

Caracterização de corpos de prova fabricados em Ti6Al4V nas tecnologias de manufatura aditiva EBM e DMLM

Bolsista Paulo Inforçatti Neto (CTI) paulo.inforcatti@cti.gov.br

Resumo

As tecnologias de manufatura aditiva em metal, cada vez mais vêm sendo utilizadas em diferentes áreas do conhecimento dentre essas: saúde, aeroespacial, automobilística e outras; entretanto ainda há muitos questionamentos sobre as propriedades das peças fabricadas com essas tecnologias em comparação com os métodos convencionais de fabricação baseados em técnicas subtrativas. Dessa forma, o presente trabalho buscou avaliar algumas propriedades mecânica e estrutural de peças construídas através das tecnologias EBM (Electron Beam Melting) e DMLM (Direct Metal Laser Melting) por meio de ensaios de tração e metalográfico.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, EBM, DMLM, Metal, Ensaio de tração, Metalografia.

1. Introdução

A manufatura aditiva (MA) é segundo [1], o termo geral para aquelas tecnologias que são baseadas na criação de modelos físicos a partir de geometrias 3D com base na deposição sucessiva de camadas de material. Estas tecnologias se distinguem pela forma da matéria prima e o agente de processamento dessa, sendo este agente a ser analisado em pó metálico fundido por feixe de elétrons (Electron Beam Melting – EBM) e laser de fibra de alta densidade de energia (Direct Metal Laser Melting – DMLM).

As tecnologias a serem analisadas, apesar de ambas envolverem a fundição de pó metálico, apresentam características únicas que as diferem, como fonte de energia, ambiente de construção e padrão de varredura. Assim as peças produzidos nas diferentes tecnologias apresentam propriedades mecânicas e microestruturais diferentes entre si.

1.1. DMLM

Na tecnologia DMLM a fonte de energia para a fusão do material é um laser de fibra de itérbio (Yb). Nesta tecnologia, o processo de impressão é feito em uma câmara controlada com gás inerte para diminuir a presença de oxigênio minimizando o processo de oxidação do material [2].



Normalmente, a tecnologia DMLM opera com laser de onda contínua monomodo com uma área de incidência (foco) que normalmente varia entre 15um e 180um dependendo do sistema e calibração do equipamento de manufatura utilizado [3]. Dessa forma, uma fina camada do material é espalhada sobre uma plataforma de construção por um sistema mecânico denominado recoater e posteriormente o feixe de laser incide sobre este pó depositado fundindo o material da camada de acordo com a geometria da peça. Sequencialmente, a plataforma de construção se desloca no sentido negativo do eixo Z, dando origem a próxima camada [4]. Estes passos se repetem até a conclusão da peça.

1.2. EBM

Na tecnologia EBM, a energia para fusão do material é provida por um feixe de elétrons produzido pela passagem de corrente elétrica por filamento de tungstênio. Duas bobinas magnéticas controlam o feixe, sendo uma para o controle do diâmetro do foco do feixe e outra para deslocamento do feixe no plano x-y da plataforma de construção [5]. Nesta tecnologia o processo de fabricação ocorre em atmosfera controlada à vácuo com injeção de pequenas quantidades de hélio ao longo do processo a fim de manter o controle do material dentro da câmara de processo.

Nesta tecnologia, o processo de manufatura consiste em espalhar o material sobre uma plataforma de construção metálica por meio de um espalhado denominado rake. Posteriormente, o feixe de elétrons incide com baixa energia sobre a superfície do pó depositado, pré-sinterizando o material a fim de minimizar o efeito de estresse térmico durante o processo de fabricação [6]. Dessa forma, o feixe de elétrons incide novamente sobre regiões específicas conforme a geometria da peça a ser fabricada e assim, a mesa é deslocada no sentido negativo do eixo Z dando origem a próxima camada. Estes passos se repetem até a conclusão da peça.

Tabela 1: Informações técnicas das tecnologias EBM e DMLM.

