energia estudados em amostras da rodada de teste 2.

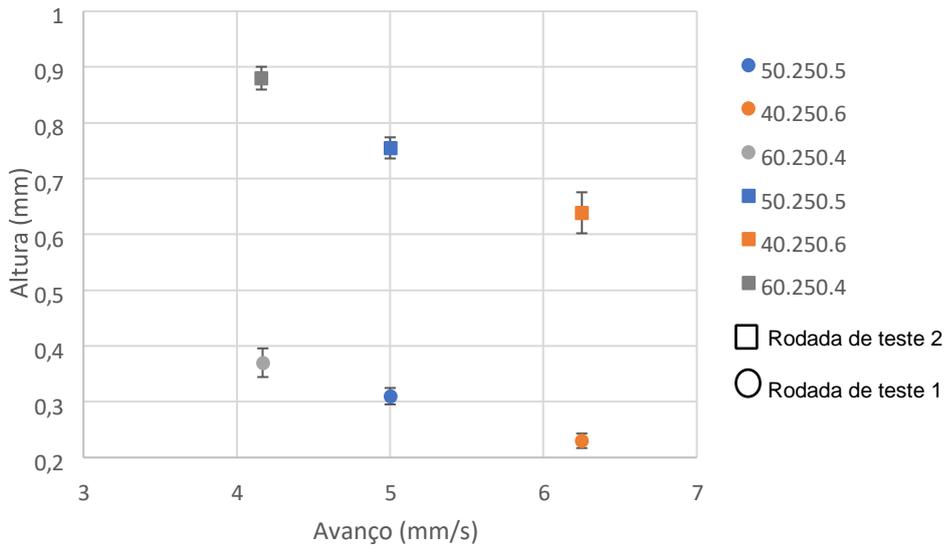
ID	Altura média (mm)	Desvio padrão	Erro da altura	Largura média (mm)	Desvio padrão	Erro da largura
40.200.5	0,65	0,13	0,04	0,93	0,03	0,01
50.250.5	0,76	0,07	0,02	1,04	0,04	0,01
60.300.5	0,81	0,19	0,05	0,85	0,15	0,04
40.250.6	0,64	0,05	0,01	0,92	0,06	0,02
60.250.4	0,88	0,07	0,02	1,12	0,07	0,02
50.300.6	0,70	0,10	0,03	1,00	0,08	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 12 e 13 permitem correlacionar a velocidade de avanço com a largura e altura dos cordões fabricados com o pó de 44 a 106 μm sob mesma potência (250 W). Novamente, existe a comparação entre amostras de períodos distintos. Era esperado que o aumento do avanço proporcionasse a diminuição da quantidade de pó depositada, bem como quantidade de energia por seção, em cada faixa do cordão, ocasionando a diminuição de suas dimensões.

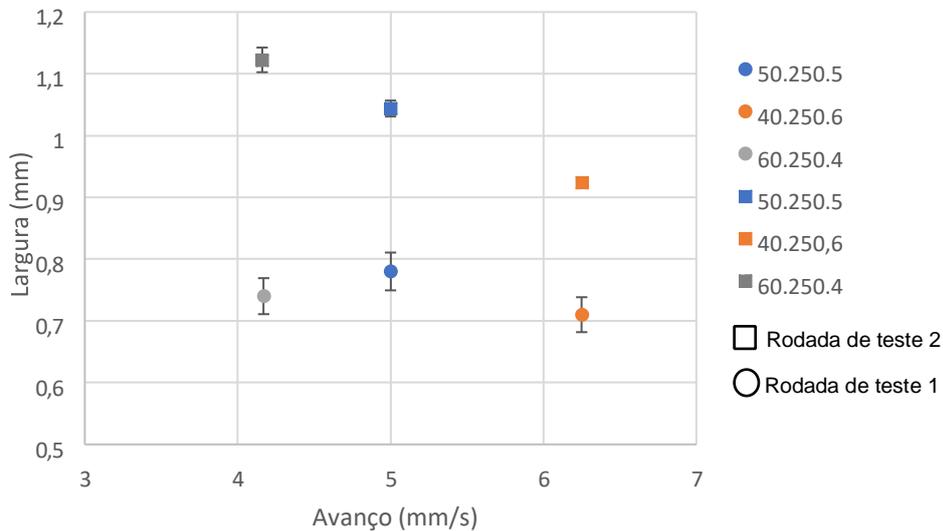
Assim como esperado, em ambas as ocasiões, conforme a velocidade de avanço é aumentada, a altura diminui significativamente (Figura 12). Para a largura, este efeito não foi significativo nas amostras anteriores, porém, nas peças da segunda rodada, este parâmetro diminui juntamente com o aumento do avanço (Figura 13), com uma taxa semelhante à da altura. Este fato também é relatado no estudo [8], no qual a velocidade de avanço aparenta, experimentalmente, ter influência mais marcante na altura do que na largura.

Figura 12 - Altura do cordão pelo avanço sob mesma potência (250 W). Símbolos semelhantes sinalizam amostras fabricadas na mesma ocasião.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Largura do cordão pelo avanço sob mesma potência (250 W). Símbolos semelhantes sinalizam amostras fabricadas na mesma ocasião.



