

ANÁLISE DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DIRETA DE ENERGIA COMO ESTUDO BASE PARA A MANUFATURA ADITIVA DE COMPÓSITOS

Gustavo Henrique Truppel, gustavo.truppel@posgrad.ufsc.br¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

Paulo Antônio Pereira Wendhausen, paulo.wendhausen@ufsc.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Trindade, Florianópolis, SC – Brasil

Resumo. A manufatura aditiva por Deposição Direta de Energia (DDE) apresenta parâmetros de processo que influenciam nas propriedades dos componentes fabricados, como a potência do feixe laser (P), velocidade de deslocamento do feixe em relação à peça (V) e distância focal do feixe à peça (H). Este trabalho tem o objetivo de analisar a relação desses parâmetros com as tendências dos resultados de diluição geométrica de cordões gerados a partir de uma mistura de pó de ferro com uma liga em pó de estanho e prata, depositados sobre chapa de aço SAE 1020 com diferentes combinações dos parâmetros mencionados. Para isso, foi adotado um planejamento experimental com três fatores, onde P , V e H apresentam 3, 3 e 2 níveis, respectivamente. De acordo com as condições adotadas, apenas o menor parâmetro de H apresentou perfis de diluição. As diluições tendem a crescer com um aumento de P e V . A amostra com P de 700 W, V de 5×10^{-3} m/s e H de 15×10^{-3} m resultou na menor diluição e, portanto, o estudo concluiu que a janela de processamento para otimizar parâmetros encontra-se em torno desses valores.

Palavras chave: Deposição Direta de Energia. Manufatura Aditiva. Diluição. Janela de processamento. Compósito.

1. INTRODUÇÃO

Os principais processos de fabricação têm seus fundamentos baseados na fusão, remoção, conformação e adição de material. O grupo referente à adição de material (como a soldagem, brasagem, colagem) é caracterizado por promover a união de materiais para a formação de componentes de complexidade mais elevada (Volpato *et al.*, 2007). Nesse mesmo grupo encontra-se o processo de fabricação por Manufatura Aditiva (MA). A MA é um processo de fabricação que assume uma abordagem de criação de objetos de forma livre através da produção de camada por camada (Alberti; Silva; D'Oliveira, 2014). Em síntese, o processamento de materiais por MA possui etapas de criação de um modelo do componente a ser fabricado por *Computer Aided Drawings* (CAD), conversão do modelo CAD para arquivo *Standard Tessellation Language* (STL), determinação de trajetória CNC (*Computer Numerical Control*) e definição de parâmetros de processamento (Gibson; Rosen; Stucker, 2010).

Materiais com gradação funcional (*Functionally Graded Materials*, FGM) promovem um perfil variável de composição química de dois ou mais materiais, apresentando estruturas heterogêneas que combinam de forma simultânea as propriedades dos materiais e que geram transições gradativas das mesmas (Zhang *et al.*, 2018). Neste cenário, alguns tipos de ligas metálicas assumem um potencial de aplicação. Ligas metálicas à base de estanho (Sn) são utilizadas como revestimento de mancais hidrodinâmicos pois podem promover melhorias nas propriedades tribológicas (Alcover Junior; Pukaszewicz, 2019). Essas características são geralmente correlacionadas a combinações de uma matriz de solução sólida (composta por estanho, de aspecto mole e dúctil) com precipitações de intermetálicos (composta por estanho e outros elementos, de aspecto duro e frágil) (Xia *et al.*, 2019).

A MA é classificada de acordo com a forma de consolidação das camadas (ISO/ASTM International, 2015). Entre as categorias, as técnicas de fusão em leito de pó e Deposição Direta de Energia (DDE) são amplamente utilizadas para fabricação de componentes metálicos e podem possuir uma característica em comum: feixe de laser (*Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation*) como fonte de energia para dar forma aos objetos de interesse (Kumar; Pandey; Wimpenny, 2019). Sendo assim, esses processos assumem potencial de aplicação em FGM.

