

AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DE CAMADAS DEPOSITADAS POR PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA A LASER

Isabela Atilio ^{1,2}

isabelaatilio@hotmail.com

Milton Sérgio Fernandes de Lima ^{1,2}

miltonsflima@gmail.com

Rafael Humberto Mota de Siqueira ¹

rhmotasiqueira@gmail.com

Vágner Braga ^{1,2}

vagnerbraga12@gmail.com

Deisi Vieira ^{1,2}

deisi.ivieira@gmail.com

¹ Instituto de Estudos Avançados, IEAv/DCTA. Trevo Amarante 1, Putim, 12228-001, São José dos Campos – SP.

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA/DCTA. Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, 12228-900, São José dos Campos – SP

Resumo. As falhas em serviço de peças pneumáticas soldadas pelo processo de solda a arco conduziram a novos desenvolvimentos de reparos, tendo o processo de manufatura aditiva a laser se apresentado como uma alternativa promissora. O objetivo deste trabalho foi avaliar a porosidade e a evolução microestrutural de camadas depositadas por manufatura aditiva pelos processos de deposição direta de energia e de fusão seletiva a laser visando aplicações em reparo ou manutenção preventiva de tubos de aço inoxidável do sistema pneumático de aeronaves. Os resultados mostraram que para o processo de fusão seletiva a laser, o aumento da resolução proporcionou menor porosidade e o aumento da potência do laser, melhor interação metalúrgica entre as camadas e o substrato. O processo com deposição direta de energia apresentou maior regularidade das últimas camadas depositadas, menor zona termicamente afetada entre a primeira camada depositada e o substrato, e menor porosidade, mesmo utilizando-se 0% de resolução e menor potência do laser, o que indica que o processo com deposição direta de energia foi mais eficiente. Para ambos os processos houve formação de crescimento epitaxial e a microestrutura do substrato foi austenítica.

Palavras chave: Manufatura aditiva a laser, Deposição direta de energia, Fusão seletiva a laser, Aço AISI 316, Aço AISI 347.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) atraiu muita atenção nos últimos dez anos devido às suas vantagens evidentes, como uma incomparável liberdade geométrica e curtos prazos de entrega (BAUFELD, *et al.*, 2010; KRANZ, *et al.*, 2015), além de fornecer um meio atrativo e econômico para reparar e produzir componentes de engenharia de alto valor agregado (WILSON, *et al.*, 2014), diminuindo o desperdício de metais caros (LIMA e SANKARÉ, 2014), e levando a um menor impacto ambiental (BAUFELD, *et al.*, 2010). É um processo onde não é necessária a troca de ferramentas durante a fabricação do componente, de forma que este é fabricado em um único equipamento, do início ao fim (VOLPATO, *et al.*, 2017).

Em contraste com os métodos de fabricação convencionais subtrativos, a manufatura aditiva a laser (LAM) é baseada em uma fabricação camada-a-camada usando o aquecimento fornecido por uma fonte de laser (EMMELMANN, *et al.*, 2013; LIMA e SANKARÉ, 2014). O ponto de partida para a fabricação da peça é um modelo CAD 3D que é criado em um computador, gerado por um método de imagem ou obtido por engenharia reversa (HERZOG, *et al.*, 2016; WILSON, *et al.*, 2014).

No processo de manufatura aditiva a laser com deposição direta de energia, (*Direct Energy Deposition* – DED), a peça é construída por meio da fusão da superfície e da aplicação simultânea de um pó metálico (DUREJKO, *et al.*, 2014; HERZOG, *et al.*, 2016), de forma que o laser funde as camadas sequenciais de uma camada previamente depositada sobre um dado substrato (LIMA e SANKARÉ, 2014). A poça de fusão formada é protegida contra a oxidação pelo assopramento

de argônio ou hélio, e o pó de metal é alimentado por um bico coaxial ou multi-injetor (FRAZIER, 2014), diretamente na região do feixe de laser focalizado (DUREJKO, *et al.*, 2014).

No processo de manufatura aditiva a laser por fusão de leito de pó metálico, também conhecido por fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting* – SLM), o laser irradia a superfície do leito de pó, percorrendo todas as regiões predefinidas no CAD, fundindo as partículas umas às outras e à camada anterior. Após a formação de uma camada, a plataforma de construção da peça desce, e uma nova camada de pó é distribuída na superfície do leito, sendo esse processo repetido camada a camada, até a obtenção da peça final. A atmosfera no interior da câmara é mantida com gás inerte para evitar a oxidação do material, e o pó não fundido é removido ao final do processo e pode ser reutilizado (VOLPATO *et al.*, 2017).

