

INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇO FERRAMENTA A2 FABRICADO POR FUSÃO EM LEITO DE PÓ A LASER

Leonardo do C. Braghim^{1*}, Bruno Bianchini¹ e Piter Gargarella¹

1 - Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos
(UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.
leonardo.braghim@estudante.ufscar.br

RESUMO

A Fusão em Leito de Pó de Metais a Laser (PBF-LB/M) é uma técnica de manufatura aditiva que se utiliza da varredura de um feixe Laser sobre um leito de pó para a construção de peças, camada por camada, possibilitando geometrias complexas e densidades customizadas e minimizando o desperdício de material. Todavia, a PBF-LB/M submete o material a condições únicas durante a construção, gerando dessa forma microestruturas únicas e tensões térmicas residuais de elevada magnitude que afetam a ductilidade, resistência mecânica da peça final, além de poder causar defeitos como trincas durante o resfriamento. O aço ferramenta AISI A2 é um material destinado a trabalho a frio, temperável ao ar, que exige principalmente boa resistência ao impacto e resistência ao desgaste, além de alta dureza e resistência mecânica. Para tanto, é um material com alto teor de carbono (em torno de 1% peso) que convencionalmente sofre tratamento de austenitização, seguido de têmpera ao ar e revenimento geralmente simples, mas que pode ter ciclos adicionais. Quando aços ferramenta são aplicados em processos de manufatura aditiva, por outro lado, esse tipo de tratamento podem não ser o mais adequado, podendo reduzir a dureza significativamente ao austenitizar o material e desfazer a microestrutura extremamente refinada intrínseca ao processo de PBF-LB/M, como visto na literatura para o aço ferramenta H13, além da possibilidade de não reduzir efetivamente a fração de austenita retida, fase deletéria para as propriedades mecânicas do material, como visto na literatura para o aço ferramenta D2. Nesses casos, existe a alternativa de realizar tratamentos modificados, aplicando diretamente o ciclo de revenimento, visando manter a microestrutura inerente ao processo de manufatura aditiva, a alta dureza e aliviar as tensões que podem afetar a ductilidade. O objetivo deste trabalho foi realizar tratamentos térmicos em aço ferramenta A2 fabricado por PBF-LB/M (tratamentos (i) normativo – austenitização, têmpera e revenimento à 205°C; (ii) modificado M205, com revenimento direto a 205°C; (iii) modificado M540, com revenimento direto a 540°C; (iv) tratamento sub-zero; e verificar a influência desses tratamentos na microestrutura e propriedades mecânicas dessa liga. As amostras antes e depois dos tratamentos térmicos foram caracterizadas por difração de raios X, microscopia ótica e eletrônica de varredura e microdureza Vickers.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Fusão em leito de pó de metais a Laser, Aços ferramenta, Tratamentos térmicos.

INTRODUÇÃO

O trabalho visa realizar quatro tipos diferentes de tratamentos térmicos em peças de aço ferramenta A2 fabricadas por Fusão em Leito de Pó de Metais a Laser (PBF-LB/M), sendo os tratamentos propostos: (i) normativo, conforme ASTM A681⁽¹⁾; (ii) normativo modificado com revenimento simples à 205°C; (iii) normativo modificado com revenimento simples à 540°C; e (iv) tratamento *sub-zero*. O objetivo principal será otimizar as propriedades mecânicas diminuindo a quantidade de austenita retida, obtendo assim uma maior dureza e resistência.

As amostras foram fabricadas com as mesmas combinações de parâmetros pelo processo de Leito de Pó de Metais a Laser (PBF-LB/M), onde um pó metálico (para aços) é distribuído uniformemente em um substrato e é fundido camada por camada até que se obtenha a peça final, onde o substrato se rebaixa e uma nova camada de pó é depositada. Devido as mesmas condições de processo, as amostras resultaram na mesma microestrutura e propriedades mecânicas.

