



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE DISPOSITIVOS PARA MANUFATURA ADITIVA DE COMPONENTES DE PEQUENAS DIMENSÕES

Palavras-Chave: MANUFATURA ADITIVA, LIGAS DE TITÂNIO, MICROESTRUTURA

Autores:

BRUNO MONTEIRO BONETTI, FEM – UNICAMP

Prof. Dr. RUBENS CARAM JUNIOR (orientador, FEM – UNICAMP)

Dr. JOÃO FELIPE QUEIROZ RODRIGUES (coorientador, FEM – UNICAMP)

INTRODUÇÃO:

No contexto da indústria metalúrgica, sabe-se que são empregados diferentes tipos de processos na fabricação de produtos metálicos. Dentre os processos mais utilizados encontram-se a conformação plástica, a usinagem e a fundição. Recentemente, uma das técnicas que mais tem ganhado atenção e desenvolvimento é a manufatura aditiva, popularmente conhecida como “Impressão 3D” (BERMAN, 2012).

No âmbito da manufatura aditiva, a técnica de Fusão a Laser em Leito de Pó (FALP) é uma das mais disseminadas. Nesse processo, uma fina camada de pó metálico de espessura controlada é colocada sobre uma área de trabalho e, posteriormente, os pó são fundidos ou sinterizados por meio de uma fonte de calor. Essa fonte de calor deve ser precisa e concentrada, geralmente, utilizando um feixe de raios lasers ou elétrons. Em seguida, uma nova camada de pó é adicionada, e o processo é repetido (DEBROY, WEI, et al., 2018; FRAZIER, 2014; SAMES, LIST, et al., 2016). A quantidade de pó metálico utilizada em cada impressão é determinada pela área de trabalho onde o pó é depositado (DUTTA e FROES, 2016) e pela altura do objeto. Isso torna desafiador a realização de experimentos com amostras de pequenas dimensões em uma máquina de manufatura aditiva, pois muito material será desperdiçado pela grande área de trabalho de máquinas convencionais.

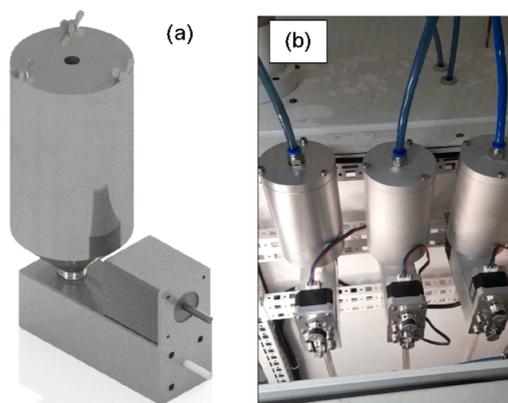
Dentre os pó metálicos mais utilizados no processo de manufatura aditiva, estão aqueles obtidos a partir de ligas de titânio. Algumas das principais vantagens do uso destas ligas são: baixa densidade, alta resistência específica, resistência à corrosão e biocompatibilidade. A mais popular das ligas de titânio é a Ti-6Al-4V, fortemente presente na indústria aeroespacial e em aplicações biomédicas (HAO, et al., 2016).

Portanto, o objetivo deste trabalho é modificar um equipamento de fusão a laser em leito de pó para possibilitar a produção de componentes de ligas de Ti em tamanhos reduzidos e com menor consumo de matéria-prima. Em particular, pretende-se reduzir a área de trabalho de 160 mm de diâmetro para duas outras bases com diâmetros de 74 mm e 29 mm. Após o desenvolvimento de dispositivos específicos adaptados aos componentes de pequenas dimensões, pretende-se produzir amostras da liga Ti-6Al-4V (LEYENS e PETERS, 2003; LÜTJERING e WILLIAMS, 2003) e caracterizar propriedades físicas e mecânicas dessas amostras.

METODOLOGIA:

Na primeira etapa da adaptação do equipamento de fusão em leito de pó às pequenas dimensões, foram projetados componentes, tanto as novas bases quanto os novos dispositivos de armazenamento e deposição de pós (*hoppers*). Os *hoppers* são constituídos de diversas partes, sendo: o fuso (responsável por transportar o pó da área de armazenamento até a mangueira de saída), o mancal (para suportar e permitir a rotação do fuso), os acoplamentos (entrada de argônio e saída de pó) e o silo de pó. Após a conclusão da modelagem, foram detalhados os componentes para a fabricação por usinagem. Foram construídos três conjuntos, possibilitando a utilização de três pós metálicos distintos, de maneira individual ou concomitante.

Figura 1. Sistema de alimentação de pós metálicos (*hoppers*): (a) projeto do componente e (b) componente construído.



No sistema de alimentação de pós foram utilizados motores de passo controlados eletronicamente. Cada um dos três *hoppers* possui um motor de passo modelo NEMA 17, um driver DRV8825, Arduino® modelo UNO R3, fonte de energia elétrica e placa de circuito impresso. O Arduino® envia sinais pré-programados ao driver, que energiza e gira o motor de passo na velocidade e posição desejadas. O motor impulsiona o fuso por meio de correias dentadas para transferir o pó do silo até o acoplamento de saída. Além disso, o sistema possui uma interface homem-máquina (IHM) em linguagem C# para facilitar a comunicação entre o operador e a máquina.