A manufatura aditiva induz tratamentos térmicos repetidos com altas taxas de resfriamento, levando a microestruturas possivelmente diferentes das obtidas no material convencional (BAUFELD, *et al.*, 2010; HERZOG, *et al.*, 2016), de forma que o material recém-depositado pode ter propriedades próximas ao material do substrato ou ser um composto completamente diferente (SHAHZAD, *et al.*, 2013). Isso ocorre porque, conforme as camadas são depositadas, ocorrem problemas metalúrgicos devido à extração de calor intermitente (LIMA e SANKARÉ, 2014), a qual é geralmente menor ao longo da estrutura de construção da peça do que próximo ao substrato, resultando em um engrossamento da microestrutura conforme aumenta a distância em relação ao substrato (MAJUMDAR, *et al.*, 2005). Dessa forma, a microestrutura das peças fabricadas por manufatura aditiva a laser é anisotrópica em relação à direção de construção, e muitas vezes revela uma textura mais ou menos pronunciada. Como consequência, as propriedades do sólido também são anisotrópicas e podem depender fortemente da orientação (CARROLL, *et al.*, 2015; THUIS, *et al.*, 2013).

Aliado a estes desafios metalúrgicos, apresentados pela manufatura aditiva a laser, encontram-se as tensões residuais, a rugosidade superficial, partículas não fundidas e poros, que são defeitos inerentes ao processo, e que afetam as propriedades mecânicas e em fadiga das peças. No entanto, a eliminação desses defeitos resulta em propriedades mecânicas melhoradas e valores comparáveis aos materiais moldados ou forjados (BRANDL, 2010; LEUDERS, *et al.*, 2013), que juntamente com as vantagens apresentadas, tornam o processo de manufatura aditiva promissor, ainda mais se combinado com tecnologias subtrativas, proporcionando a fabricação de peças com acabamento melhorado (VOLPATO, *et al.*, 2017).

O presente trabalho pretende contribuir para o estudo da formação de porosidades durante a manufatura aditiva a laser comparando-se as técnicas de pré-deposição de camadas (laser cladding) com a deposição direta de energia (DED). Serão investigadas, ainda, a questão do crescimento epitaxial e a extensão da zona termicamente afetada. É um estudo preliminar, pertencente a uma temática que visa a aplicação da manufatura aditiva a laser em reparos e manutenção preventiva de tubos de sistemas pneumáticos de aeronaves.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para entendimento do efeito dos parâmetros de processo na microestrutura e na porosidade, assim como dos fenômenos metalúrgicos envolvidos nos processos de manufatura aditiva por fusão seletiva a laser e com deposição direta de energia, foram depositadas camadas por ambos os processos, partindo-se de um substrato circular. Embora tenha sido realizada uma comparação entre ambos os processos, estes são completamente distintos e por isso não usaram-se os mesmos parâmetros.

Para a realização destes experimentos, utilizou-se o aço inoxidável AISI 347, como substrato, e o pó de aço inoxidável AISI 316, com granulometria de 44-106µm. A Tabela 1 mostra a composição química do aço AISI 347 utilizado como substrato, cujas dimensões foram de 38 mm de diâmetro e 5 mm de espessura.

Tabela 1 – Composição química (%) do aço AISI 347 utilizado como substrato.

C	Mn	Ni	S	Si	P	Cr	Nb
0,045	1,29	9,95	0,0018	0,42	0,021	17,43	0,73

2.1 Manufatura aditiva por fusão seletiva a laser

Para processamento de camadas por fusão seletiva a laser, utilizou-se um laser de fibra dopado com itérbio, marca IPG, modelo YLR-2000, instalado no laboratório da EFO-IEAv. Foram depositadas até 3 camadas com 1 mm de altura cada, com rotação da varredura do laser de 90° de uma camada em relação à outra. O controle da altura de cada camada foi realizado manualmente, por cálculo de densidade, colocando-se a quantidade em massa de pó equivalente a 1 mm de altura. Embora o processo SLM tradicional trabalhe com camadas abaixo de 50 µm, o processo utilizado permite trabalhar com camadas mais espessas, por fornecer maior energia.