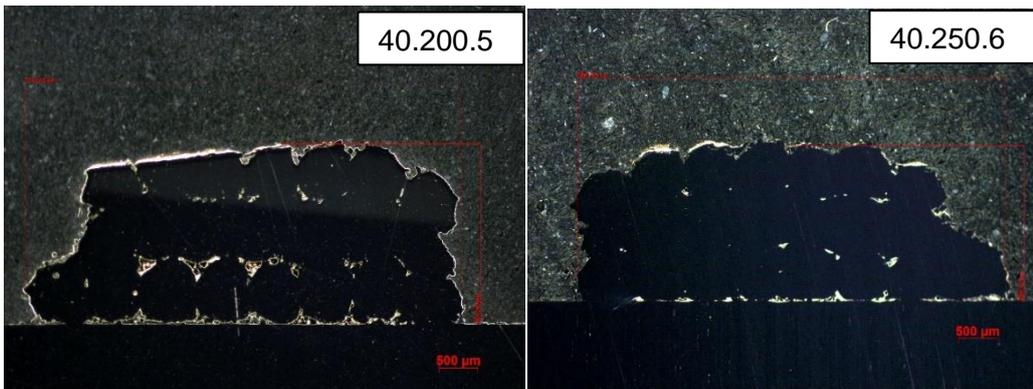
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 DEPOSIÇÃO MULTICAMADA E DENSIFICAÇÃO

A densificação bem como a variação da altura das camadas depositadas foram analisadas nas amostras *features* (peças). Foram fabricadas, em ambas as ocasiões, amostras *features* com 3 camadas e dimensão 5x5 mm. Os resultados das dimensões relacionadas ao conjunto de parâmetros, com seus valores médios para altura e largura, encontram-se nas Tabelas 4 a 6.

Vale notar que, na rodada de teste 2, as amostras 40.200.5 e 40.250.6 apresentaram baixa densificação, posto que, observam-se espaços vazios entre as camadas adjacentes que formam a peça (Figura 14), significando que não ocorreu adesão satisfatória. É possível reafirmar que a energia obtida no processo não é suficiente para proporcionar adesão satisfatória entre camadas, mediante a fusão do pó metálico [10].

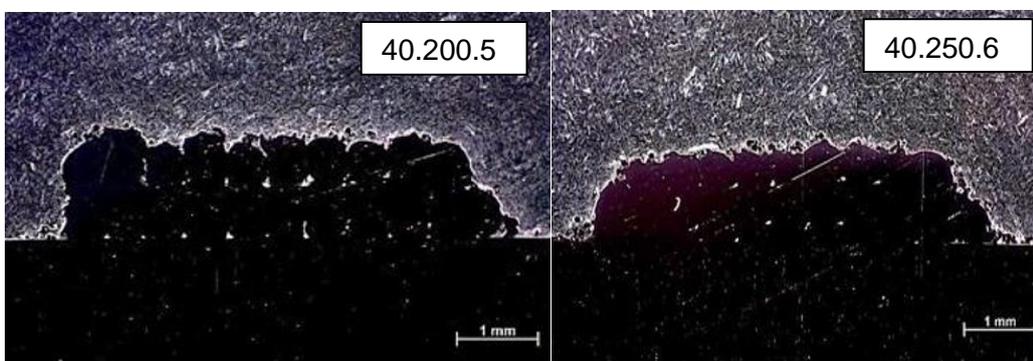
Figura 14 - Estereoscopia das amostras de energia igual a $40\text{J}/\text{mm}^2$ da rodada de teste 2, com aumento de 8x(a). Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na rodada de teste 1, o mesmo fato foi observado (Figura 15). Conseqüentemente, foi decidido que features com energia de $40\text{J}/\text{mm}^2$ não seriam fabricadas em amostras posteriores, incluindo as peças referentes terceira rodada.

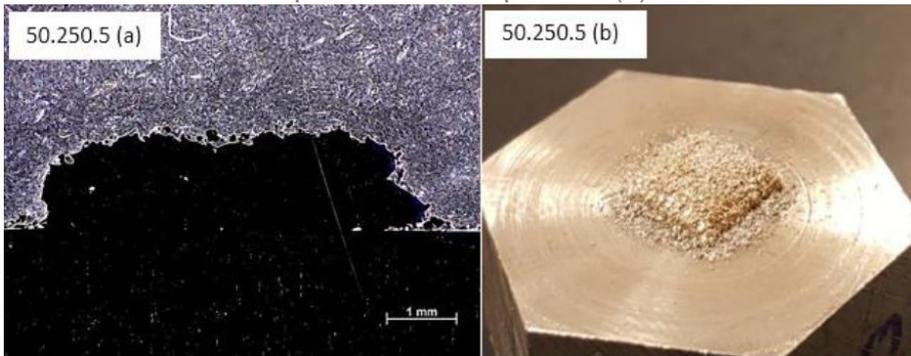
Figura 15 - Estereoscopia das amostras de energia igual a $40\text{J}/\text{mm}^2$ da rodada de teste 1, com aumento de 8x(a). Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em análises feitas na primeira rodada, acreditava-se que a energia de $50\text{J}/\text{mm}^2$ proporcionaria a melhor densificação entre camadas e adesão ao substrato satisfatória como demonstrado na Figura 16. Dessa forma, nas amostras das rodadas 2 e 3, foram fabricadas diferentes receitas para esta energia em questão (Figuras 17 e 18). Porém, os resultados demonstraram qualidade inferior ao esperado.

Figura 16 - Amostra de energia igual a 50J/mm² da rodada de teste 1, com aumento de 8x(a). Assim como a sua respectiva visão superficial (b).



