cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

EFEITO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS PÓS-PROCESSAMENTO NA RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA DE UMA LIGA AlSi10Mg PRODUZIDA POR FUSÃO SELETIVA A LASER EM LEITO DE PÓ

Sidney Cardoso Araújo[1], Leonardo Barbosa Godefroid[1], Geraldo Lúcio de Faria[1]
Ricardo Cláudio[2] e Rodolfo Lisboa Batalha[2,3,4]
1 - Universidade Federal de Ouro Preto / REDEMAT, Ouro Preto, MG, Brasil.
2 - Universidade Politécnica de Setúbal, Setúbal, Portugal
3 - Instituto de Soldadura e Qualidade, Porto Salvo, Portugal
4 - Escola Superior Náutica Infante Dom Henrique, Paço de Arcos, Portugal

Introdução

As ligas de alumínio e a Manufatura Aditiva (MA) têm sido uma combinação importante para a produção de peças leves com geometrias complexas [1]. A técnica de fusão em leito de pó por laser (*laser-based powder bed fusion* - PBF-LB) é um dos diversos procedimentos de fabricação por MA, apresentando elevada precisão geométrica e boa taxa de fabricação [2]. O tratamento térmico pós-processamento é comumente aplicado para reduzir as tensões residuais e modificar a microestrutura da liga, melhorando assim suas propriedades mecânicas [3].

Objetivo

Fabricou-se uma liga de alumínio AlSi10Mg do tipo A360.0 ASTM B85 por PBF-LB, visando aplicação industrial no setor aeroespacial. Comparou-se a microestrutura e propriedades mecânicas de um produto no estado de entrega com produtos tratados termicamente para endurecimento por precipitação em três condições distintas.

Metodologia

Os materiais foram caracterizados em quatro situações, conforme mostra a Tabela 1. Foram caracterizadas as suas microestruturas por microscopia óptica (MO) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV), e realizados ensaios mecânicos de tração, de tenacidade à fratura, e de resistência ao crescimento de trinca por fadiga, nas direções longitudinal e transversal de fabricação. Para estes ensaios, corpos de prova foram construídos conforme esquematizado na Figura 1.

Condição	Solubilização	Têmpera	Precipitação
AB	-	-	-
DA	-	-	150ºC, 2h
T6-ASTM	530ºC, 6h	Água	160ºC, 6h
T6-ISQ	530ºC, 1h	Água	170ºC, 2h

Tabela 1: Condições estudadas. AB = como fabricado; DA = envelhecimento direto; T6 = envelhecimento de pico padrão ASTM; T6-ISQ = T6 otimizado.

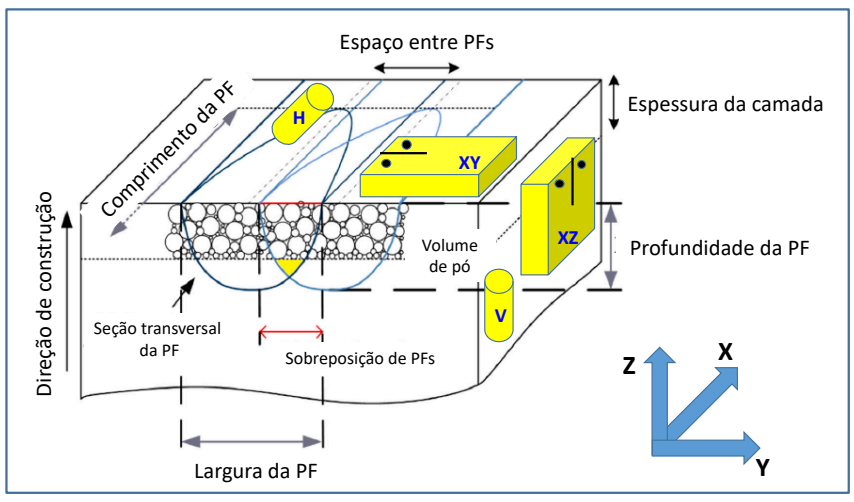


Figura 1: Esquema de construção dos corpos de prova. Plano XY = plano de construção de cada camada; Direção X = direção de varredura; Direção Z = direção de empilhamento das camadas; H e V = corpos de prova de tração; XY e XZ = corpos de prova para tenacidade à fratura e fadiga; PF = poça de fusão.

Resultados e Discussão

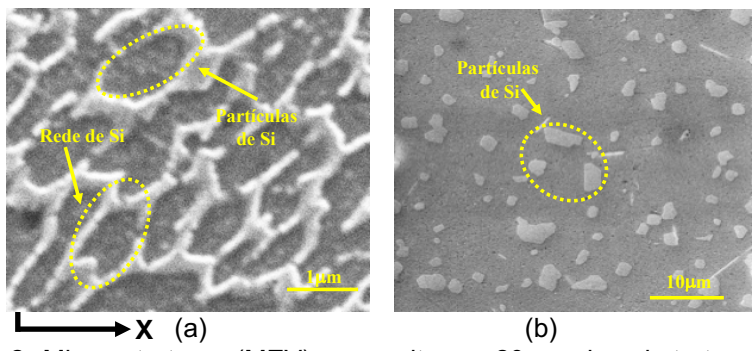


Figura 2: Microestruturas (MEV) numa altura a 20mm do substrato no plano ZX de amostras (a) DA e (b) T6-ISQ.