Os aços ferramenta são aços carbono, aços rápidos ou ligados, capazes de serem endurecidos e revenidos, e geralmente são destinados à fabricação de ferramentas para corte e conformação, ou moldes para fabricação, sendo o aço ferramenta A2 temperável ao ar e destinado ao trabalho a frio, possuindo entre 0,95 e 1,05% de carbono e de 4,75 a 5,50% de cromo⁽¹⁾. Em termos de tratamento térmico, o procedimento geral, previsto em norma, envolve a austenitização e o revenimento, que pode ser em ciclo simples de 2 horas ou duplo ⁽¹⁾. Contudo, na literatura há algumas peculiaridades que serão previstas neste trabalho.

Krell et al.⁽²⁾ observaram que, um tratamento de revenimento a temperaturas mais altas que as normativas resultaram em um incremento na dureza de peças em aço ferramenta H13 fabricados por L-PBF. Por outro lado, também há o tratamento *sub-zero*, que consiste no resfriamento para temperaturas criogênicas entre os ciclos de austenitização e revenimento, para transformar a austenita retida da microestrutura em martensita. Das et al.⁽³⁾ verificaram, em aço ferramenta D2, que o tratamento *sub-zero* pode tanto transformar toda a austenita retida em martensita, quanto refinar os carbeto e aumentar a dureza na matriz e no *bulk*.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material e processo de fabricação

Para a realização deste trabalho, utilizaram-se peças de aço A2 previamente produzidas por L-PBF com uma estratégia de deposição no formato *stripe hatching*, que consiste em traços com comprimento máximo de 5 mm aplicando uma rotação padrão de 32° entre as camadas. As amostras de geometria cúbica com 10 mm x 10 mm x 10 mm foram fabricadas com os mesmos parâmetros, sendo eles: potência do laser de 250W; velocidade de construção de 550 mm/s; distância de *hatch* de 0.08 mm; e espessura da camada de 0,03 mm. Para os tratamentos, fez-se o uso de 3 amostras inteiriças, sendo elas denominadas respectivamente de “Amostra 7”, “Amostra 30” e “Amostra 61”, onde cada uma delas foram cortadas em quatro amostras menores de tamanhos iguais. Para cada tratamento, utilizaram-se três fatias de amostras, totalizando quatro tratamentos para as 12 amostras. Para fins comparativos, antes do último tratamento térmico, fez-se a análise das últimas três fatias de aço A2 das amostras restantes sem algum tipo de tratamento térmico.

Realizaram-se quatro tratamentos térmicos nas amostras confeccionadas anteriormente de aço A2, sendo eles: (i) normativo; (ii) tratamento normativo modificado M205; (iii) tratamento normativo modificado M540; e (iv) tratamento *sub-zero*.

i) O tratamento normativo foi realizado de acordo com a norma ASTM A681⁽¹⁾ e como descrito por Bryson ⁽⁴⁾, onde foi realizado um pré-aquecimento a 650°C por 15 minutos para possíveis alívios de tensões, seguido de austenitização a 954°C, com tempo de patamar de 30 minutos. Após a austenitização, foi feita a tempera ao ar, seguido de revenimento em ciclo simples de 2h a 205°C; ii) O tratamento normativo modificado M205, consiste apenas no revenimento à 205°C, mantendo assim a temperatura de otimização de endurecimento para o aço ferramenta A2, sem austenitização; iii) O tratamento normativo modificado M540 consiste no revenimento à 540°C, sem austenitização, para verificar a existência de um endurecimento secundário em temperaturas mais altas, como ocorre no aço H13; iv) O tratamento *sub-zero* baseia-se na imersão das amostras fabricadas, sem austenitização ou revenimento, em nitrogênio líquido por aproximadamente 5 minutos.

Caracterização metalográfica e mecânica

Realizou-se a análise metalográfica das amostras através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para tanto, as amostras foram preparadas através de embutimento, seguido de lixamento até 3000 *mesh* e polimento com pasta de diamante de granulometria 3 μm . Entre cada etapa citada acima, fez-se o uso de um equipamento ultrassônico para limpar e garantir a integridade das amostras e dos processos posteriores. Além disso, com o objetivo de analisar as fases presentes, fez-se o uso da técnica de Difração de Raios-X (DRX) em todas as amostras previamente polidas e desembutidas. Para tal análise a faixa de varredura em 2θ utilizada foi de 30° a 120°, com duração de ensaio de 60 minutos.