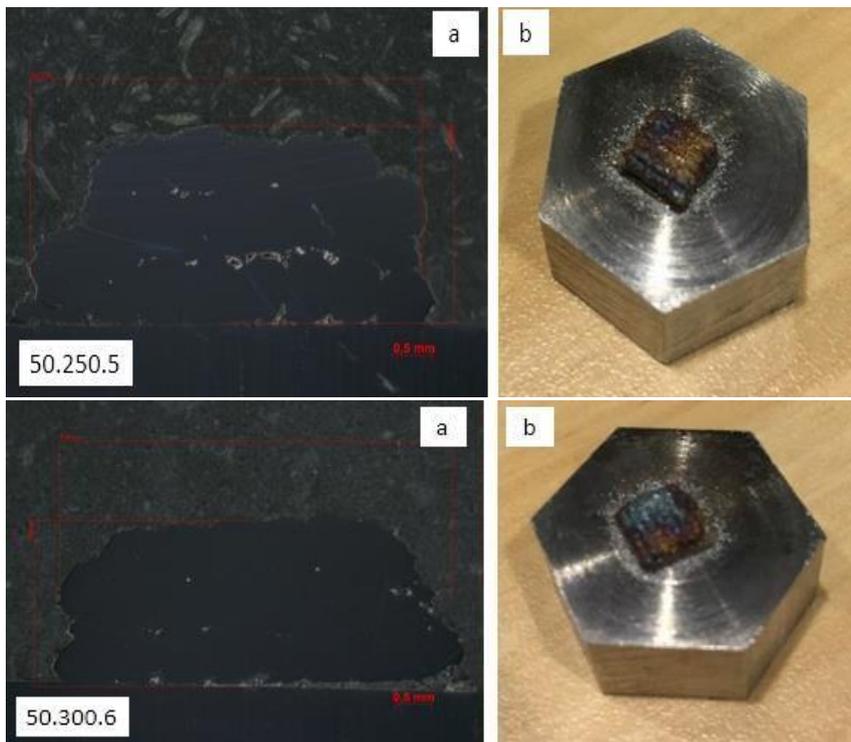
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na segunda rodada, sobretudo para a amostra 50.250.5 (Figura 17), é notória a quantidade de espaçamentos entre as camadas. Tais espaçamentos denotam uma adesão inadequada no momento da deposição. A mesma afirmação pode ser feita para a amostra 50.200.4, fabricada na rodada 3(Figura 18).

Uma hipótese para este acontecimento concentra-se na influência, inicialmente desconsiderada, da mudança da vazão no processo. Isto ocorre em função da variação do avanço entre receitas de mesma energia. Ou seja, quanto menor o avanço maior será a quantidade de pó depositado por seção e, conseqüentemente, a energia disponível pode não ser suficiente para fundir o material, ocasionando poros com regiões não fundidas. É possível exemplificar a hipótese criada, comparando as peças 50.200.4 e 50.250.7 (Figura 18). Dessa forma, em futuros experimentos aconselha-se acrescentar a vazão no equacionamento para otimização do processo.

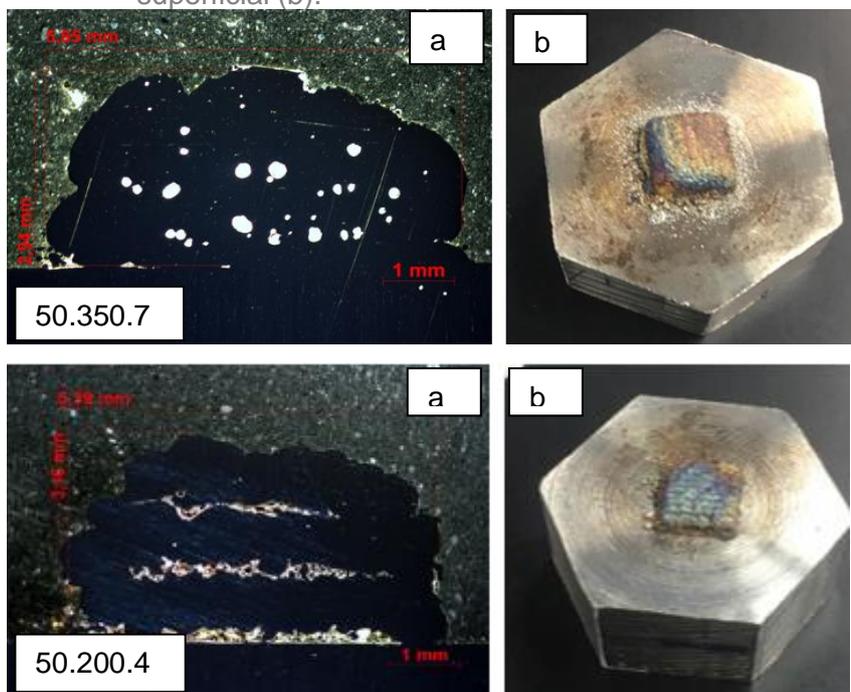
Vale notar que, antes da fabricação das amostras das rodadas 2 e 3, ocorreu um imprevisto na máquina, ocasionando a necessidade de manutenção do cabeçote. Este acontecimento, sinaliza para a possibilidade de que os resultados obtidos na rodada 1 podem ter sofrido alterações, posto que, a vazão foi notoriamente comprometida em função do defeito no cabeçote. Tal afirmação, é comprovada durante a análise dos cordões na seção 6.1. Portanto, na primeira rodada, com o fluxo de pó comprometido, não foi possível observar o mesmo impacto da vazão comentado para as amostras mais recentes.

Figura 17 - Estereoscopia da seção transversal das amostras, com aumento 8x, fabricadas na rodada de teste 2, com energia igual a 50J/mm² (a), assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

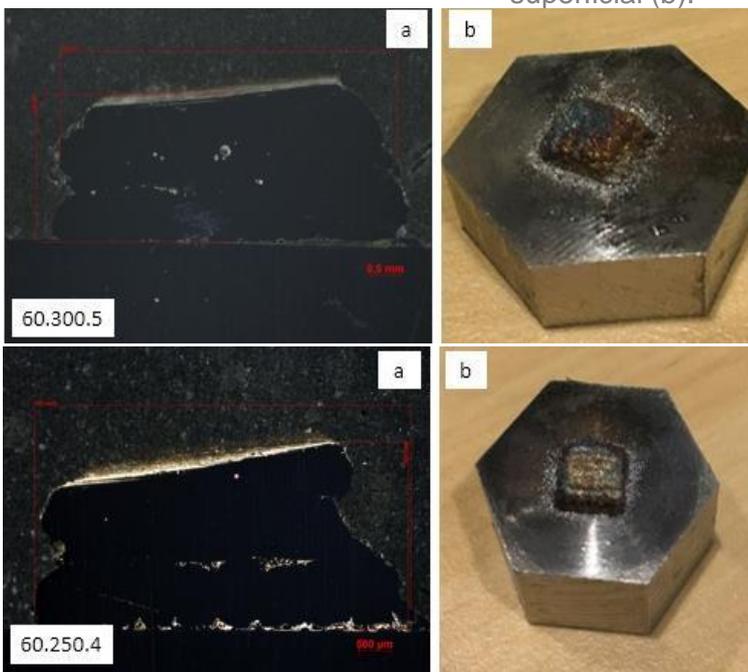
Figura 18 - Estereoscopia da seção transversal das amostras, com aumento 8x, fabricadas na rodada de teste 3, com energia igual a 50J/mm² (a), assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