O processo de DDE baseado em uma fonte coaxial de pós possui um feixe de laser que exerce o papel de fonte de energia para a formação de uma poça de fusão, a qual surge quando o feixe interage com o substrato. Assim, o material de adição é conduzido à região da poça de fusão e, com a movimentação do cabeçote, da mesa ou dos dois juntos, uma linha de deposição é produzida. Quando essas linhas de deposição são sobrepostas lateralmente umas às outras, uma camada é criada. A adição dessas camadas sobre outras camadas traz a formação do componente 3D desejado (Selcuk, 2011).

O emprego de um sistema de alimentação de material em conjunto de um sistema de movimentação e um feixe de laser proporciona uma gama de combinações de parâmetros de processo que orienta as condições de interação entre o

feixe e materiais de processamento. Shah *et al.* (2014) estudaram a influência da potência do laser na macroestrutura e dimensões de deposições de camadas de pós de aço inoxidável 316 L e Inconel 718. Kummilil *et al.* (2005) experimentaram variações de potência do laser e velocidade de deslocamento para estudar suas relações com resultados em termos de altura de deposições de camadas de Ti-6Al-4V. Recentemente, Jinoop *et al.* (2019) analisaram a influência dos parâmetros de potência e velocidade na taxa de deposição de camadas de Hastelloy-X. Logo, é possível concluir que a pesquisa entre as relações de parâmetros, processo e propriedades dos materiais se faz necessária para otimização de resultados.

Os trabalhos de DDE fabricam componentes metálicos através da sobreposição de camadas a partir de um substrato. Ramakrishnan e Dinda (2019) citam em seu trabalho que, para garantir o quesito de união metalúrgica, as primeiras camadas são processadas com uma potência de 1000 W e a cada camada sobreposta são reduzidos 50 W, até que seja atingido o patamar de potência de interesse. Shah *et al.* (2014) também demonstram cuidados especiais com as camadas iniciais, visto que controlam a composição do material ao longo da sobreposição delas, até que seja estabelecida a composição desejada. Olakanmi *et al.* (2019) investigaram valores de potência do laser em conjunto com velocidade de deslocamento e correlacionaram resultados de diluições relativamente baixas (em torno de 7%), com propriedades metalúrgicas e mecânicas de interesse. Assim sendo, os parâmetros de deposição das primeiras camadas sobre o substrato apresentam aspectos relevantes nas propriedades do material fabricado, visto que essas camadas iniciais devem cumprir alguns requisitos e assumem, de certa forma, um papel de transição entre o substrato e componente de interesse.

Tendo em vista a possibilidade do uso de ligas à base de estanho em aplicações de elevado desempenho tribológico, assim como a importância dos parâmetros de processo da MA por DDE no desenvolvimento das camadas de transição entre substrato e componente de interesse, o objetivo do trabalho é analisar a relação dos parâmetros de interesse com as tendências das respostas em termos de diluição geométrica dos cordões gerados. Busca-se definir (i) uma distância focal do feixe laser (H), (ii) valores de potência do laser (P) e velocidade de deslocamento (V) que apresentem condições favoráveis de diluição (em torno de 5%) e que sirvam de base para futuros estudos de otimização de parâmetros.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

O substrato que recebe as deposições é uma chapa laminada de aço SAE 1020 (comprimento, largura e espessura de 200, 60 e 10×10^{-3} m, respectivamente). Anteriormente aos ensaios, as chapas passam por um jateamento de areia para remoção de óxidos e impurezas superficiais. Após isso, são lavadas com detergente (remoção de gordura) e devidamente secadas. O material de adição utilizado é uma mistura de pó de ferro AHC 100.29 da empresa Höganäs® (granulometria entre 20 a 200×10^{-6} m e morfologia irregular) e uma liga em pó de estanho e prata da empresa Heraeus® (granulometria entre 15 a 25×10^{-6} m e morfologia arredondada). O pó de ferro foi peneirado em uma peneira de 106 mesh. Para a liga em pó de estanho, 3,5% em massa é prata e o restante estanho. Já a mistura dos dois pós (Fe + Sn-Ag) é preparada para que tenha, em massa, 80% de ferro e 20% da liga estanho-prata. Visto que há duas granulometrias diferentes, a distribuição de tamanhos do pó da mistura apresenta dois picos distintos. O tamanho médio de partículas da mistura é $68,4 \times 10^{-6}$ m.