A fim de analisar a dureza das amostras antes e após os tratamentos térmicos realizados, fez-se o uso do ensaio de Microdureza Vickers nas amostras polidas utilizando uma carga de 0,3 kgf por 15 segundos, respeitando a norma NBR Isso 6507-1⁽⁵⁾ para materiais metálicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As micrografias obtidas a partir do ensaio de MEV são mostradas na Figura 1. As amostras sem tratamento térmico (a) e as tratadas pelos métodos M205, M540 e *Sub-Zero* (b-d) mostraram-se semelhantes entre si, apresentando microestrutura composta por células extremamente refinadas e alongados de estrutura martensítica, com orientação preferencial conforme a estratégia de varredura do laser, como típico em peças produzidas por L-PBF. Para o aço A2, todavia, foi encontrado que essas células são envoltas por austenita retida em grande quantidade (corroborado pelo ensaio de DRX – Figura 2). Já as amostras submetidas ao tratamento normativo tiveram sua textura original removida devido à etapa de austenitização, resultando em uma microestrutura uniforme e homogênea. A microestrutura obtida foi majoritariamente de grãos refinados com estrutura martensítica com a presença de sítios de austenita retida em menor quantidade, como também se pode ver pela diminuição na intensidade dos picos de austenita nos gráficos da Figura 2.

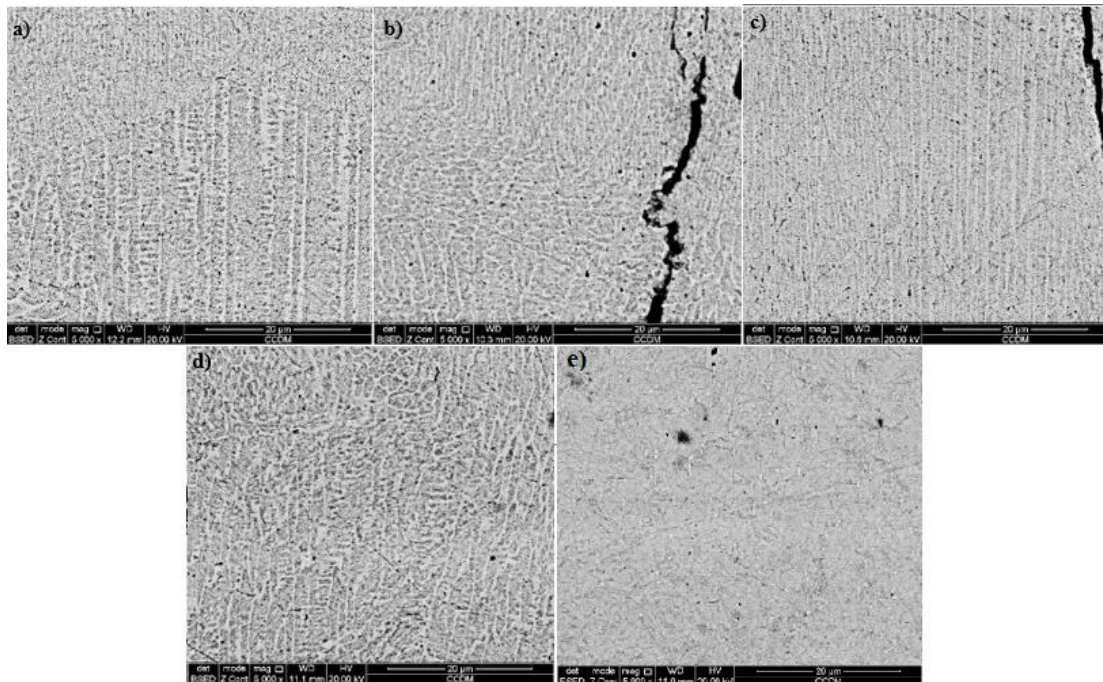


Figura 1: Microestruturas obtidas pelo MEV com aumento de 5000x. a) amostra sem tratamento térmico; b) amostra submetida ao M205; c) amostra submetida ao M540; d) amostra submetida ao tratamento *Sub-Zero*; e) amostra submetida ao tratamento normativo.