	Mlab Cusing 200R Concept Laser	Arcam Q10plus
Atmosfera de construção	Inerte	Vácuo
Pré heat	N/A	Por varredura do feixe
Máxima potência (W)	200	3.000
Diâmetro do feixe (μm)	75	140
Espessura de camada (μm)	15-30	50
Velocidade de varredura (m/s)	7	8.000
		

2. Materiais e métodos

Com a finalidade de avaliar e comparar os resultados das peças fabricadas nas diferentes tecnologias EBM e DMLM, foram planejados e realizados ensaios de tração e metalografia.

Para a impressão 3D das peças, foram utilizados para ambas tecnologias os equipamentos de MA da empresa Ge Additive, sendo para EBM o modelo Arcam Q10 Plus e DMLM o modelo Concept Laser Mlab Cusing 200R. A matéria-prima utilizada foi a liga Ti6Al4V atomizado à plasma e homologada pelo fabricante sendo sua granulometria média para a tecnologia EBM de 45 à 100 μm [7] e para a tecnologia DMLM de 10 à 45 μm [8]. Para as caracterizações, foram utilizados os equipamentos DL 3000 da empresa EMIC com capacidade de carga de 30kN e célula de carga de 20kN para ensaios de tração e para ensaios metalográficos foram utilizados

equipamentos de fabricação BUEHLER como uma máquina IsoMet 4000 para corte de precisão, o equipamento SimpliMet 1000 para o embutimento das peças e a AutoMet 250 para lixamentos e polimento das peças. Após o polimento, os corpos de prova para metalografia foram analisados utilizando-se um microscópio óptico Axio Observer Z1 de fabricação ZEISS.

Para a impressão das peças em Ti6Al4V nas tecnologias EBM e DMLM foram utilizados os parâmetros recomendados pelo fabricante conforme *Figura 1 a e b* respectivamente.

Properties	
Manual Speed	4530 mm/s
Manual Current	15 mA
Max current	30 mA
Focus offset	36 mA
Speed function	60

Properties	
Line offset	0.2 mm
Hatch depth	0.05 mm

a)

Power	180 W	Focus move	0 mm
Speed	1250 mm/s	Offset to original contour	0.0825 mm
Trace spacing	0.105 mm		

b)

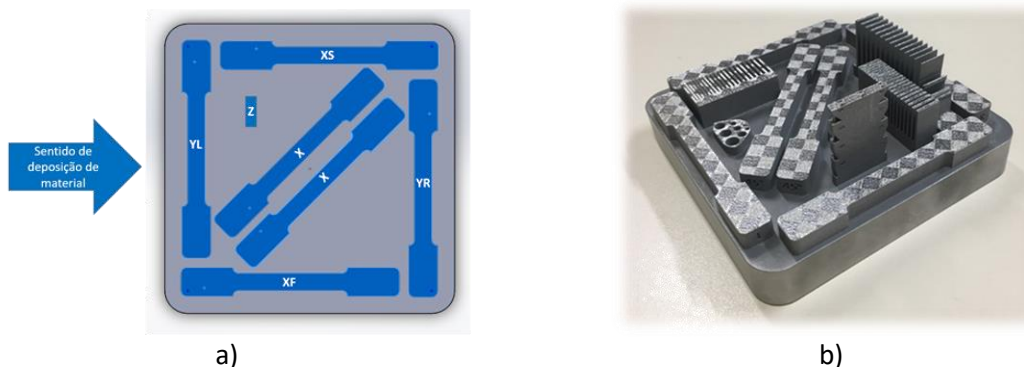
Figura 1: Parâmetros de varredura (Hatch). a) EBM versão Melt 5.2.23. b) DMLM CL 41_2DCUSING 200S_ar_V1_4417G04013.

Os métodos para execução da atividade incluíram uso de estratégias de DOE (Design Of Experiments ou Planejamento Experimental) para estruturação de testes de parâmetros, bem como definição de procedimentos padronizados e eventuais corpos de prova fundamentados em norma, sempre que disponível, para comparações de processos. Foram utilizados padrões de ensaios de tração e metalografia para a caracterização com o apoio do laboratório LNLS no CNPEM.

2.1. Ensaios de tração

Esses ensaios são caracterizados por testes destrutivos que utilizam um corpo de prova composto do mesmo material da estrutura. Os corpos de provas utilizados para a realização dos ensaios de tração foram do tipo gravata, dimensionados através da norma ASTM E8 E8M-11 e adequados de acordo com a máquina de ensaio de tração utilizada e fabricados através de manufatura aditiva em Ti6Al4V pelas tecnologias EBM e DMLM.