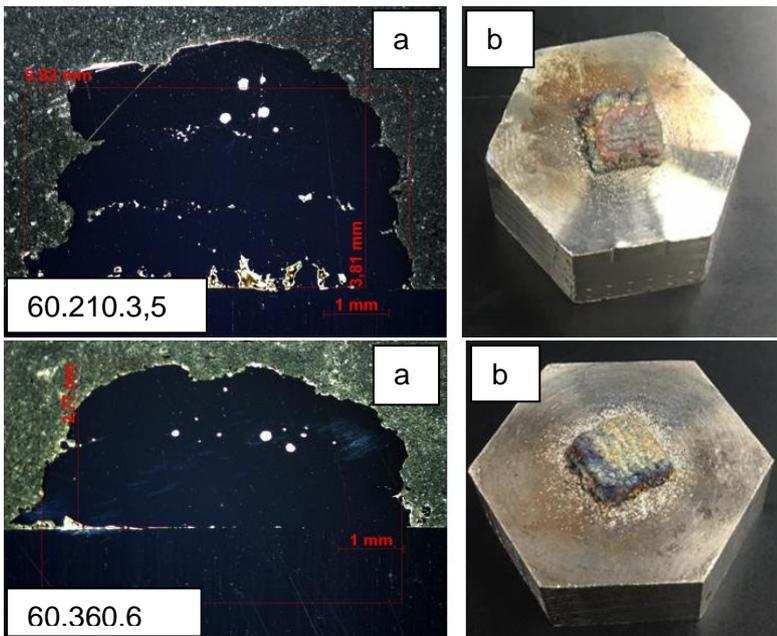
Em relação as amostras de energia 60J/mm², elas apresentaram, nas rodadas 2 e 3 (Figuras 19 e 20), densificação entre camadas mais satisfatória quando comparadas as amostras com a mesma energia fabricadas na primeira rodada de testes (Figura 21). Novamente, a hipótese para explicar o acontecimento se baseia na questão da vazão e nos problemas ocorridos com a máquina. Portanto, para as amostras da rodada 1, uma vez com a vazão comprometida, a energia de 60J/mm² tornou-se um valor elevado para a quantidade de pó disponível, aumentando o tempo de resfriamento e permitindo a oxidação entre as camadas, o que impediu a adesão adequada entre elas.

Figura 19 - Estereoscopia da seção transversal das amostras, com aumento 8x, fabricadas na rodada de testes 3 com energia igual a 60J/mm² (a), assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Estereoscopia da seção transversal das amostras, com aumento 8x, fabricadas na rodada de testes 3, com energia igual a 50J/mm² (a), assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, especialmente na terceira rodada, nota-se uma ocorrência significativa de poros formados por regiões não fundidas ou por bolhas de gás. Este último tipo, na maioria das peças, foi formado em função de uma quantidade significativa de pó aliada à valores de avanços elevados, ocasionando a deposição da próxima camada antes que os gases consigam ser liberados. As amostras 50.300.7 (Figura 18) e 60.360.6 (Figura 20) exemplificam esta questão.

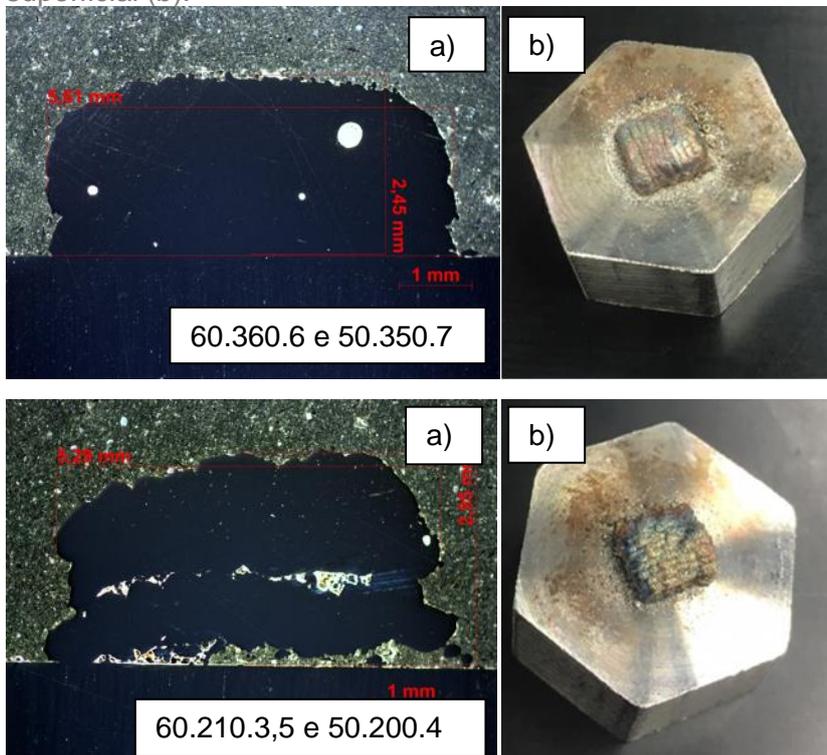
Outro fator importante que pode ser notado, na maioria das receitas fabricadas nas rodadas 2 e 3, trata-se do aparente desprendimento da peça em relação ao substrato. Diante disso, na seção 6.3, foi realizada a metalografia destas amostras com o objetivo de analisar as regiões de possível adesão insatisfatória entre substrato e material fundido.