A Figura 2 mostra os padrões de difração de raios-X (DRX) para todas as amostras, com e sem tratamento. Verificou-se que o tratamento mais eficaz na redução da fração de austenita retida em martensita, em geral, foi o tratamento normativo. Analisando a altura do pico de maior intensidade da fase austenita ($2\theta \sim 48^\circ$) nas amostras que sofreram os tratamentos M20, M540 e *Sub-Zero*, nenhum deles aparentou causar diminuição considerável na fração de austenita retida, enquanto o tratamento normativo apresentou mudança considerável e reduziu os picos subsequentes dessa fase para níveis indetectáveis dentro do ruído do ensaio.

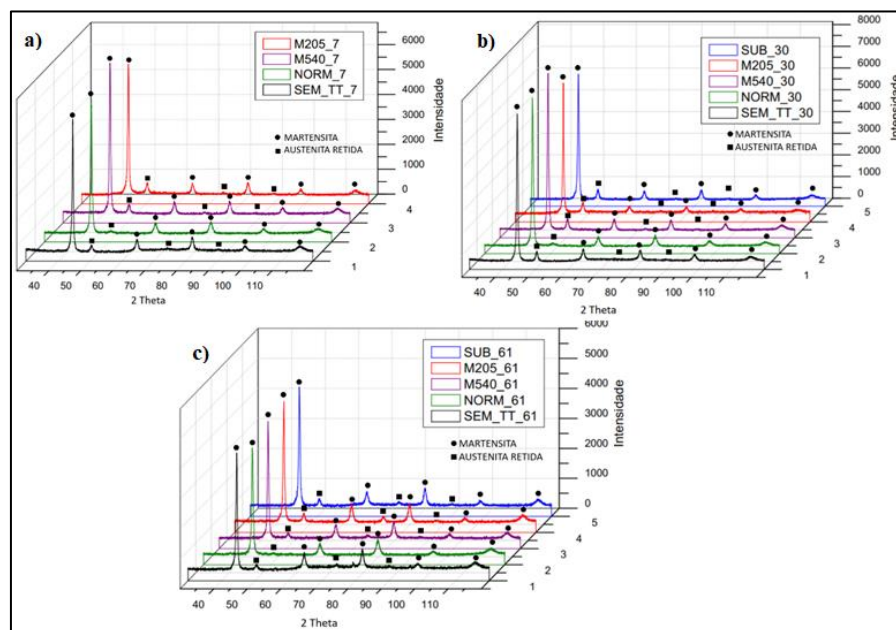


Figura 2: DRX das amostras com e sem tratamento; a) DRX da amostra 7; b) DRX da amostra 30; c) DRX da amostra 61.

A Tabela 1 mostra os resultados do ensaio de microdureza Vickers em todas as amostras. Pode-se constatar que o tratamento normativo resultou em um aumento na dureza quando comparado aos outros tratamentos térmicos, além das amostras sem tratamento. Os outros tratamentos se mostraram semelhantes entre si.

Tabela 1: Resultados obtidos dos testes de microdureza Vickers (em HV).

Amostra	Sem TT	Normativo	M205	M540	Sub-Zero
7	516 ± 31	572 ± 48	500 ± 37	533 ± 22	Não realizada
30	510 ± 29	586 ± 56	539 ± 24	537 ± 36	511 ± 44
61	481 ± 46	617 ± 14	534 ± 31	529 ± 31	513 ± 38

Vale ressaltar que as durezas encontradas durante os ensaios de microdureza Vickers podem variar com a direção em que o corte foi realizado, visto que materiais produzidos por manufatura aditiva tendem a ser anisotrópicos na direção de construção. Para esse trabalho, as amostras foram cortadas paralelas ao seu sentido de construção, podendo assim variar suas propriedades de acordo com o sentido de corte, seja o corte realizado perpendicular ao sentido de construção ou perpendicular ao eixo z.

CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas, conclui-se que o tratamento normativo descrito pela Norma ASTM A681 se mostrou mais efetivo para o endurecimento do aço ferramenta A2 fabricado pelo método L-PBF do que os outros tratamentos propostos (M205, M540 e *Sub-Zero*), devido principalmente à redução da fração de austenita retida, como consequência das etapas adicionais do tratamento. Com relação ao tratamento *Sub-Zero*, realizá-lo diretamente nas amostras de aço ferramenta A2 fabricadas por L-PBF sem uma etapa anterior de austenitização não se mostrou efetivo.