Os corpos de prova foram identificados de acordo com o posicionamento na plataforma de construção das máquinas seguindo o padrão Right (R), Left (L), Front (F) e Side (S), posicionados nos eixos X, Y e Z (vertical) de acordo com a *Figura 2*. Embora as plataformas de construção para as tecnologias EBM e DMLM sejam diferentes em dimensões, a nomenclatura adotada foi a mesma para validação e comparação nos ensaios realizados.



a)

b)

Figura 2: Disposição dos corpos de prova na plataforma de construção. a) Identificação. b) Impressão em DMLM.

2.2. Metalografia

A próxima etapa de caracterização dos corpos de prova produzidos nas tecnologias em análise envolve o estudo morfológico e estrutural das estruturas fabricadas com manufatura aditiva. Realizaram-se então ensaios metalográficos comparando-se ligas Ti6Al4V fabricados com as tecnologias EBM e DMLM.

Uma vez que as tecnologias de manufatura aditiva utilizadas se caracterizam pela construção de peças a partir da deposição de material por camadas, buscou-se avaliar a estrutura metalográfica dos metais a partir corpos de prova cortados em planos diferentes, conforme *Figura 3*, lixamento, polimento e ataque químico respectivamente.

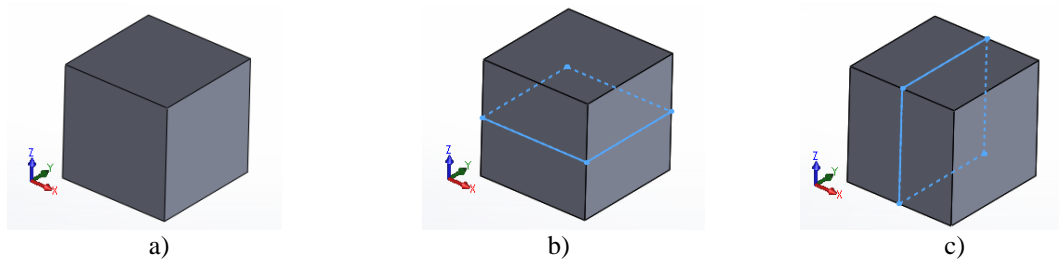


Figura 3: a) Modelo original. b) Corte horizontal. c) Corte vertical.

3. Resultados

3.1. Ensaios de tração:

O primeiro ensaio realizado foi com a liga de Ti6Al4V construído através da tecnologia EBM. Uma das questões iniciais do projeto era saber se a rugosidade interferia na resistência mecânica das peças, e se através da rugosidade algum ponto de ruptura pudesse surgir, além de saber se o posicionamento de construção influenciava também em suas propriedades mecânicas.

Assim, os primeiros ensaios foram realizados com corpos de provas usinados e não usinados, com a finalidade de avaliar a influência do pós-processo de usinagem para acabamento superficial do corpo de prova conforme *Figura 4*.

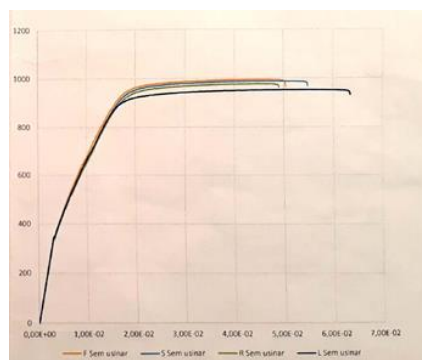


Figura 4: Resultados ensaio de tração, Ti6Al4V em EBM.

Originalmente os corpos de prova em Ti6Al4V por DMLM foram dimensionados com uma seção de deformação de 36mm², entretanto, o limite de força da máquina de tração foi atingido sem que os corpos de prova fossem rompidos. Assim para que eles não fossem desperdiçados, optou-se pela sua usinagem de forma a diminuir sua espessura. Os resultados dos ensaios podem ser vistos *Figura 5*.

