

## TÊMPERA E APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO NANOPARTICULADO EM MATRIZES DE AÇO AISI 4340 VIA LASER DE CO<sub>2</sub>

*D. C. Chagas<sup>1</sup>; A. N. Dias<sup>1</sup>; E. F. Antunes<sup>2</sup>; G. Vasconcelos<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, S.J. dos Campos, SP, danielecchagas@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, LAS, S.J. dos Campos, SP, ericafa@inpe.las.br

<sup>3</sup>Instituto de Estudos Avançados - IEAv, EFO-L, S.J. dos Campos, SP, getulio@ieav.cta.br

**Resumo** - Neste trabalho será avaliada a utilização de revestimentos nanoparticulados de negro de fumo, em substituição a grafita utilizada em trabalhos anteriores, visando eliminar toda a etapa de moagem. O negro de fumo atua como material foto-absorvedor da radiação incidente, e transfere parte da energia absorvida para a superfície das amostras metálicas, porém rapidamente dissipa esta energia no volume do metal. As amostras de aço AISI 4340 foram previamente recobertas com uma solução de negro de fumo, álcool etílico e carboximetilcelulose, e irradiadas com um laser de CO<sub>2</sub>. Este processo de tratamento térmico é denominado de têmpera superficial com lasers. As alterações resultantes desta interação foram caracterizadas pela medição da microdureza superficial da região irradiada e apresentou aumento da ordem de três vezes maior ao do substrato original, atingindo uma média da ordem de 805 Hv<sub>0,5</sub>. Observou-se através de ensaios de pino sobre disco, que o coeficiente de atrito foi reduzido de 0,7 para 0,2.

**Palavras-chave:** Laser de CO<sub>2</sub>, negro de fumo, têmpera superficial, aço AISI 4340.

**Área do Conhecimento:** Ciências Exatas e da Terra.

### Introdução

A aplicação de revestimentos foto-absorvedores é uma prática comum, principalmente, quando lasers de baixa densidade de energia são utilizados. Estes materiais, normalmente, MoS<sub>2</sub>, grafita e negro de fumo, favorecem o acoplamento da radiação incidente, reduzindo as perdas por reflexão, comuns ao processo, quando lasers de CO<sub>2</sub> são utilizados como fonte de radiação.

Em trabalhos anteriores, utilizando-se revestimentos de grafita, observou-se que parte deste revestimento, após a irradiação, permanecia na superfície do metal. Em ensaios de pino sobre disco, observou-se a redução do coeficiente de atrito em superfície com este recobrimento. REIS em 2009 [1] observou que ocorria também à têmpera superficial, mesmo utilizando lasers de baixa densidade de energia. Este processo de têmpera foi atribuído ao melhor acoplamento na região de interação do feixe com a superfície do metal.

A têmpera por laser consiste no aquecimento e resfriamento rápido da superfície do aço. Se a densidade da potência for suficiente, uma camada na superfície do aço irá atingir a temperatura de austenitização (durante o aquecimento), e posteriormente com o resfriamento rápido, ocorrerá a formação de martensitas [2]. A profundidade da camada tratada é determinada pela lei da condutividade térmica, onde ocorre a propagação de calor de uma região de maior temperatura para uma região de menor

temperatura [3]. A têmpera a laser permite o endurecimento superficial de áreas específicas com profundidade controlada e com deformações mínimas na superfície quando comparado a outros métodos. Promove também, melhora nas propriedades mecânicas como resistência a fadiga, atração, desgaste (redução do fator de atrito) e aumento da resistência a corrosão [4-5].

Neste trabalho será avaliada a utilização do negro de fumo em substituição a grafita utilizada no trabalho de REIS (2009) [1], visando eliminar na etapa de preparação da solução, a moagem em moinhos de alta energia.

### Metodologia

O aço utilizado neste trabalho é o AISI 4340. Sua composição química foi avaliada através do espectrômetro de emissão ótica Thermo Scientific, Modelo ARL 3460 OES Metals Analyzer, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço 4340 - % massa

	Fe	C	Mn	Cr	Ni	Mo
Aço 4340	95.8	0.36	0.64	0.79	1.70	0.22

O negro de fumo é formado por partículas finas obtidas pelo processo de pirólise ou combustão parcial de hidrocarbonetos gasosos ou líquidos. Apresenta estrutura nanoparticulada, que favorece o recobrimento com camadas finas em áreas mais extensas [6]. O formato das partículas foi

observado por microscopia eletrônica de varredura (MEV – Zeiss/ EVO MA10), conforme apresenta a Figura 1.

