

## ESTUDOS DOS MECANISMOS ENVOLVIDOS EM PROCESSOS DE ENDURECIMENTO SUPERFICIAL A LASER DE LIGAS A BASE DE ALUMÍNIO

L. V. da Silva, S. J. Buso, L. C. E. da Silva, W. de Rossi, W. A. Monteiro  
CCTM – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)  
Av. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária, CEP 05508-900, São Paulo – SP  
CLA – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo – SP  
CCH – Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), São Paulo – SP  
lu.ventavele@gmail.com

### RESUMO

*O objetivo deste trabalho foi avaliar as características do endurecimento superficial à laser em modo pulsado (Nd:YAG,  $\lambda=1,06\mu\text{m}$ ) em uma liga de alumínio-silício utilizada na indústria automobilística para fabricação de pistões de motores de combustão interna. Esta radiação possibilita diversas concentrações de energia com precisa transferência dela para o material sem contato físico. A transferência intensa de energia provoca a ocorrência de modificações estruturais na camada superficial do material. Serão apresentados resultados da análise microestrutural por MO, MEV, microanálise elementar e de propriedades mecânicas (ensaios de microdureza). A alta taxa de resfriamento causou refinamento da estrutura da liga devido à formação de solução sólida das partículas de silício eutético e primário, a área afetada não apresentou homogeneidade sob algumas condições de processamento e mudanças em diversas fases normalmente presentes na liga. A alta taxa de resfriamento causou o refinamento da estrutura da liga de Al-Si, resultando em aumento de dureza.*

**Palavras-chave:** liga Al-Si, endurecimento superficial, Nd:YAG

### INTRODUÇÃO

As ligas de Al-Si são amplamente utilizadas na indústria para substituir o aço e o ferro fundido nos setores de alta tecnologia, como a indústria automobilística. A importância comercial dessas ligas deve-se principalmente ao seu baixo peso, excelente resistência à abrasão e à corrosão, baixo coeficiente de expansão térmica e redução no consumo de combustível, uma vez que, as tendências recentes buscam alcançar um melhor desempenho sem aumentar o peso e, ao mesmo tempo, procura-se manter ou melhorar as propriedades mecânicas <sup>(1-3)</sup>. No entanto, a dureza superficial e a resistência ao desgaste do alumínio e suas ligas são relativamente baixos, limitando sua aplicação <sup>(4)</sup>.

O grupo de ligas eutética Al-Si é ideal para a fabricação de pistões devido à excelente fluidez, resistência ao desgaste e baixa expansão. Dessa forma, a estrutura e propriedades mecânicas das ligas Al-Si e seu desempenho em serviço são dependentes principalmente da composição, processo de fabricação e tratamento térmico <sup>(5)</sup>. A baixa expansão do grupo de ligas Al-Si eutética ou próximas ao eutético que são referidas como “liga pistão” proporcionam melhor equilíbrio global das propriedades <sup>(6)</sup>.

A aplicação da técnica de fusão a laser no tratamento superficial de materiais melhora suas propriedades devido à formação de uma camada superficial dura, homogênea e de estrutura ultrafina, sem alterar a composição química <sup>(7)</sup>.

A principal razão para a modificação superficial a laser de pistões e camisas de cilindro feitos de ligas de alumínio é a obtenção de alta dureza e resistência ao desgaste na superfície de trabalho, aumentando a sua vida útil como resultado da solidificação rápida. A microestrutura final, composição de fase e propriedades das ligas de alumínio dependem dos parâmetros do processamento laser <sup>(8)</sup>.

O objetivo deste trabalho é avaliar as características do endurecimento superficial à radiação laser em modo pulsado (Nd:YAG,  $\lambda=1,06\mu\text{m}$ ) em uma liga de alumínio-silício utilizada na indústria automobilística para fabricação de pistões de motores de combustão interna.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O material que é objeto de estudo deste trabalho é uma liga de Al-Si, desenvolvida pela MAHLE Metal Leve S.A, obtida por fundição em molde permanente. A composição química em porcentagem em peso é: 11,13%Si; 3,65%Cu; 2,42%Ni; 0,80%Mg; 0,42%Fe; 0,091%Mn; 0,033%Ti; 0,023%Zn e o restante Al.