Com os sistemas prontos, tornou-se possível realizar a impressão de amostras de pequenas dimensões da liga Ti-6Al-4V com baixo volume de matéria-prima. Para produção das peças, utilizou-se um laser FB:YAG com potência de 210W, velocidade de varredura de 700 mm/s, espaçamento entre varreduras de 80 μm e espessura da camada de 30 μm .

Em seguida, foram iniciadas as caracterizações das ligas na condição obtida diretamente do processo produtivo, definida como as *built*, e após tratamento térmico. O tratamento térmico foi realizado a 900°C por 10 min, em forno resistivo com taxa de aquecimento de 10°C/min, e resfriamento em água. A primeira análise foi a medição da densidade dos corpos de prova, por meio do método de Arquimedes, utilizando-se balança de precisão Gehaka BK400 com kit de densidade acoplado e aplicando-se a equação (1).

$$d_s = \left(\frac{m_s}{m_s - m_i} \right) d_l \quad (1)$$

Onde d_s é a densidade do sólido, d_l é a densidade do líquido utilizado (em g/cm^3), m_s é a massa do sólido fora do líquido e m_i é a massa do sólido imerso no líquido.

A segunda análise tinha como objetivo verificar as fases presentes na amostra impressa. Para tal, utilizou-se o método da difração de raios X (DRX) em um equipamento PANalytical modelo X'Pert Pro operando com uma tensão de 40 kV, corrente de 30 mA e ângulo de varredura de 30 a 90 graus. A avaliação microestrutural foi realizada por microscopia eletrônica de varredura, em equipamento Hitachi modelo TM-1000, equipado com detector de elétrons retroespalhados.

A caracterização mecânica foi realizada por meio de medidas de ensaios de microdureza Vickers e de compressão. Para tais análises, usou-se microdurômetro Buehler e a máquina universal de ensaios mecânicos EMIC modelo DL2000, respectivamente. No ensaio de microdureza, utilizou-se carga de 500 gf e tempo de indentação de 15 segundos, realizando-se uma média entre 12 medições. No ensaio de compressão utilizou-se velocidade de avanço de 0,01667 mm/s, célula de carga de 30 kN, comprimento do corpo de prova de 4 mm, o diâmetro do corpo de prova de 2 mm, e a taxa de deformação (dada pelo quociente entre velocidade de avanço e o comprimento do corpo de prova) de $4,1675 \times 10^{-3} s^{-1}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Utilizando as bases e os *hoppers* projetados, foram impressas diversas amostras para análise. Na figura 2, é possível observar-se um exemplo de corpos de prova impressos com pós de ligas de titânio, possibilitada pela configuração desenvolvida.

Figura 2. Base de 29 mm de diâmetro e peças produzidas em ligas de titânio.



Por meio da equação (1), foi possível determinar uma densidade de $4,32 g/cm^3$ para a liga Ti-6Al-4V estudada. Para aferir as fases presentes na amostra foram obtidos padrões de difração de raios-X que relacionam a intensidade dos picos difratados com os ângulos de difração. A partir da figura 3, é possível identificar padrões da fase α do titânio, que possui uma estrutura cristalina hexagonal compacta, tanto na amostra *as built* como na amostra que fora feito o tratamento térmico (T.T.).

Na Figura 4 são exibidas as imagens das microestruturas das amostras *as built* e tratada termicamente a $900^\circ C$. A amostras *as built* apresentou microestrutura martensítica indicada pelo padrão *basketweave* característicos da fase α' do titânio, obtida em resfriamentos rápidos a partir do campo β (LEYENS, PETERS, 2003). Há também evidências da retenção da fase β em baixa fração volumétrica. A amostra tratada apresentou microestrutura semelhante.

Figura 3. Difratograma de raios-x da amostra *as built* e da amostra após tratamento térmico.