Os tratamentos M205, M540 e *Sub-Zero* se mostraram semelhantes e pouco eficazes na redução da fração de austenita retida. Logo, nenhum deles foi capaz de otimizar a propriedade mecânica de dureza, avaliada nesse trabalho. Portanto, evidenciou-se nesse caso que, apesar da perda da microestrutura intrínseca ao processo L-PBF, o tratamento normativo acabou por ser mais indicado para o incremento da resistência e eliminação de fases deletérias do material.

Para trabalhos futuros, recomenda-se então a exploração de novos tratamentos (em termos de etapas, temperatura e tempo) que possam realizar a decomposição de forma eficaz da austenita retida mantendo as texturas da microestrutura inerente ao processo de MA. Além disso, é de interesse do uso do material que seja precipitada uma fina e uniforme dispersão de carbonetos secundários que ajudem a otimizar principalmente sua tenacidade e resistência ao desgaste, propriedades essas que também devem ser exploradas em próximos estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao DEMA-UFSCar (Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de São Carlos), ao CCDM, à FAPESP com o projeto Jovem Pesquisador 2017/27031-4 e o projeto 2020/09343-1, e à CNPq pelo projeto 103361/2022-7.

REFERÊNCIAS

1. ASTM INTERNATIONAL. Standard Specification for Tool Steels Alloy A681-08. 94, Reapproved 2004, 1–14, 2005.
2. KRELL, J. et al. General investigations on processing tool steel X40CrMoV5-1 with selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 255, n. February, p. 679–688, 2018.
3. DAS, D.; DUTTA, A.K.; RAY, K.K. Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness. *Materials Science and Engineering A*, 527, 9, 2182–2193, 2010.
4. BRYSON, W.E.; BRYSON, W.E. Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels, Heat Treat. Sel. Appl. Tool Steels. 2005
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 6507-1: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers - Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019a.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENTS ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A2 TOOL STEEL MANUFACTURED BY MELT IN LASER POWDER BED

ABSTRACT

Laser Metal Powder Bed Fusion (PBF-LB/M) is an additive manufacturing technique that uses the scanning of a laser beam over a bed of powder to build parts, layer by layer, enabling complex geometries. and custom densities and minimizing material waste. However, PBF-LB/M subjects the material to unique conditions during construction, thus generating unique microstructures and high-magnitude residual thermal stresses that affect the ductility, mechanical strength of the final part, in addition to being able to cause defects such as cracks during cooling. AISI A2 tool steel is a material intended for cold working, air hardenable, which mainly requires good impact resistance and wear resistance, in addition to high hardness and mechanical strength. It is a material with a high carbon content (around 1% by weight) that conventionally undergoes austenitization treatment, followed by air quenching and tempering, generally simple, but which may have additional cycles. When tool steels are applied in additive manufacturing processes, on the other hand, this type of treatment may not be the most appropriate, and can significantly reduce hardness by austenitizing the material and disrupting the extremely refined microstructure intrinsic to the PMP-LB/M process, as seen in the literature for H13 tool steel, in addition to the possibility of not effectively reducing the fraction of retained austenite, a deleterious phase for the mechanical properties of the material, as seen in the literature for D2 tool steel. In these cases, there is the alternative of carrying out modified treatments, directly applying the tempering cycle, in order to maintain the microstructure inherent to the additive manufacturing process, the high hardness and to alleviate the stresses that can affect the ductility. The objective of this work was to perform heat treatments on A2 tool steel manufactured by PBF-LB/M (i) normative treatments - austenitization, quenching and tempering at 205°C; (ii) modified M205, with direct tempering at 205°C; (iii) modified M540, with direct tempering at 540°C, (iv) sub-zero treatment; and to verify the influence of these treatments on the microstructure and mechanical properties of this alloy. The samples before and after the heat treatments were characterized by X-ray diffraction, optical and scanning electron microscopy and Vickers microhardness.

Keywords: Additive manufacturing, Laser metal powder bed melting, Tool steels, Heat treatments.