As amostras, com dimensões de aproximadamente 24mm x 24mm x 6mm foram retiradas da superfície de topo do pistão, ou seja, superfície superior da cabeça contra a qual os gases de combustão exercem pressão. Para o tratamento superficial a laser as superfícies foram lixadas, utilizando-se lixas de SiC (granulometrias 400, 600, 800, 1000) e polidas com alumina em suspensão de 0,3 $\mu\text{m}$ . As amostras foram então lavadas em álcool e secas em soprador térmico.

Os tratamentos superficiais de refusão a laser foram realizados na Central de Processamento de Materiais a Laser (CPML) do Centro de Lasers e Aplicações

(CLA) do IPEN. A CPML é um sistema constituído por uma máquina fresadora CNC, na qual foi acoplado um laser de estado sólido pulsado de Nd:YAG, que emite radiação no infravermelho próximo com comprimento de onda de  $1,06\mu\text{m}$  e pulsos com largura temporal da ordem de milissegundos.

Nos experimentos deste trabalho modificou-se apenas a distância entre o plano focal e a superfície da amostra ( $\Delta z$ ), para obter-se diferentes dimensões do feixe laser (Fig. 1).

No intuito de evitar a oxidação da superfície durante o tratamento utilizou-se argônio com uma vazão de 15 litros/min na direção de propagação do feixe laser.

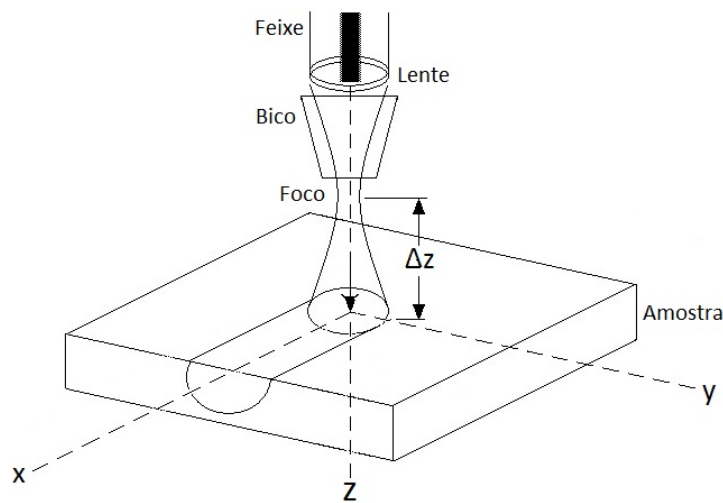


FIGURA 1 – Diagrama esquemático do processo de refusão a laser

O endurecimento superficial consiste em obter-se uma camada endurecida ao longo de toda a superfície da peça. Nessa perspectiva, o feixe laser surge como uma técnica alternativa para o tratamento térmico superficial. No intuito de investigar uma camada endurecida ao longo da superfície das amostras da liga Al-Si foram geradas uma sequência de trilhas paralelas.

Os códigos indicativos das amostras e respectivas condições de processamento encontram-se na Tab. 1.

TABELA 1- Condições de processamento e códigos utilizados

Parâmetros do processo	$\Delta z$ (mm)	Código
Energia: 5,7 J Largura temporal: 12ms Frequência: 9 Hz Velocidade de varredura: 162 mm/min Atmosfera controlada: Argônio	2	TRL2
Energia: 5,7 J Largura temporal: 12ms Frequência: 9 Hz Velocidade de varredura: 162 mm/min Atmosfera controlada: Argônio	3	TRL3
Energia: 5,7 J Largura temporal: 12ms Frequência: 9 Hz Velocidade de varredura: 81 mm/min Atmosfera controlada: Argônio	2	TRL4

A avaliação e caracterização estrutural e mecânica da liga Al-Si nas condições como recebida e tratada superficialmente por laser foi realizada com o auxílio de várias técnicas complementares de análise, a saber: macrografias da superfície, microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) com algumas microanálises por espectroscopia por energia dispersiva (EDS), ensaios de microdureza Vickers e rugosidade superficial.

As medidas de microdureza Vickers da superfície das trilhas foram realizadas com carga de 50g. Os ensaios estão em fase preliminar e tem por objetivo traçar o perfil de microdureza ao longo da superfície das trilhas, apresentando a variação de dureza na zona fundida e na região de transição entre um pulso e seu vizinho (região de sobreposição).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig.2 observa-se a microestrutura típica da liga de Al-Si na condição de como recebida, obtida por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente. A microestrutura é formada por uma matriz de Al- $\alpha$  com partículas de silício primário e eutético rico em silício e várias fases intermetálicas.