CP	LE (MPa)	LR (MPa)	DEF (%)
AB-V	245 ± 04	422 ± 14	4,6 ± 0,6
AB-H	252 ± 08	420 ± 17	6,3 ± 0,9
T6-ASTM-V	226 ± 05	266 ± 06	6,4 ± 0,7
T6-ASTM-H	234 ± 18	250 ± 22	8,8 ± 1,3
T6-ISQ-V	199 ± 13	264 ± 09	6,5 ± 1,3
T6-ISQ-H	167 ± 19	255 ± 06	8,6 ± 2,5
DA-V	286 ± 05	474 ± 02	6,0 ± 0,1
DA-H	285 ± 12	472 ± 10	7,0 ± 1,0

(a)

CP	J_{IC} (kJ/m²)
AB-XZ	11,1 ± 0,4
AB-XY	14,6 ± 0,5
T6-ASTM-XZ	4,7 ± 0,5
T6-ASTM-XY	6,2 ± 0,9
T6-ISQ-XZ	7,1 ± 0,8
T6-ISQ-XY	5,0 ± 0,2
DA-XZ	11,9 ± 0,2
DA-XY	14,7 ± 0,4

(b)

Tabela 2: Resultados (a) de tração e (b) de tenacidade à fratura. LE = limite de escoamento; LR = limite de resistência; DEF = deformação na fratura; J_{IC} = tenacidade para início de crescimento estável de trinca.

CP	ΔK_{TH} (MPa.m$^{1/2}$)	da/dN (mm/ciclo)
AB-XZ	2,8	6,3 x 10^{-4}
AB-XY	4,4	2,4 x 10^{-5}
T6-ASTM-XZ	6,0	1,8 x 10^{-5}
T6-ASTM-XY	2,8	3,1 x 10^{-4}
T6-ISQ-XZ	6,4	1,8 x 10^{-5}
T6-ISQ-XY	4,3	3,2 x 10^{-5}
DA-XZ	3,4	5,4 x 10^{-4}
DA-XY	3,2	7,0 x 10^{-4}

Tabela 3: Resultados de fadiga. ΔK_{TH} = limiar de crescimento de trinca (região I); da/dN = taxa de crescimento de trinca para ΔK = 8MPa.m$^{1/2}$.

A condição DA pode ser aplicada eficazmente à condição AB da liga AlSi10Mg para induzir o endurecimento e, ao mesmo tempo, aumentar a ductilidade e a tenacidade do material, eliminando a necessidade da etapa de solubilização do tratamento térmico (Tabela 2). Essas melhorias [4] resultam da preservação da rede eutética de Si e da precipitação intensa de nanopartículas de Si, que aliviam a microdeformação na matriz α-Al, mantendo a estrutura de solidificação refinada intrínseca ao processo PBF-LB (Figura 2). Por outro lado, os tratamentos térmicos T6-ASTM e T6-ISQ promovem o rápido crescimento de partículas por difusão, desfazem a rede de Si e induzem relaxamento excessivo de tensão, degradando, em última análise, o equilíbrio entre resistência e ductilidade. O comportamento em fadiga não seguiu a mesma tendência (Tabela 3). Neste caso, a maior homogeneidade microestrutural e o desenvolvimento de maior deformação plástica na ponta da trinca [5] promoveram uma maior resistência à fadiga para as condições T6-ASTM e T6-ISQ. Todas as condições adotadas nesta pesquisa apresentaram anisotropia, seja para o carregamento estático ou cíclico.

Conclusões

Considerando aplicações de Engenharia onde são exigidos valores relativamente elevados para resistência mecânica por tração e tenacidade à fratura, o “envelhecimento direto” pode ser aplicado de forma eficaz à liga AlSi10Mg na condição "como fabricada”, o que elimina a necessidade de uma etapa de tratamento térmico de solubilização. Entretanto, a resistência ao crescimento de trinca por fadiga não foi satisfatória, indicando que tal tratamento térmico pós-fabricação necessita de uma avaliação mais aprofundada.

Referências

[1] Zhang, J.; Song, B.; Wei, Q.; Bourell, D.; Shi, Y. A review of selective laser melting of aluminum alloys: processing, microstructure, property and developing trends. J MATER SCI TECHNOL, vol. 35, p.270–284, 2019. doi.org/10.1016/j. jmst.2018.09.004.
[2] Aversa, A. et alli. New aluminum alloys specifically designed for laser powder bed fusion - a review. MATERIALS, vol. 12, p.1007, 2019. doi:10.3390/ma12071007
[3] Ghio, E.; Cerri, E. Additive manufacturing of AlSi10Mg and Ti6Al4V lightweight alloys via Laser Powder Bed Fusion: a review of heat treatments effects. MATERIALS, vol. 15, p.2047, 2022. doi.org/10.3390/ma15062047
[4] Batalha, R.L. et alli. Direct aging of AlSi10Mg alloy produced by powder bed fusion – laser beam: eliminating the need for solution heat treatment. J MATER SCI TECHNOL, vol. 42, p.3057-3071, 2026. doi.org/10.1016/j. jmst.2026.03.256
[5] Giovanni, M.T. et alli. Fatigue crack growth behavior of a selective laser melted AlSi10Mg. ENGINEERING FRACTURE MECHANICS, vol. 217, p. 106564, 2019. doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106564