O desprendimento observado nas da segunda rodada de testes, colaborou para a idealização das features mistas, fabricadas na terceira rodada (Figura 21). A estratégia se baseou em aplicar a maior energia na primeira camada, para garantir a adesão e, nas demais camadas, foi aplicada a energia considerada a de melhor densificação, isto é 50 J/mm².

Deste modo, em relação aos resultados das features mistas, é possível observar que, a feature formada pelas receitas 60.360.6 e 50.350.7, forneceu os melhores resultados, em termos de densificação entre camadas e adesão ao

substrato. Porém, é possível notar a formação de poros por bolhas de gás em função dos avanços elevados.

Figura 21 - Estereoscopia da seção transversal das amostras consideradas features mistas, com aumento 8x, fabricadas na rodada de teste 3(a), assim como a sua respectiva visão superficial (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda feature mista, formada pelas receitas 60.210.3,5 e 50.200.4, embora construída com o mesmo padrão de energia, não apresentou a mesma qualidade da primeira feature mista. A explicação pode ser relacionada aos avanços das receitas que formam a segunda feature. Isto é, trata-se de avanços menores, conseqüentemente, tem-se a mesma energia, porém maior quantidade de pó para aquecimento, causando os poros observados por fusão ineficiente do material.

Tabela 4 -Dimensões compiladas das amostras de deposição fabricadas na rodada de teste 1.

ID	Altura (mm)	Largura (mm)
40.200.5	1,31	5,53
50.250.5	1,43	5,55
60.300.5	2,13	5,59
40.250.6	1,10	5,64
60.250.4	2,21	5,55

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Dimensões compiladas das amostras de deposição fabricadas na rodada de teste 2.

ID	Altura (mm)	Largura (mm)
40.200.5	2,47	5,65
50.250.5	2,47	5,66
50.300.5	2,38	5,54
40.250.6	2,13	5,58
60.250.4	3,07	5,68

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Dimensões compiladas das amostras de deposição fabricadas na rodada de teste 3.

ID	Altura (mm)	Largura (mm)
50.200.4	3,15	5,65
50.350.7	3,56	6,05
60.210.3,5	3,75	5,87
60.360.6	2,29	5,65
60.360.6 / 50.350.7*	2,98	6,08
60.210.3,5/ 50.200.4*	2,93	5,67

50.200.4*

*Features mistas

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, no que diz respeito as dimensões das peças, as amostras das rodadas 2 e 3 obtiveram alturas superiores em todas as receitas em relação as amostras da primeira rodada. Em relação a largura não foram obtidas variações significativas.

É possível justificar os valores superiores na altura em função do aumento da vazão de pó após a substituição de partes danificadas da máquina. Outrossim, sobretudo para as amostras da terceira rodada, o incremento da altura, possivelmente, também ocorreu em função dos espaçamentos entre camadas que não aderiram de maneira satisfatória.

Por fim, outro fator que pode ter intensificado os resultados apresentados, trata-se do aumento do gás de proteção contra oxidação nas amostras das rodadas 2 e 3. Este fato, acelera resfriamento do material durante a deposição, conseqüentemente permitindo um processo de solidificação dos cordões com menor tempo para acomodação do material fundido, proporcionando maiores valores na altura. Deste

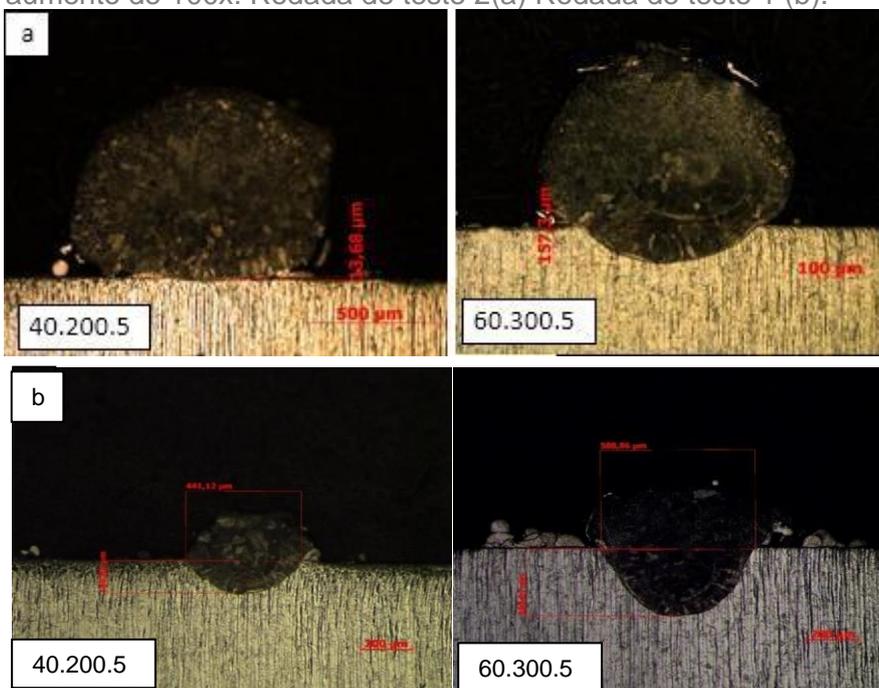
modo, além do aumento da vazão, a alteração do shield gas também pode ter impactado na qualidade das amostras.