A microestrutura do material é composta de cristais primários de silício, com morfologia angular. Os precipitados eutéticos são compostos por Al-Si-Mg (cinza escuro) e Al-Ni-Si-Cu-Fe-Mg (cinza claro). Adicionalmente, observa-se a presença de precipitados claros de Al-Cu. Os ensaios de microdureza Vickers realizados (carga de 50g) indicaram uma dureza inicial de 143HV.

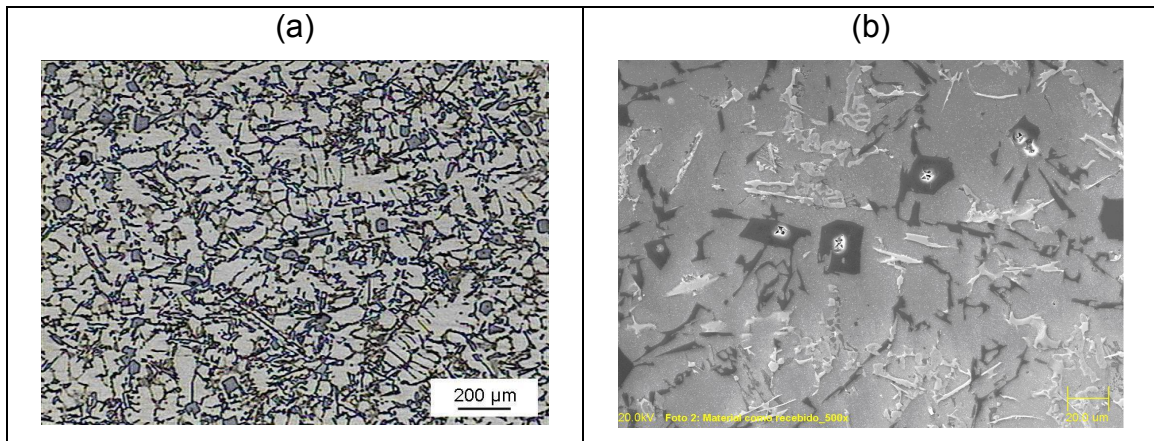


FIGURA 2 – Microestrutura da liga Al-Si no estado de como recebida com ataque químico (HF5%) obtida por MO e MEV/ elétrons secundários, respectivamente.

A Fig. 3 mostra o efeito do processamento superficial por laser na seção longitudinal da amostra sob a condição de processamento TRL4. As modificações observadas nas regiões de incidência do feixe laser podem ser explicadas com base nos gradientes de tensão superficial criados durante a fusão e nos movimentos convectivos na região fundida.

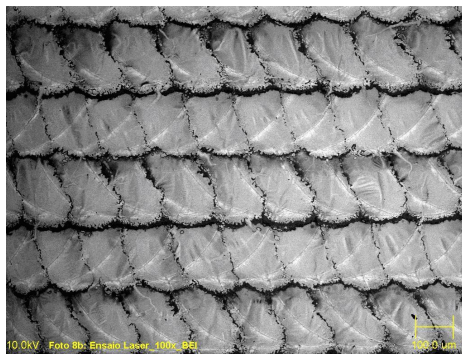


FIGURA 3 – Micrografia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) da seção longitudinal da amostra irradiada com trilhas (condição TRL4).

Nas Fig. 4 e 5 são apresentadas as micrografias típicas das seções transversais das amostras irradiadas com trilhas laser.

Observa-se que para todas as condições experimentais utilizadas os pulsos apresentam-se sobrepostos. Às diferentes velocidades de varredura, valores de  $\Delta z$  e, à influência do calor residual deve-se os diferentes espaçamentos entre os pulsos.

Em TRL4 observa-se que a zona solidificada é homogênea, visualizando-se nitidamente a sobreposição dos pulsos. A maior profundidade foi obtida nessa condição.

Verifica-se completa dissolução dos compostos intermetálicos nas condições TRL2 e TRL4. Isso se deve ao processo de solidificação rápida.