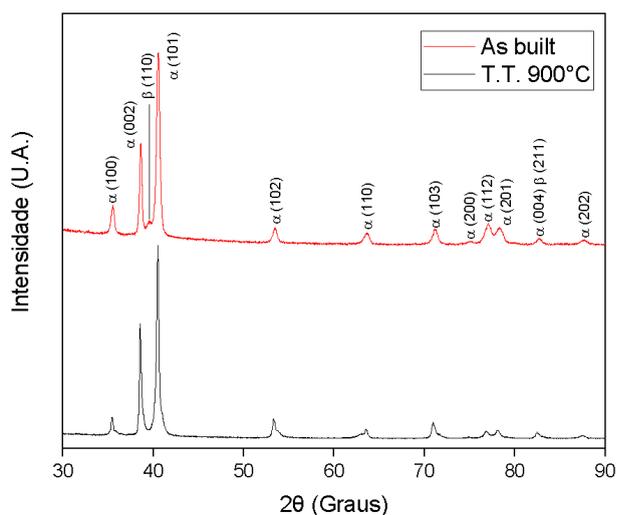
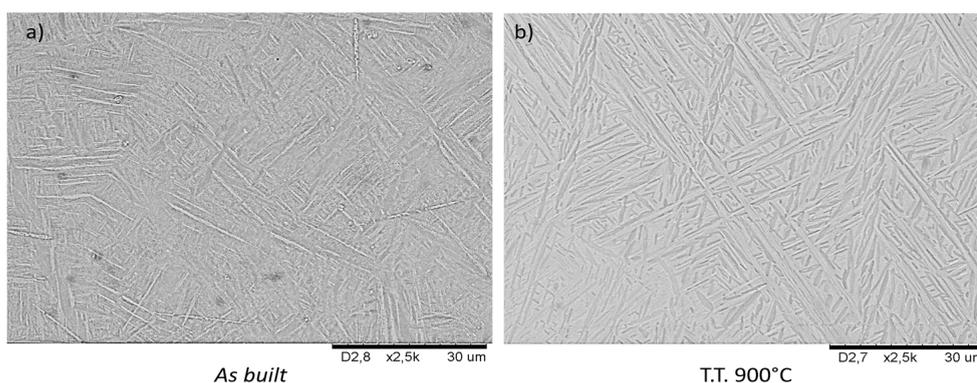
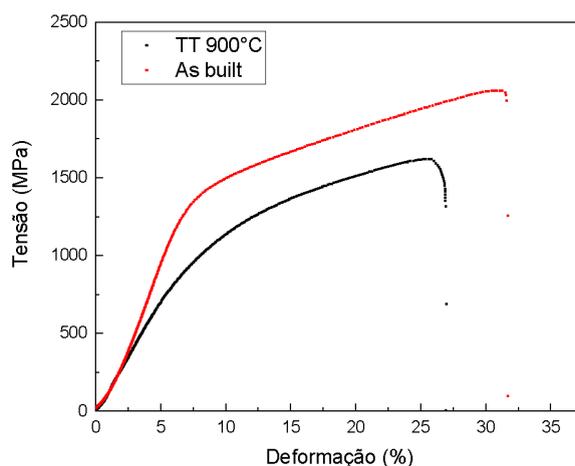


Figura 4. Imagens obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura: (a) *as built* e (b) com tratamento térmico a 900°C por 10 min, e resfriamento em água.



Quanto à caracterização mecânica, o valor de dureza Vickers encontrado para a amostra *as built* foi de $413,5 \pm 13,2$ HV e para a amostra tratada de $351,4 \pm 11,5$ HV. Esses valores encontrados se mostram distintos daqueles observados por Imam e Gilmore (1983), em que houve aumento na microdureza ao realizar o mesmo tratamento térmico. Já para os ensaios de compressão realizados, notou-se redução na resistência mecânica, registrando valores de 2061 MPa para a amostra *as built* e 1620 MPa para a amostra submetida a tratamento térmico. Além disso, foi constatada redução na deformação, de 31% para 26% nas amostras *as built* e tratadas termicamente, respectivamente. Sugere-se que um alívio de tensões ocorreu durante o tratamento térmico, reduzindo a tensão máxima de compressão.

Figura 5. Gráfico de tensão (MPa) x deformação (%) das amostras *as built* e após tratamento térmico.



CONCLUSÕES:

O objetivo de reduzir a área de trabalho e de adaptar os outros dispositivos da máquina de manufatura aditiva para a impressão de componentes de pequenas dimensões foi alcançado e amostras comparáveis às encontradas na literatura puderam ser reproduzidas. Também, é possível concluir que um menor volume de matéria prima é utilizado a cada impressão, economizando recursos e, por conta da construção de três *hoppers* independentes, agora podem ser utilizados três pós metálicos distintos, individual ou simultaneamente. No que se refere ao tratamento térmico realizado, notou-se que o processo de manufatura aditiva utilizado já confere às amostras *as built* propriedades mecânicas interessantes.

BIBLIOGRAFIA

- BERMAN, B. "3-D Printing: The New Industrial Revolution", **Business Horizons**, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012. .
- DEBROY, T., WEI, H. L., ZUBACK, J. S., et al. "Additive Manufacturing of Metallic Components – Process, Structure and Properties", **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112–224, 2018. .
- DUTTA, B., FROES, F. H. **Additive Manufacturing of Titanium Alloys: State of the Art, Challenges and Opportunities**. 1a. Ed. ed. [S.l.], Elsevier Inc., 2016. v. 1.
- FRAZIER, W. E. "Metal Additive Manufacturing: A Review", **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, n. 6, p. 1917–1928, 2014. .
- LEYENS, C., PETERS, M. **Titanium and Titanium Alloys**. 1a. Ed. ed. [S.l.], Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2003.
- LÜTJERING, G., WILLIAMS, J. C. **Titanium**. 1a. Ed. ed. [S.l.], Springer-Verlag Press, 2003.
- HAO, YL., LI, SJ. & YANG, R. **Biomedical titanium alloys and their additive manufacturing**. *Rare Met.* 35, 661–671 (2016).
- IMAM, M.A., GILMORE, C.M. **Fatigue and microstructural properties of quenched Ti- 6Al- 4V**. *Metall Trans A* 14, 233–240 (1983).