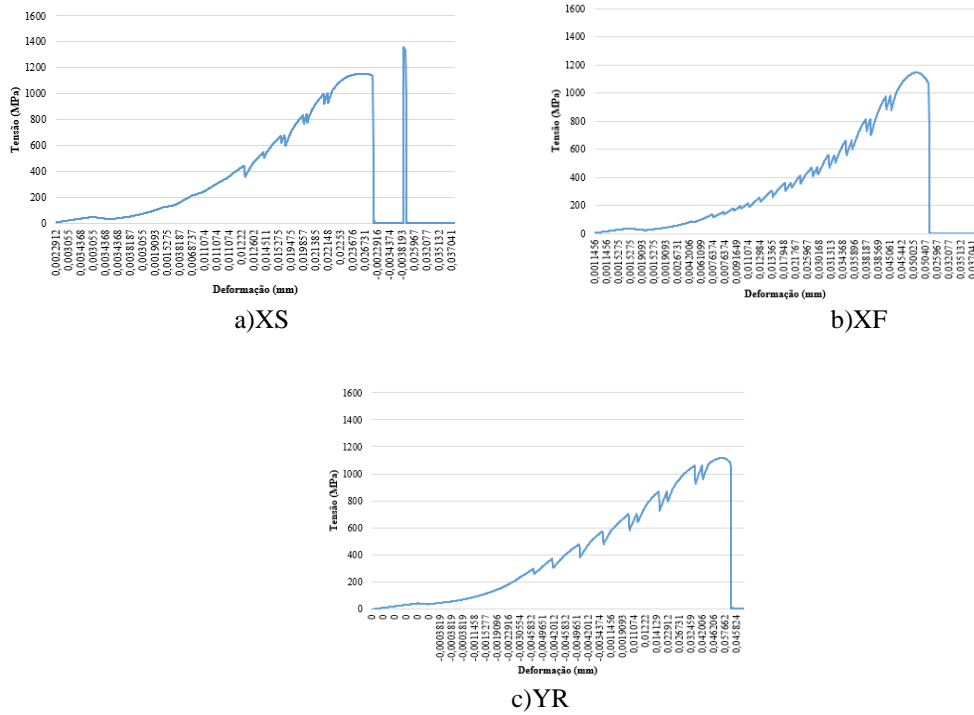


Figura 5: Resultados ensaio de tração, Ti6Al4V em EBM. a)XS. b)XF. c)YR.

3.2. Metalografia

Os resultados obtidos pela metalografia dos corpos de prova fabricados pela tecnologia EBM podem ser observados nas figuras *Figura 6*.

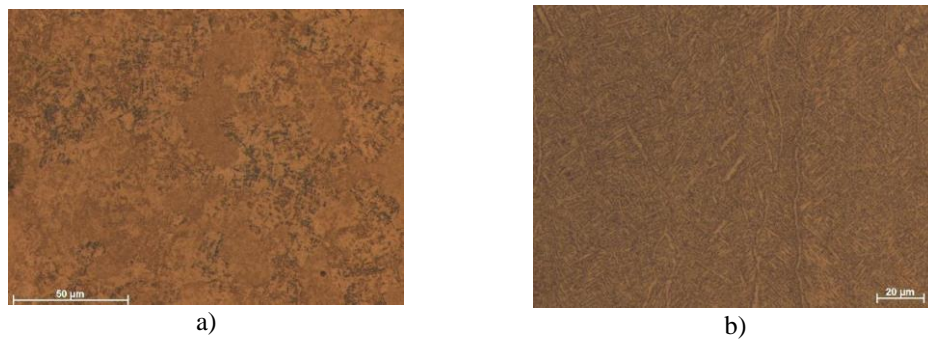


Figura 6: Análises metalográficas. a) Corte no plano XY. b) Corte no plano ZY.

Os resultados obtidos pela metalografia dos corpos de prova fabricados pela tecnologia DMLM podem ser observados nas *Figura 7*.