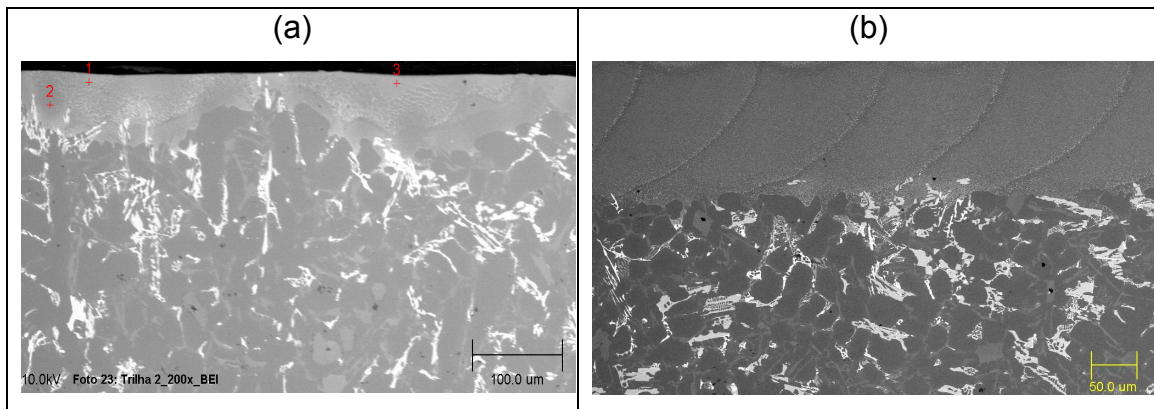


FIGURA 4 – Micrografias da seção transversal da liga Al-Si obtida por MEV (elétrons retroespalhados) (a) sob a condição TRL2, (b) sob a condição TRL4



FIGURA 5 – Micrografia óptica da seção transversal da liga Al-Si após irradiação com trilhas (condição TRL3)

Na Fig. 6 são apresentados os gráficos de microdureza Vickers da superfície das trilhas para a zona fundida e para a região de sobreposição.

Observa-se que o perfil de microdureza ao longo da superfície das trilhas apresenta um comportamento similar em todas as condições estudadas (TRL2, TRL3 e TRL4): valores máximos na zona central da região irradiada decrescendo na região de transição.