2.2. Procedimentos experimentais

Os testes foram executados com um sistema de processamentos de materiais a laser desenvolvido pela equipe laboratorial. A bancada de ensaios é composta por uma fonte laser de alta potência (10 kW) YLS-10000 da empresa IPG Photonics®. A fonte contém um laser de fibra (Yb, íterbio) com comprimento de onda na faixa de 1070 a 1080×10^{-9} m. Para alimentação do pó é utilizada uma central alimentadora de pó da empresa GTV®. O sistema alimentador é composto por um reservatório de pó e um sistema de condução do mesmo (disco com ranhuras que rotacionam a uma determinada rotação por minuto, controlando a taxa de alimentação). Então, o pó é alimentado coaxialmente ao feixe de laser por um bocal de *cladding* COAX-50-S do Fraunhofer ILT, o qual é acoplado a um cabeçote Precitec® YW52. Um sistema de movimentações Siemens® CNC SINUMERIK 840D SL é adotado para deslocamento do cabeçote.

A metodologia de experimentos foi composta pela deposição em formato de cordões únicos e lineares sobre chapa de aço comum, sendo que três parâmetros de processo foram variados: potência do laser (P), velocidade de deslocamento do cabeçote (V) e distância focal do feixe de laser à peça (H). É importante ressaltar que o objetivo do estudo não é quantificar e nem comparar médias ou efeitos que esses fatores exercem em termos de diluição, mas sim analisar suas tendências e identificar intervalos que geram condições de diluição propícias para uma futura otimização. P , V e H sofreram variações em 3, 3 e 2 níveis, respectivamente, gerando 18 combinações distintas para os ensaios. De forma similar a outros autores (Dos Santos Paes *et al.*, 2018), é assumido que o laser possui boa repetibilidade e que, então, uma consistente significância da tendência pode ser observada mesmo quando a variância dos resultados é ignorada por ser considerada baixa. Por isso, repetições não foram consideradas. Tabela 1 mostra os parâmetros adotados. Cada número de amostra representa um cordão depositado linearmente sobre a chapa de aço. Para todas as deposições, foram mantidos constantes os parâmetros de taxa de alimentação de material ($1,67 \times 10^{-4}$ kg/s, equivalentes a 10 g/min), vazão do gás de arraste ($8,33 \times 10^{-5}$ m³/s,

equivalentes a 5 l/min) e vazão do gás de proteção ($2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, equivalentes a 15 l/min). São consideradas características positivas os resultados de baixa (em torno de 5%).

Tabela 1. Parâmetros utilizados nos experimentos e respectivos resultados de diluição.

Identificação da amostra	P (W)	$V \times 10^{-3}$ (m/s)	$H \times 10^{-3}$ (m)	Diluição (%)
1	350	5,00	15	0,00
2	700	5,00	15	2,51
3	1050	5,00	15	17,47
4	350	13,33	15	0,00
5	700	13,33	15	18,72
6	1050	13,33	15	30,91
7	350	21,67	15	0,00
8	700	21,67	15	24,18
9	1050	21,67	15	50,85
10	350	5,00	35	0,00
11	700	5,00	35	0,00
12	1050	5,00	35	0,00
13	350	13,33	35	0,00
14	700	13,33	35	0,00
15	1050	13,33	35	0,00
16	350	21,67	35	0,00
17	700	21,67	35	0,00
18	1050	21,67	35	0,00