6.3 METALOGRAFIA

Com o ataque metalográfico, é possível determinar a largura e profundidade da poça de fusão em função do aumento da potência. Nas ocasiões de fabricação de cordões, isto é, durante as rodadas de teste 1 e 2, é observado que, uma vez mantendo o avanço constante e, portanto, mesma vazão por seção de deposição, a poça de fusão da amostra 40.200.5 é menor do que a da 60.300.5 (Figura 22). Tal ocorrência se deve a intensificação da energia na área de deposição em função do aumento da potência. Esta tendência é reforçada na construção do gráfico com avanço constante (5 mm/s) presente na Figura 23.

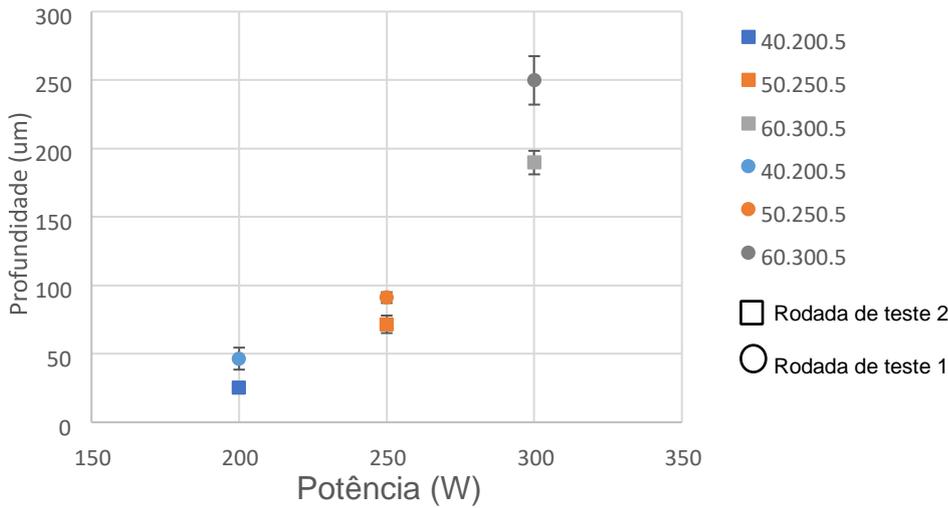
Porém é válido notar que os valores da poça de fusão das amostras da primeira rodada, são superiores aos valores encontrados para as amostras da segunda (Figura 23). Tal fato, reforça a teoria comentada na seção 6.1, na qual, o centro dos cordões das peças fabricadas na rodada 2 está mais distante do substrato, sinalizando para um acúmulo de pó e, portanto, diferenças na vazão de material aplicada nas rodadas 1 e 2.

Figura 22 - Comparação das micrografias das amostras de cordão 40.200.5 e 60.300.5 com aumento de 100x. Rodada de teste 2(a) Rodada de teste 1 (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

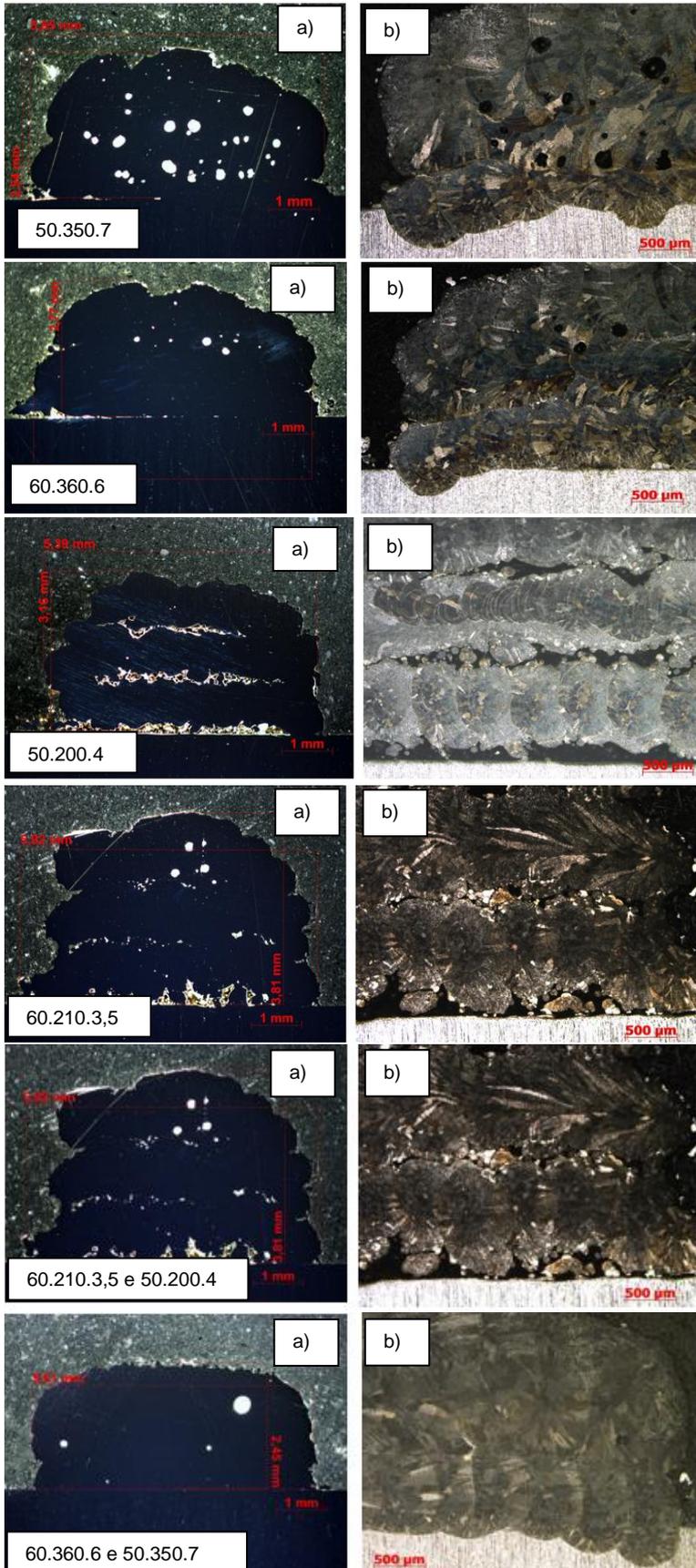
Figura 23 - Profundidade da poça de fusão em função da potência, para avanço constante (5 mm/s). Símbolos semelhantes sinalizam amostras fabricadas na mesma ocasião.