Para definição dos parâmetros a serem configurados na deposição das camadas, foi realizado o estudo da influência dos parâmetros do laser, através da manufatura aditiva por fusão seletiva, sobre a regularidade das camadas, diluição, molhabilidade, porosidade e zona termicamente afetada (ZTA). Velocidade, potência, distância focal e resolução foram os parâmetros avaliados. A Tabela 2 resume o estudo de parâmetros realizado.

Em um substrato foram depositadas 3 camadas utilizando-se os parâmetros das condições 3 e 5, que utilizaram potência de 500W, velocidade de 500 mm/min, desfocalização de 12,2 mm em relação à superfície e resolução de 30%. Utilizou-se desfocalização de 12,2 mm para que o feixe tivesse 2 mm de diâmetro. Não utilizou-se fluxo de gás de arraste para evitar o assopramento do pó do leito. Devido à elevada porosidade das camadas depositadas, foram realizadas novas deposições em outro substrato, aumentando-se a resolução para 70%. Neste substrato foram depositadas 1, 2 e 3 camadas, para comparação da evolução microestrutural ao longo das camadas e em função da quantidade delas.

Tabela 2 – Estudo de parâmetros realizado pelo processo de fusão seletiva a laser.

Condição	Potência (W)	Velocidade (mm/min)	Distância Focal (mm)	Resolução (%)
1	350	500	no foco	30
2	350	500	desfocalizado 12,2 mm	30
3	500	500	desfocalizado 12,2 mm	30
4	200	500	desfocalizado 12,2 mm	30
5	500	500	desfocalizado 12,2 mm	30
6	350	500	desfocalizado 12,2 mm	30

2.2 Manufatura aditiva a laser com deposição direta de energia

Para processamento de camadas pelo processo de deposição direta de energia, utilizou-se uma impressora 3D a laser pertencente à empresa ROMI, cujo sistema foi montado em um centro de usinagem de 5 eixos DCM 620 5X [<http://www.romi.com/en/produtos/2836/>] com volume útil de 0.62 x 0.52 x 0.46 m³. O cabeçote do laser foi incorporado ao magazine das ferramentas e fornecido pela empresa Hybrid Manufacturing Technologies [www.hybridmanutech.com], modelo Ambit, juntamente com o aspersor de pó. O laser utilizado foi de fibra, dopado com itérbio. A taxa de fluxo dos gases de arraste e de proteção utilizado foi de 3l/min, a velocidade do cabeçote foi de 375 mm/min, a potência de 250W e a distância focal de 5 mm, sendo o diâmetro do foco de 1 mm. Foram produzidas 3 amostras, de forma que foram depositadas 1 camada no primeiro substrato, 2 camadas no segundo substrato e 3 camadas no terceiro, para comparação da evolução microestrutural ao longo das camadas e em função da quantidade delas. Cada camada foi constituída por 2 camadas de 0,5 mm de altura cada, com rotação da varredura do laser de 90° de uma em relação à outra. O objetivo de se fazer uma rotação de 90° entre as camadas em ambos os processos foi reduzir a anisotropia ao longo da direção de construção da peça, e promover melhor preenchimento entre cada caminho de varredura do laser, resultando em menor porosidade. O processo foi realizado sem sobreposição dos caminhos de varredura do laser, ou seja, resolução de 0%.