2.3. Avaliação dos resultados

Para avaliar as características de diluição geométrica dos cordões depositados, as amostras foram seccionadas transversalmente em suas regiões centrais e preparadas por processos metalográficos. Elas então foram embutidas a frio (resina polimérica), lixadas (lixas de 80 a 1200 mesh), polidas (alumina de $1 \times 10^{-6} \text{ m}$) e atacadas com Nital 1% para revelação da zona fundida. As macrografias dos cordões foram efetuadas em um microscópio ótico Leica® DM 4000 MLED. Então, análises dos valores de diluição geométrica foram efetuados através do *software* ImageJ de acordo com a Eq. (1), sendo que os respectivos dados estão representados na Fig. 1.



Figura 1. Exemplo de medição da diluição geométrica de uma seção transversal de um cordão.

$$\text{Diluição} = \frac{\text{Área de penetração}}{\text{Área de penetração} + \text{Área de reforço}} \quad (1)$$

3. RESULTADOS

A Tab. 1 mostra os parâmetros adotados e os resultados de diluição geométrica. Observa-se que o maior valor de H não apresentou nenhum perfil de diluição, independentemente dos valores de P e V . Essa característica pode ser justificada pelo fato de que o H com $35 \times 10^{-3} \text{ m}$ apresenta o foco do feixe de laser em um ponto localizado acima da superfície do substrato. Já um H de $15 \times 10^{-3} \text{ m}$ posiciona o foco na superfície do material de base. Logo, o menor nível de H apresenta um menor diâmetro do feixe de laser na superfície do substrato e, então, para mesmas condições de P e V , é produzida

uma maior densidade de energia. Pinkerton e Li (2004) concluem que variações no ponto focal do feixe de laser podem afetar deposições de material devido a diferenças de densidade de energia e, sendo assim, as investigações deste trabalho concordam com as desses autores. Como apenas o menor valor de H resultou em cordões com diluição no substrato, serão analisadas apenas as amostras do respectivo grupo. Deposições que não apresentaram união metalúrgica com o substrato não são analisadas pois, nestes casos, os cordões podem se distorcer ou deslocar, afetando negativamente futuras sobreposições de cordões ou camadas e causando problemas durante processamento.

Dos nove cordões com menor valor de H (15×10^{-3} m), apenas seis apresentaram diluição no substrato. As amostras de número 1, 4 e 7 são analisadas mesmo apresentando diluição igual a zero pois estão inseridas no grupo amostral de H igual a 15×10^{-3} m e, assim, facilitam na interpretação das tendências relativas às propriedades medidas em função de P e V . Figura 2.a. ilustra os perfis de diluição em função de P e V para as amostras de 1 a 9. Através da mesma figura é possível observar que a P de 350 W não resultou em diluição, independentemente da velocidade de deslocamento. No entanto, os valores de 700 e 1050 W resultaram em perfis de diluição, sendo que a tendência é quanto mais elevada a P , maior a diluição (para qualquer nível de V). A Fig. 2.a. ilustra também que, com exceção das amostras de 350 W, os maiores índices de diluição são encontrados nos mais elevados parâmetros de V . Ou seja, para qualquer um dos níveis de 700 e 1050 W, quanto maior for V , maior a diluição.