Fonte: Elaborado pelo autor.

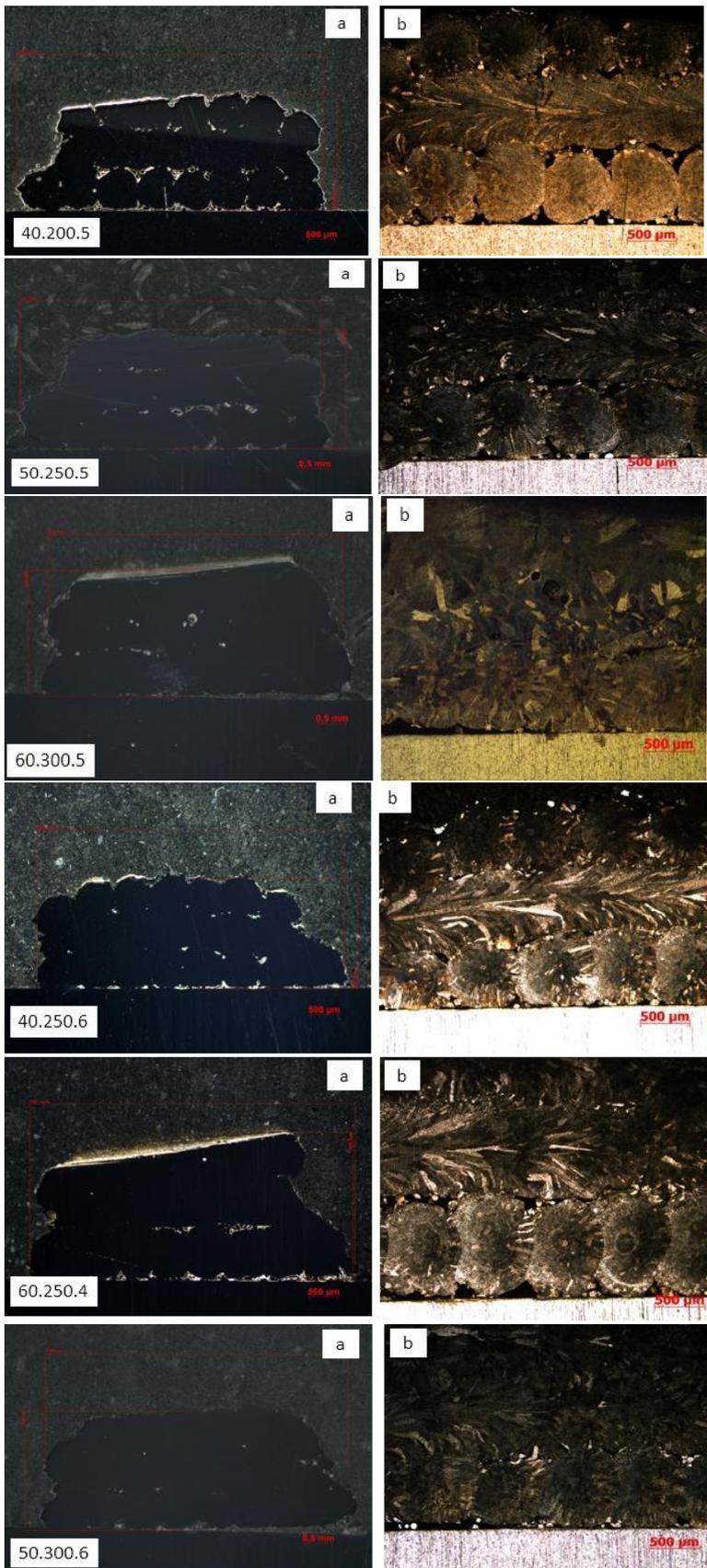
É válido notar que em estudo anteriormente realizados [10][13], as amostras de feature foram utilizadas para observar sua microestrutura, uma vez que foram identificadas diferenças visuais entre a microestrutura do cordão individual e seu substrato. Esta diferença poderia significar mudança nas propriedades da peça final. Neste ínterim, a microestrutura das features demonstrou ser muito semelhante àquela observada no cordão. Porém, embora existam diferenças entre a estrutura do substrato e do material depositado nas amostras fabricadas em ambas as ocasiões, foi apresentado em relatório anterior [10], por resultados de difração de raios X que a estrutura cristalina do aço 316L não sofreu alteração, garantindo as propriedades da peça. Logo, a hipótese criada, e que perdura no presente estudo é a de que a microestrutura do substrato e do cordão se diferenciam apenas no tamanho de seus grãos, posto que, foram fabricados de maneiras distintas.

Figura 24 - Imagens de esteroscopia, rodada de teste 3, de cada receita com aumento de 8x (a) e micrografia de cada receita com aumento de 200x (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