2.3 Análise microestrutural

Para análise microestrutural, foram retiradas amostras da seção transversal. As amostras foram cortadas em eletroerosão a fio e embutidas a frio. As amostras embutidas foram lixadas, passando-se por lixas de granulometrias de 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000 e 1200 mesh. O polimento foi realizado com a utilização de pastas de diamante de 6, 3 e 1 µm, respectivamente, e finalizado com suspensões de alumina de 0,3 e 0,05 µm, respectivamente. Posteriormente, as amostras foram submetidas a um ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%, aplicando-se um potencial de 6V por um período de 1 minuto, conforme indicado pela norma ASTM E407-99. As análises foram realizadas em microscópio óptico, da marca ZEISS, modelo Axion Image.A2m.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo de parâmetros realizado, indicado na Tabela 2, é mostrado na Figura 1 e a análise microestrutural da seção transversal de cada condição é apresentada na Figura 2. Como pode-se observar na Figura 1, a condição 4 não proporcionou ligação metalúrgica entre a camada depositada e o substrato, de forma que a camada desprende-se deste, o que indica que a potência utilizada, de 200W, foi baixa, não gerando interação suficiente do laser com o material. Os parâmetros utilizados na condição 2, reproduzidos na condição 6, mostraram que a potência também não foi suficiente para gerar uma boa ligação metalúrgica da camada com o substrato, o que é justificado pela formação de esferas que se desprenderam. Como pode-se observar na Figura 2, a condição 2 apresentou 1% de diluição, o que justifica a baixa ligação metalúrgica da camada depositada com o substrato. Não foi possível representar a seção transversal da condição 6, porque uma parte da camada desta se desprende durante corte, conforme pode ser observado na Figura 1. A condição 1 foi a que apresentou maior molhabilidade, no entanto, foi a que mais desperdiçou pó durante o processo, resultando em uma camada de apenas 0,5 mm de altura, sendo que o esperado era 1 mm. A condição 1 apresentou também uma elevada diluição, de 60%, sendo que o limite aceitável é de 3 a 5% (COSTA, et al., 2003), que é o necessário para a formação de ligação metalúrgica da camada com o substrato, sem formar um composto diferente do substrato, o que pode comprometer as propriedades mecânicas na interface da deposição. Já os parâmetros da condição 3, reproduzidos na condição 5, foram

os que resultaram em uma camada homogênea e com melhor ligação metalúrgica, de forma que as camadas não se desprenderam e apresentaram diluição de 4 e 3,5%, respectivamente, o que indica que a potência de 500 W proporcionou melhor interação do laser com o material para as condições utilizadas. Dessa forma, devido aos melhores resultados apresentados para as condições 3 e 5, os seus parâmetros foram escolhidos para deposição das camadas por fusão seletiva a laser. Para cálculo da diluição, utilizou-se a fórmula $D = \frac{A_{DIL}}{A_{CLAD} + A_{DIL}} \times 100$, sendo A_{DIL} a área diluída, e A_{CLAD} a área da seção transversal da camada pré-depositada (*cladd*) (COSTA, et al., 2003). As áreas foram medidas com auxílio da ferramenta *Image J*.

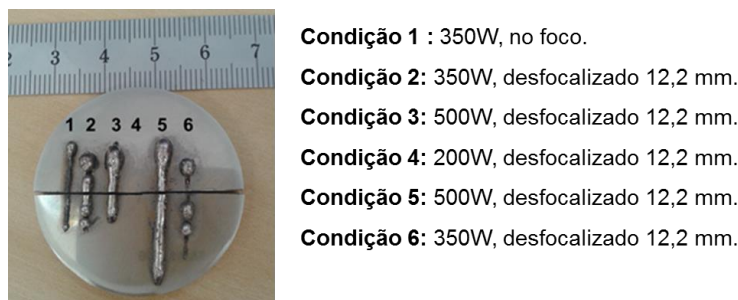


Figura 1 – Parametrização feita pelo processo de fusão seletiva a laser.

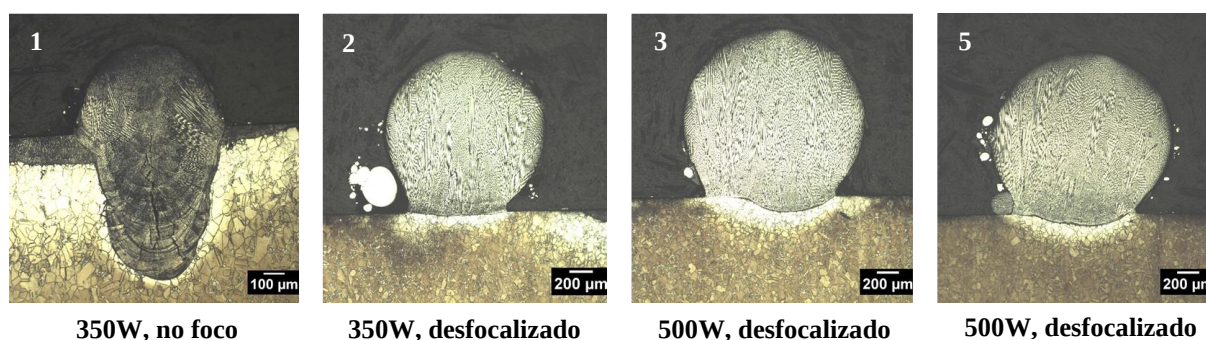


Figura 2 – Análise microestrutural da seção transversal das deposições resultantes do estudo de parâmetros.