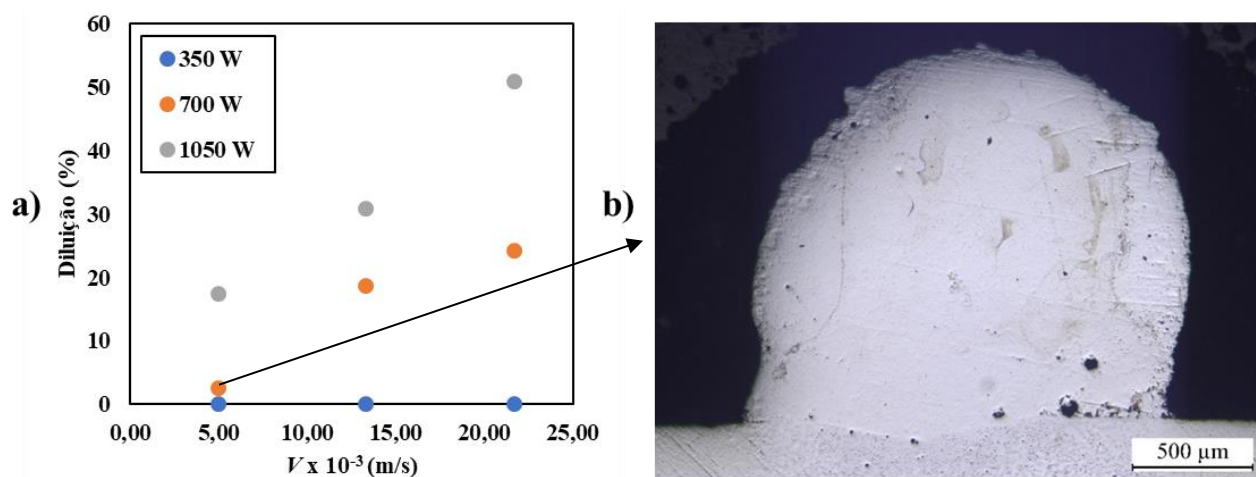


Figura 2. a) Diluição (%) das amostras 1 a 9 em função de P (W) e V (m/s) e b) Macrografia da amostra 2.

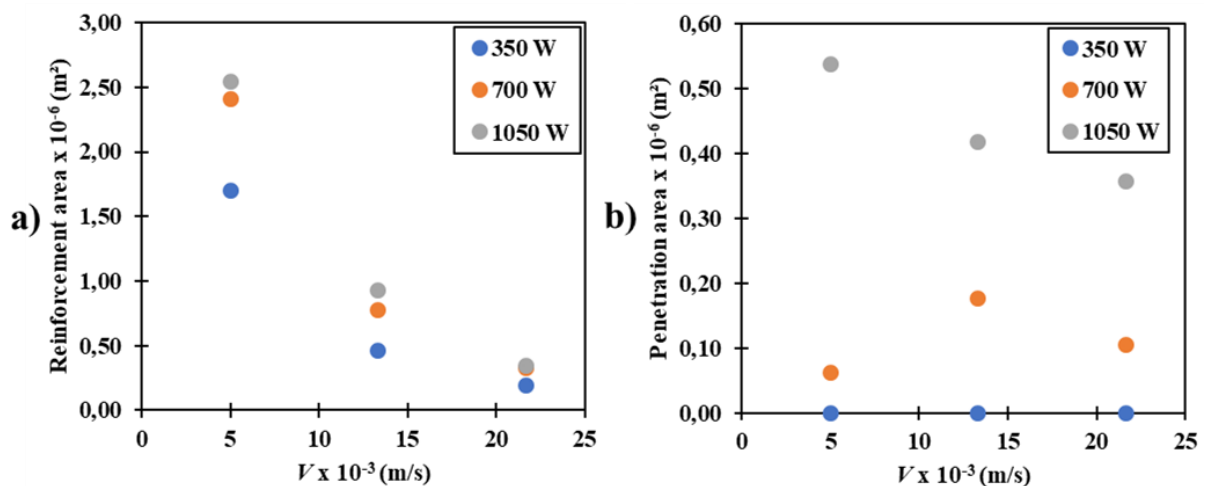


Figura 3. a) Área de reforço (m^2) e b) Área de penetração (m^2) em função de P (W) e V (m/s) das amostras 1 a 9.