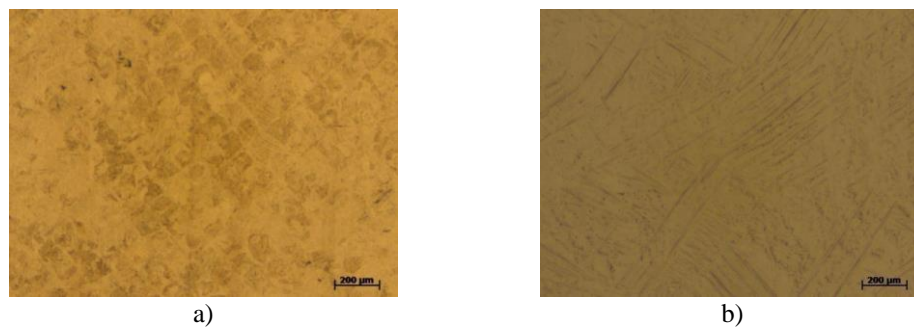


Figura 7: Metalografia Ti6Al4V da DMLM. a) Corte no plano XY. b) Corte no plano ZY.

4. Resultados e discussões

A partir dos ensaios de tração realizados, percebe-se que, tanto para a tecnologia EBM quanto para DMLM, a resistência mecânica dos corpos de prova pouco variam em relação aos sentidos ou orientações de manufatura analisados. Além disso, pode-se verificar que os corpos de prova manufaturados em EBM, apesar de pequenas variações, resistem a tensões da ordem de 900 MPa. Já os corpos manufaturados em DMLM apresentam tensão de ruptura da ordem de 1.100 Mpa, porém apresentaram menor ductilidade quando comparados com os corpos de prova confeccionados com a tecnologia EBM.

As análises metalográficas indicaram que, para os corpos de prova manufaturados utilizando-se tecnologia EBM, é possível verificar a formação de estruturas com geometrias alongadas, em formato de agulha, que segundo Murr, et al. são compostas por uma microestrutura de fase α , com a presença de microestrutura tipo β nos contornos da fase α .

Nos corpos de prova manufaturados com DMLM é possível verificar a influência do sentido de deposição do material durante a manufatura. Destaca-se a existência de estruturas quadriculares que são consequência do caminho traçado pelo feixe de laser de fusão durante a fabricação do corpo de prova. É possível também verificar a formação de estruturas aciculares que indicam a presença de estruturas hexagonais martensíticas (α') [9], que são formadas a partir das altas taxas de resfriamento da fase dos campos de temperatura β envolvidos no processo da manufatura.

REFERÊNCIAS

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ISO/ASTM 52900. Additive Manufacturing - General Principles – Terminology. Switzerland 2015.
- [2] SING, SWEE LEONG; AN, JIA; YEONG, WAI YEE; WIRIA, FLORENCIA. *Laser and Electron-Beam Powder-Bed Additive Manufacturing of Metallic Implants: A Review on Processes, Materials and Designs*. Journal of Orthopaedic. 2015.
- [3] HERZOG, DIRK; SEYDA, VANESSA; WYCISK, ERIC; EMMELMANN, CLAUS. *Additive Manufacturing of Metals*. Acta Materialia. Volume 117. p.371-392. 2016
- [4] BENJAMIN, GRAF et al. Additive Process Chain using Selective Laser Melting and Laser Metal Deposition. Lasers in Manufacturing Conference 2015.
- [5] MEDINA, FRANCISCO; BAUGHMANN, BRAIN; GODFREY, DON; MENON, NANU; *Optimizing EBM Alloy 718 material for Aerospace Components*. Honeywell Aerospace, Phoenix. 2016.
- [6] MARKL, MATTHIAS; LODES, MATTHIAS; MARTIN, FRANKLE; CAROLIN, KORNER. *Additive Manufacturing using Selective Electron Beam Melting*. Welding and Cutting. Volume 16. p. 177-184.
- [7] ARCAM EBM SYSTEM. Material Data Ti6Al4V ELI Titanium Alloy.
- [8] CONCEPTLASER A GE ADDITIVE COMPANY. Material Data. CL 41TI ELI Titanium Alloy.
- [9] LONGHITANO, GUILHERME ARTHUR et al. *Correlation between microstructures and mechanical properties under tensile and compression tests of heat-treated Ti-6Al-4V ELI alloy produced by additive manufacturing for biomedical applications*. Journal of Materials Processing Technology, v. 252, p. 202-210, 2018.