As Figuras 3 e 4, referentes a três regiões distintas da seção transversal de cada amostra, apresentam as microestruturas das camadas depositadas por fusão seletiva a laser com 30 e 70% de resolução, respectivamente, de forma que na Figura 3 cada região, representada pelos itens a), b) e c), é referente a três camadas depositadas e, na Figura 4, cada região, representada pelos itens a), b) e c), é referente a três, uma e duas camadas depositadas, respectivamente. Observa-se que com resolução de 30%, a porosidade foi elevada. Aumentando-se a resolução para 70%, a porosidade diminuiu devido à aproximação entre os centros dos caminhos de varredura do laser, diminuindo-se os espaços vazios, mas apesar da redução da porosidade, esta ainda continuou presente. Observa-se também, em ambos os casos, uma microestrutura austenítica para o substrato, condizente com a composição química do aço AISI 347, e dendrítica para as camadas depositadas, o que indica que o pó fundiu e foi rapidamente resfriado. Nota-se também, para ambos os casos, uma região intermediária entre as camadas depositadas indicando que houve refusão das camadas anteriores, que ocorreu devido à elevada energia do laser que ao fundir a camada de pó acima depositada, fundiu novamente parte da camada anterior que já estava solidificada. Apesar do controle da altura de cada camada, esta foi superior a 1 mm, o que é justificado pelo coalescimento das camadas depositadas. Este coalescimento ocorre devido à presença de um volume de pó solto ao redor do volume líquido durante a fusão do material, de forma que este volume de pó é atraído para a região líquida, resultando no aumento da altura da camada.

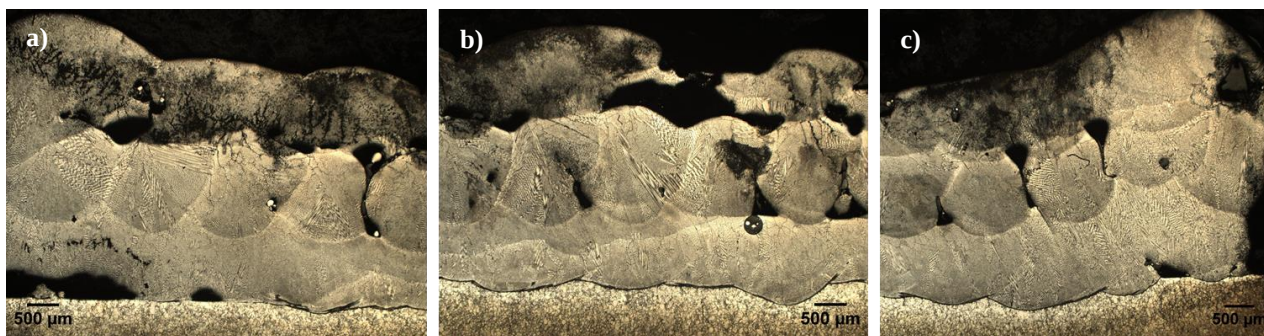


Figura 3 – Análise microestrutural da seção transversal da amostra com camadas depositadas por fusão seletiva a laser, com 30% de resolução. a) Região 1; b) região 2; c) região 3.



Figura 4 – Análise microestrutural das camadas depositadas por fusão seletiva a laser, com 70% de resolução. a) Região com 3 camadas depositadas; b) região com 1 camada depositada; c) região com 2 camadas depositadas.

Para as amostras obtidas por manufatura aditiva a laser com deposição direta de energia, Figura 5, observa-se uma microestrutura austenítica para o substrato e com dendritas finas para as camadas depositadas. Comparado às amostras produzidas por fusão seletiva, as amostras produzidas por deposição direta de energia apresentaram menor ZTA entre a primeira camada depositada e o substrato, maior regularidade das últimas camadas depositadas e menor porosidade, mesmo utilizando laser com uma potência menor e sem sobreposição dos caminhos de varredura, o que indica que o processo com deposição direta de energia foi mais eficiente. Observa-se também que a porosidade e a quantidade de partículas de pó não fundidas diminuem conforme aumenta-se a quantidade de camadas depositadas, o que é proporcionado pelo processo de refusão das camadas anteriores. Ao contrário do que ocorreu no processo de fusão seletiva, as camadas apresentaram altura de 1 mm, conforme planejado, porque o tempo de voo das partículas do pó é muito curto, de forma que o pó chega fundido na peça, evitando com que ocorra coalescimento das camadas. Os melhores resultados encontrados para este processo são justificados pela melhor distribuição de pó sobre o substrato e melhor aproveitamento da energia do laser incidido sobre o sistema, já que o processo aplica o pó sobre o substrato ao mesmo tempo que o laser os funde.