Essas características podem ser justificadas com o auxílio da Fig. 3.a. e Fig. 3.b., as quais representam, em função dos parâmetros P e V adotados nas amostras 1 a 9, os valores das áreas de reforço e de penetração, respectivamente. A Fig. 3.a. mostra que, para qualquer valor de P , há uma tendência de diminuição significativa das áreas de reforço dos cordões com o aumento de V . Por exemplo, para uma mesma P de 1050 W, as áreas de reforço podem variar em torno de $1,5 \times 10^{-6}$ m² com o aumento de V de 5 a $13,33 \times 10^{-3}$ m/s. A Fig. 3.b. ilustra que, para qualquer V , maiores valores de P tendem a resultar em penetrações ligeiramente mais elevadas. Não houve, no entanto, penetração nas amostras com P de 350 W. Para uma P de 1050 W, quanto mais elevada a V , menor é a penetração. Considerando as amostras com P de 700 W, é

possível observar que o perfil de penetração não respeita a tendência encontrada nas amostras de P com 1050 W. A Fig. 3.b. mostra que o experimento com menor V (5×10^{-3} m/s) e 700 W resultou no menor índice de penetração. Para o mesmo valor de P a uma V de $13,3 \times 10^{-3}$ m/s, a área de penetração cresce o dobro, finalizando na velocidade mais alta com um decréscimo. Visto que a amostra com P de 700 W, V de 5×10^{-3} m/s e H de 15×10^{-3} m resultou na menor área de penetração em conjunto com uma área de reforço relativamente grande, a mesma apresentou a melhor condição em termos de diluição e é exposta na Fig. 2.b. Logo, vale ressaltar que a mesma apresenta defeitos metalúrgicos. Mas, o foco do trabalho é voltado para os parâmetros do processo, sendo a discussão e redução desses defeitos desconsideradas no respectivo estudo.

4. CONCLUSÕES

A diluição dos cordões depositados é uma função da potência do laser e da velocidade de deslocamento do feixe com relação ao substrato. O *design* de experimentos mostrou que, quanto maior for o parâmetro P , há tendência de aumento da diluição. De forma análoga, quanto maior for V , a tendência também é de que a diluição cresça. As justificativas são correlacionadas aos perfis transversais dos cordões processados. O parâmetro V influencia nas áreas de reforço resultantes, gerando uma tendência de forte redução das mesmas. Já parâmetro P tem influência positiva. A variável V também traz influência nos resultados da área de penetração, mas de forma mais sutil. O parâmetro P , no entanto, age de forma mais significativa.

Sendo assim e considerando as condições de processo, foi possível concluir que para valores iguais de P e V , o parâmetro H de 15×10^{-3} m é mais favorável na obtenção de perfis de diluição. Além disso, pode ser considerado que a janela de processamento para diluições favoráveis fica em torno de uma P com 700 W, V com 5×10^{-3} m/s e H de 15×10^{-3} m. Logo, conclui-se que o estudo agrega valor ao estado da arte da MA por deposição direta de energia, visto que este trabalho pode ser utilizado como base para futuros processos de otimização de parâmetros.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) da UFSC pelo apoio. Além disso, agradecimentos especiais aos grupos da UFSC: LabMat (Laboratório de Materiais), MAGMA (Grupo de Materiais Magnéticos do LabMat) e LMP (Laboratório de Mecânica de Precisão) pelo fornecimento de materiais e infraestrutura.