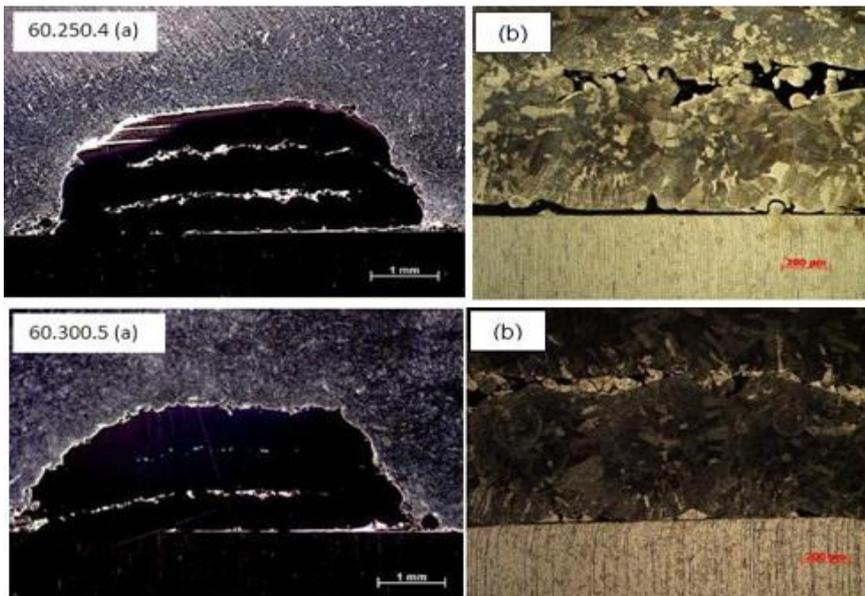
Figura 25 - Imagens de estereoscopia, rodada de teste 2, de cada receita com aumento de 8x (a) e micrografia de cada receita com aumento de 200x (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o ataque, é possível notar de maneira mais enfática que todas as amostras fabricadas nas rodadas 2 e 3, com exceção da feature mista formada pelas receitas 60.360.6 e 50.350.7, demonstraram adesão inexistente ou precária com o substrato (Figuras 24 e 25). Nas peças pertencentes a primeira rodada, o desprendimento do substrato ocorreu somente nas amostras de 60J/mm² (Figuras 26 e 27).

Figura 26 - Imagens de esteroscopia, rodada de teste 1, receitas com adesão insatisfatória, aumento de 8x (a) e micrografias de cada receita com aumento de 100x (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Imagens de esteroscopia, rodada de teste 1, receitas com adesão insatisfatória, aumento de 8x (a) e micrografias de cada receita com aumento de 100x (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste contexto, a adesão insatisfatória pode estar relacionada a uma contração térmica, causada pela diferença de temperatura entre o cordão e o substrato. Dessa forma, é possível observar, sobretudo nas features da terceira rodada, que, na maioria das amostras, o primeiro cordão adere corretamente ao substrato, porém os cordões adjacentes tentam a entrar primeiro em contato com cordões aquecidos já depositados, em detrimento do substrato com temperaturas inferiores. Conseqüentemente, o cordão recém depositado resfria antes de aderir adequadamente ao substrato. As features 50.350.7 e 60.360.6 presentes na figura 24, exemplificam esta questão.

Portanto, para impedir a contração térmica, é sugerido aumentar o overlapping, isto é, a distância entre centros de cordão. O aumento deste parâmetro, diminuirá a preferência cordão recém depositado pelo cordão adjacente, permitindo a melhor adesão ao substrato.

7 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Frente aos resultados apresentados, no que diz respeito a dimensão dos cordões individuais, os comportamentos observados nas peças de diferentes períodos do projeto foram semelhantes. As diferenças concentraram-se no formato do cordão e nos valores superiores visualizados nas dimensões das amostras recentes, da rodada de teste 2. Tais diferenças são explicadas como função de um possível aumento no volume de pó depositado nas amostras, referentes a segunda rodada, frente a manutenção do cabeçote, ocorrida após a produção das peças da primeira rodada.

Nas features, a energia considerada, em estudos anteriores, como aquela que ofertava melhor densificação da peça, isto é, $50\text{J}/\text{mm}^2$, apresentou variações na qualidade à medida que os parâmetros de avanço e de potência, que formavam a receita, mudavam. Este fato ressaltou a importância de um parâmetro anteriormente relevado, isto é, a vazão de pó, visto que, a quantidade de material depositado é diretamente influenciada pelo avanço do cabeçote. Deste modo, a fórmula da energia, utilizada neste relatório como estratégia para a otimização do processo e avaliação das amostras produzidas, demonstrou não ser meio mais apropriado para se obter os parâmetros de fabricação de uma peça de qualidade, haja vista que, não considera as características do pó.

No que diz respeito as sugestões para futuros trabalhos, é aconselhado reformular a equação de energia utilizada, incluindo um ou mais parâmetros do pó utilizado, tais como volume, vazão e tamanho da partícula. Por fim, em relação a adesão precária ao substrato, é proposto o aumento da distância entre cordões (overlapping). Tal parâmetro é capaz de diminuir a questão da contração térmica, ocorrida em função da preferência do cordão, recém depositado, pelo cordão adjacente, o qual se encontra em temperatura superior ao substrato, consequentemente, impedindo adesão adequada.

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 laser-aided 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. Effects 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] 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.
- [9] 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.
- [10] MIAGAVA JOICE; HENRIQUES ANA, Relatório final: Caracterização de materiais para otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada (DED), 2019.
- [11] BOISSELIER, Didier; SANKARÉ, Simon. Influence of powder characteristics in laser direct metal deposition of SS316L for metallic parts manufacturing, **Physics Procedia**, 2012, Volume 39.
- [12] CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, v. 8º Edição.

- [13] GALDINO RAPHAEL; HENRIQUES ANA, Relatório intermediário: Caracterização de materiais para otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada (DED), 2020.
- [14] 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,
- [15] 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.541-553.
- [16] DU, Wei; BAI, Qian; ZHANG, Bi. A Novel Method for Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic Parts, **Procedia Manufacturing**, 2016, Volume 5, p. 1018-1030.
- [17] 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.
- [18] 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-de-acosfeitos-por-impressao-3d/32185/>
- [19] 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.
- [20] 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,
- [21] 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.

- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] ROMI DCM 620-5X HYBR D. Romi. Disponível em: https://www.romi.com/wp-content/uploads/2017/10/foi_romi_dcm_hybrid_po_aa_052017_baixa.pdf. Acesso em: Agosto de 2020.