Figura 5 – Análise microestrutural das camadas depositadas por deposição direta de energia: a) amostra com 1 camada depositada; b) amostra com 2 camadas depositadas; c) amostra com 3 camadas depositadas.

De acordo com a Figura 6, observa-se que houve epitaxia para ambos os processos. A epitaxia é caracterizada pela continuidade da estrutura cristalina do substrato em relação ao material depositado (VOLPATO, et al., 2017) e está relacionada ao gradiente térmico e à velocidade de crescimento do grão (GÄUMANN, et al., 1999). Ela indica presença

de ligação da camada depositada em relação ao substrato, o que é de extrema importância. As linhas concêntricas, observadas na Figura 6-b), são típicas de frentes de solidificação que avançam em ondas ao invés do padrão constante, e ocorre devido à entalpia de solidificação (LIMA e SANKARÉ, 2014).

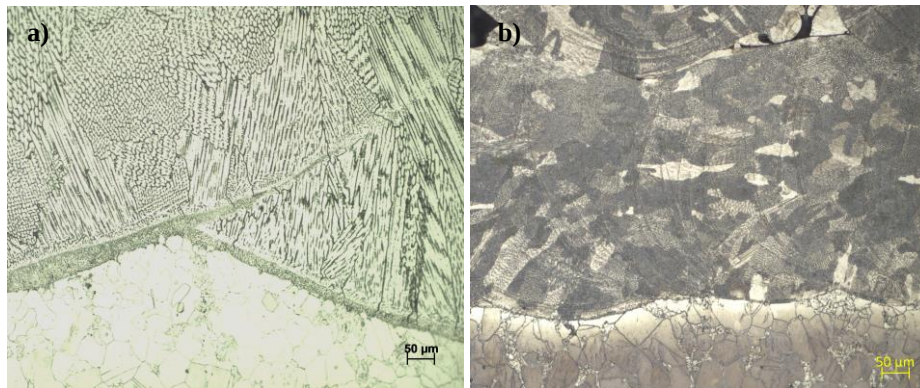


Figura 6 – Região de transição entre substrato e camada depositada: a) processo por fusão seletiva a laser; b) processo por deposição direta de energia.

3. CONCLUSÕES

Conclui-se que para o processo de fusão seletiva a laser, houve redução da porosidade ao aumentar-se a resolução de 30% para 70%, pois aumentando-se a resolução, aumenta-se a sobreposição dos caminhos de varredura do laser, reduzindo-se os espaços vazios entre eles. Quanto maior a potência do laser, melhor é a ligação metalúrgica das camadas com o substrato, devido à maior interação do laser com o material irradiado. Para o processo com deposição direta de energia, houve uma maior regularidade das últimas camadas depositadas, menor ZTA entre a primeira camada depositada e o substrato, e menor porosidade, mesmo utilizando-se 0% de resolução e menor potência do laser, o que indica que o processo com deposição direta de energia foi mais eficiente. A melhor distribuição de pó sobre o substrato e o melhor aproveitamento da energia do laser incidido sobre o sistema, proporcionados pelo processo com deposição direta de energia, conferiram-lhe os melhores resultados apresentados. Para ambos os processos houve formação de epitaxia, a microestrutura do substrato foi austenítica e a das camadas depositadas foi dentrítica, e não houve transformação de fase na ZTA e na região diluída. Deve-se testar novos parâmetros de processo, com o objetivo de se reduzir a porosidade entre as camadas depositadas, o que irá impactar nas propriedades mecânicas e em fadiga de reparos de tubos de sistemas pneumáticos realizados por manufatura aditiva a laser.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa ROMI pela colaboração com a realização da manufatura aditiva a laser em sua impressora 3D, ao apoio financeiro do processo nº 2016/11309-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), e à CAPES pela bolsa de doutorado.