6. REFERÊNCIAS

- Alberti, E.A., da Silva, L.J. e D'Oliveira, A.S.C.M., 2014. "Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade". *Soldagem & Inspeção*, Vol. 19, p. 190–198.
- Alcover Junior, P.R.C. e Pukasiewicz, A.G.M., 2019. "Evaluation of microstructure, mechanical and tribological properties of a Babbitt alloy deposited by arc and flame spray processes". *Tribology International*, Vol. 131, p. 148–157.
- Dos Santos Paes, L.E. *et al.*, 2018. "Comparison of methods to correlate input parameters with depth of penetration in LASER welding". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 101, p. 1157–1169.
- Gibson, I., Rosen, D.W. e Stucker, B., 2010. "Design for additive manufacturing". *Additive Manufacturing Technologies*, p. 299–332.
- ISO/ASTM International, 2015. "ISO/ASTM DIS 52900:2015(en) - Additive manufacturing — General principles — Terminology". *ISO Online Browsing Platform (OBP)*. 15 Ago. 2018 <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en/%0A>>.
- Jinoop, A.N., Paul, C.P. e Bindra, K.S., 2019. "Laser assisted direct energy deposition of Hastelloy-X". *Optics & Laser Technology*, Vol. 109, p. 14–19.
- Kumar, L.J., Pandey, P.M. e Wimpenny, D.I. (Org.), 2019. "3D Printing and Additive Manufacturing Technologies". *Springer Singapore*, 10 Jan. 2019 <<http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-0305-0>>.
- Kummailil, J. *et al.*, 2005. "Effect of Select LENSTM Processing Parameters on the Deposition of Ti-6Al-4V". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 7, p. 42–50.
- Olakanmi, E.O. *et al.*, 2019. "Multi-variable optimisation of the quality characteristics of fiber-laser clad Inconel-625 composite coatings". *Surface and Coatings Technology*, Vol. 357, p. 289–303.
- Pinkerton, A.J. e Li, L., 2004. "The significance of deposition point standoff variations in multiple-layer coaxial laser cladding (coaxial cladding standoff effects)". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, p. 573–584.
- Ramakrishnan, A. e Dinda, G.P., 2019. "Direct laser metal deposition of Inconel 738". *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 740–741, p. 1–13.
- Selcuk, C., 2011. "Laser metal deposition for powder metallurgy parts". *Powder Metallurgy*, Vol. 54, p. 94–99.
- Shah, K. *et al.*, 2014. "Parametric study of development of Inconel-steel functionally graded materials by laser direct

- metal deposition". *Materials & Design*, Vol. 54, p. 531–538.
- Volpato, N. *et al.*, 2007. "Prototipagem rápida : tecnologias e aplicações". *Editora Blücher*, Ed. 1.
- Xia, Q. *et al.*, 2019. "Interface bonding properties of multi-layered metal composites using material composition method". *Tribology International*, Vol. 131, p. 251–257.
- Zhang, B. *et al.*, 2018. "Additive Manufacturing of Functionally Graded Material Objects: A Review". *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 18, p. 041002–041002-16.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Parameters Analysis from the Directed Energy Deposition Process as a Basic Study for Additive Manufacturing of Composites

Gustavo Henrique Truppel, gustavo.truppel@posgrad.ufsc.br¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

Paulo Antônio Pereira Wendhausen, paulo.wendhausen@ufsc.br¹

¹Mechanical Engineering Department, Federal University of Santa Catarina, Campus Trindade, Florianópolis, SC – Brazil

Abstract. Additive manufacturing by Directed Energy Deposition (DED) presents process parameters that influence on the properties of fabricated components, such as laser beam power (P), traverse speed relative to the workpiece (V) and beam-to-part focal length (H). This work aims to analyze these parameters' relationships with trends of geometric dilution results from tracks composed by a mixture of iron powder with a tin and silver alloy powder. Tracks were deposited on SAE 1020 steel sheet with different combinations of the aforementioned parameters. For this, an experimental planning with three factors was adopted, where P , V and H presented 3, 3 and 2 levels, respectively. According to the adopted conditions, only the smallest parameter of H showed dilution profiles. Dilutions tend to grow with an increasing P and V . The sample with 700 W of P , 5×10^{-3} m/s of V and 15×10^{-3} m of H resulted in the lowest dilution and, therefore, the study concluded that the processing window for optimizing parameters lies around these values.

Keywords: Directed Energy Deposition. Additive Manufacturing. Dilution. Process window. Composite.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.