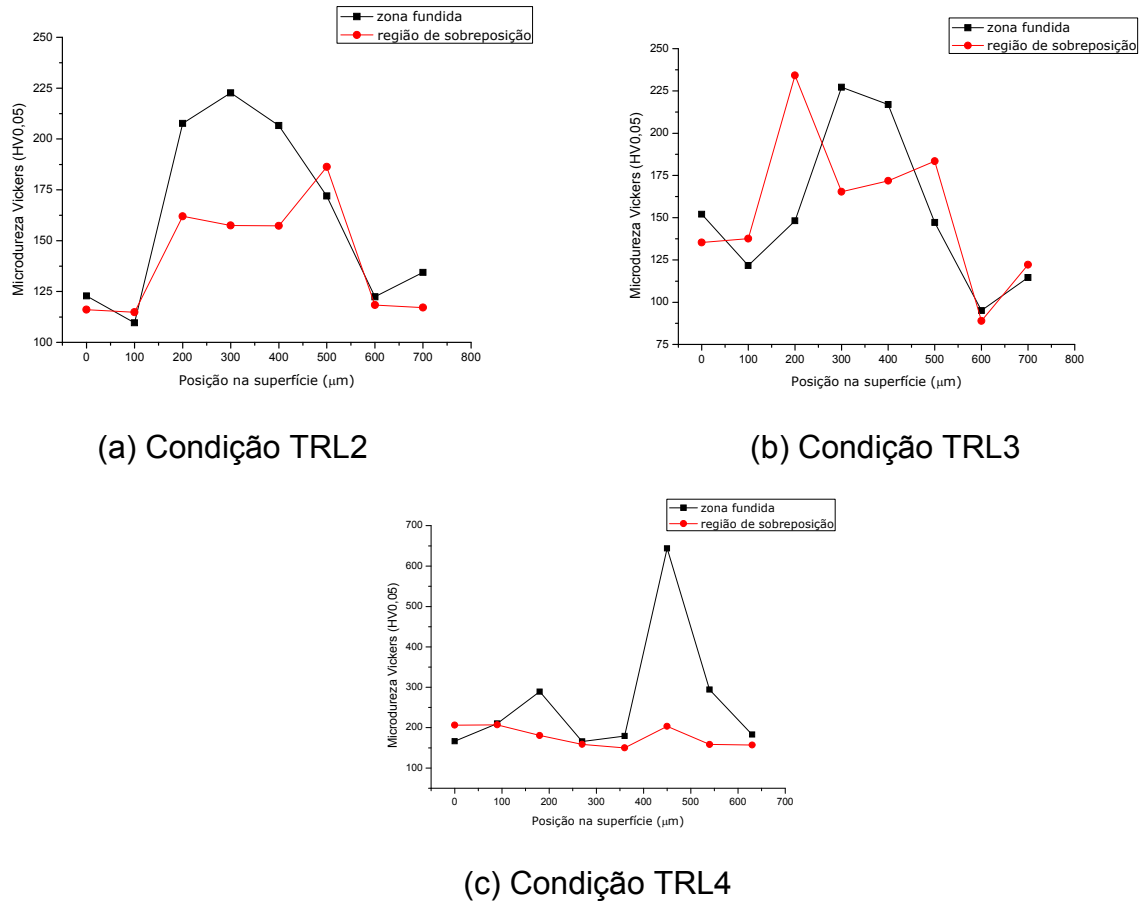


FIGURA 6 – Gráficos de microdureza Vickers da superfície: zona fundida e região de sobreposição para as condições (a) TRL2, (b) TRL3 e (c) TRL4

## CONCLUSÃO

As altas taxas de resfriamento do tratamento superficial por refusão a laser refinam/ eliminam os cristais de silício primário da estrutura (na região modificada) e, conseqüentemente conferem à liga pistão de Al-Si melhores níveis de dureza.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à General Motors pelo fornecimento do material de estudo, ao Centro de Lasers e Aplicações do IPEN pela realização dos tratamentos, à escola SENAI Mario Amato e ao MSc. Newton Haruo Saito pela execução das análises de microscopia eletrônica de varredura.

## REFERÊNCIAS

1. PRUDNIKOV, A. N. Production, structure, and properties of engine pistons made from transeutectic deformable silumim. ***Steel in Translation***, Sibéria, RU, v.39, n. 5, p. 391-393, 2009.
2. MOHAMED, A. M. A.; SAMUEL, F. H.; SAMUEL, A.M.; DOTY, H. W. Effects of individual and combined additions of Pb, Bi, and Sn on the microstructure and mechanical properties of Al-10.8Si-2.25Cu-0.3Mg alloy. ***Metallurgical and Materials Transactions A***, Quebec, CA, v.40A, p. 240-254, 2009.
3. ZEREN, M. The effect of heat-treatment on aluminum-based piston alloys. ***Materials and Design***, Kocaeli, TR, v.28, p. 2511-2517, 2007.
4. ALEKSANDROV, V. D. Modification of the surface of aluminum alloys by laser treatment. ***Metal Science and Heat Treatment***, Moscow, RU, v.44, n. 3-4, p.33-36, 2002.
5. MA, Z.; SAMUEL, E.; MOHAMED, A. M. A.; SAMUEL, A. M.; SAMUEL, F. H.; DOTY, H. W. Influence of aging treatments and alloying additives on the hardness of Al-11Si-2.5Cu-Mg alloys. ***Materials and Design***, Quebec, CA, v.31, n. 8, p. 3791-3803, 2010.
6. HAQUE, M. M.; SHARIF, A. Study on wear properties of aluminium-silicon piston alloy. ***Journal os Materials Processing Technology***, Dhaka, BD, v. 118, p. 69-73, 2001.
7. KAC, S.; KUSINSKI, J. SEM structure and properties of ASP2060 steel after laser melting. ***Surface and Coatings Technology***, Krakow, PL, v.180-181, p. 611-615, 2004.



8. SERBIŃSKI, W.; LUBIŃSKI, J. I.; DRUET, K. Microstructure and wear of cast aluminium alloy with laser modified surface layer. *Advances in Materials Science*, Polônia, PL, v.4, n. 2 (4), p. 71-80, 2003.

## STUDIES OF THE MECHANISMS INVOLVED IN THE LASER SURFACE HARDENING PROCESS OF ALUMINUM BASE ALLOYS

### ABSTRACT

*The aim of this work was to evaluate the characteristics of the surface hardening treatment using a Nd: YAG pulsed laser on aluminum-silicon used in the automobile industry for manufacture of pistons of engines of internal combustion. This radiation makes possible diverse concentrations of energy with necessary transference of it to the material without physical contact. The intense transference of energy causes structural modifications occurrence in the superficial layer of the material. They will be presented results of the microstructural analysis with optical and electron microscopy, elementary microanalysis and mechanical properties (microhardness measurements). The high cooling rate caused structure refinement of the alloy due to solid solution formation of primary eutectic silicon particles. The high cooling rate caused refinement of the alloy structure, resulting in hardness increase.*

**Key-words:** Al-Si alloy, surface hardening, Nd:YAG pulsed laser