5. REFERÊNCIAS

- BAUFELD, B., BIEST, O. V. e GAULT, R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties. *Materials and Design*. 31 (2010) S106–S111.
- BRANDL, E. *Microstructural and Mechanical Properties of Additive Manufactured Titanium (Ti-6Al-4V) Using Wire*, PhD thesis, TU Cottbus, 2010.
- CARROLL, B.E., PALMER, T. A. e BESSE, A. M. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Mater*. 87 (2015) 309-320.
- COSTA, L., FELD, I., RÉTI, T., KÁLAZI, Z., COLAÇO, R., VILAR, R., VERO, B. A Simplified Semi-Empirical Method to Select the Processing Parameters for Laser Clad Coatings. *Materials Science Forum*. Vols. 414-415 (2003) p. 385-393.
- DUREJKO, T., ZIETALA, M., POLKOWSKI, W. e CZUJKO, T. Thin wall tubes with Fe3Al/SS316L graded structure obtained by using laser engineered net shaping technology. *Materials and Design*. Vol. 63. p. 766–774. 2014.
- EMMELMANN, C., KRANZ, J., HERZOG, D. e WYCISK, E. Laser additive manufacturing of metals, in: V. Schmidt, M.R. elegtratis (Eds.), *Laser Technology in Biomimetics*, Springer, Heidelberg, 2013. p.143-161.
- FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: a review. *J. Mater. Eng. Perform*. Vol. 23. p. 1917-1928. 2014.
- GAUMANN, M., HENRY, S., CLETON, F., WAGNIERE, J-D. e KURZ, W. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation. *Mat Sci Eng*. 1999; A271:232–41.

- HERZOG, D., SEYDA, V., WYCISK, E. e EMMELMANN, C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 117 (2016) 371-392.
- KRANZ, J.; HERZOG, D. e EMMELMANN, C. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4, *Journal of Laser Applications*. Vol. 27 (2015).
- LEUDERS, S., THÖNE, M., RIEMER, A., NIENDORF, T., TRÖSTER, T., RICHARK, H. A. e MAIER, H. J. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: fatigue resistance and crack growth performance. *Int. J. Fatigue*. 48 (2013) 300-307.
- LIMA, M. S. F. e SANKARÉ, S. Microstructure and mechanical behavior of laser additive manufactured AISI 316 stainless steel stringers. *Materials and Design*. Vol. 55. p. 526–532. 2014.
- MAJUMDAR, J.D., PINKERTON, A., LIU, Z., MANNA, I., LI, L. Microstructure characterisation and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel. *Appl. Surf. Sci.* Vol. 247. 2005. p. 320-327.
- SHAHZAD, K., DECKERS, J., KRUTH, J. P. e VLEUGELS, J. Additive manufacturing of alumina parts by indirect selective laser sintering and post processing. *J Mat Process Technol*. 213:1484–94. 2013.
- THIJS, L., MONTERO, S., SISTIAGA, M. L., WAUTHLE, R., XIE, Q., KRUTH, J. P. e HUMBEECK, J. van. Strong morphological and crystallographic texture and resulting yield strength anisotropy in selective laser melted tantalum. *Acta Mater*. 61 (2013) 4657-4668.
- VOLPATO, N., MUNHOZ, A.L.J., COSTA, C.A., AHRENS, C.H., de CARVALHO, J., dos Santos, J.R.L., da SILVA, J.V.L., FOGGIATTO, J.A. e LIMA, M.S.F. *Manufatura Aditiva – Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D*. 1ª ed. 400p. 2017.
- WILSON, J. M., PIYA, C., SHIN, Y.C., ZHAO, F., RAMANI, K. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production*. 80 (2014) 170-178.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EVALUATION OF THE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF LAYERS DEPOSITED BY ADDITIVE LASER MANUFACTURING PROCESSES

Abstract. The failures in service of pneumatic parts welded by the arc welding process led to new developments of repairs, with the additive laser manufacturing process showing as a promising alternative. The aim of this work was to evaluate the porosity and microstructural evolution of the layers deposited by additive manufacturing using laser cladding and direct energy deposition (DED) for applications in repair or preventive maintenance of stainless steel tubes of the aircraft pneumatic system. The results showed that in laser cladding, the increase of the resolution provided lower porosity and increased laser power provided better metallurgical bonding between the layers and the substrate. DED presented a higher regularity of the last deposited layers, lower heat-affected zone between the first deposited layer and the substrate, and lower porosity, even using 0% resolution and a lower laser power, which indicates that DED was more efficient. For both processes, there was epitaxial growth and the microstructure of the substrate was austenitic.

Keywords: Laser additive manufacturing, direct energy deposition, selective laser metal, AISI 316 steel, AISI 347 steel.

RESPONSIBILITY NOTICE

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