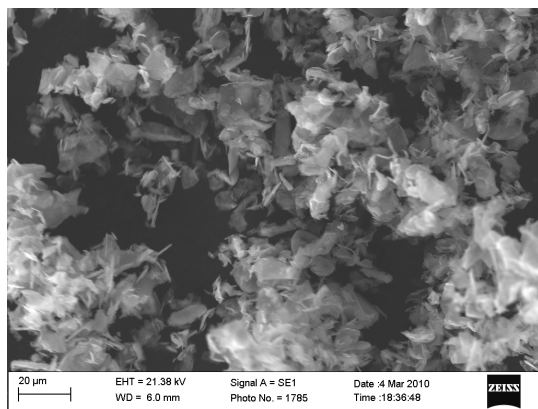


Figura 1: MEV das partículas de negro de fumo (1320X).

O tamanho de partícula do lubrificante pode influenciar na espessura da camada depositada e no revestimento após a irradiação com o feixe de laser. A fim de se determinar a distribuição de tamanho das partículas, o negro de fumo foi submetido a análise granulométrica, através do ensaio por difração a laser (CILAS 1064L, intervalo de 0,04 a 500µm). Os resultados desta análise são apresentados na Figura 2.

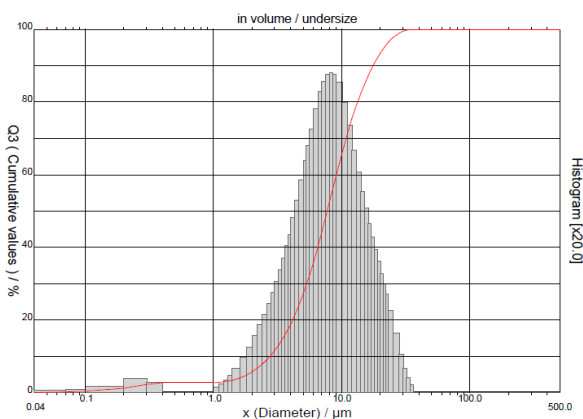


Figura 2: Histograma da distribuição granulométrica do negro de fumo.

Amostras de aço AISI 4340 com espessura 3mm e diâmetro de 20mm, previamente lixadas (lixas de 280 a 600), foram recobertas com solução preparada com 10g de negro de fumo e 0.1g de carboximetilcelulose em 100ml de álcool etílico. Esta solução foi agitada mecanicamente por 20 minutos, num recipiente plástico com esferas metálicas, para a homogeneização da solução. Posteriormente, a solução foi aspergida com pistola pneumática sobre a superfície das amostras de aço previamente aquecidas a 60°C. Em seguida, irradiou-se as amostras com feixe de

laser de CO<sub>2</sub> de 50W e diâmetro do feixe de 300µm. Na região de ação do feixe sobre as superfícies das amostras, utilizou-se um fluxo de nitrogênio para evitar a oxidação. A Figura 3 apresenta o laser utilizado e a Figura 4, o diagrama do arranjo experimental do processo de tratamento.

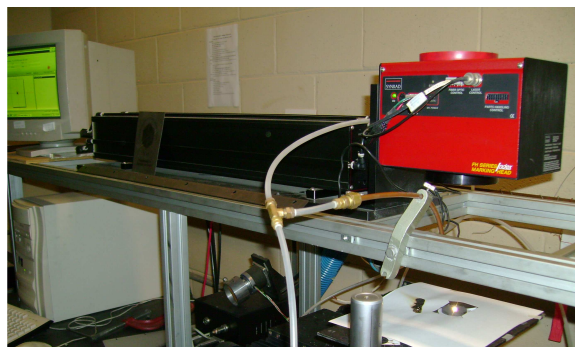


Figura 3: Laser de CO<sub>2</sub>. Em destaque, na caixa retangular vermelha, localizam-se os espelhos galvanométricos.

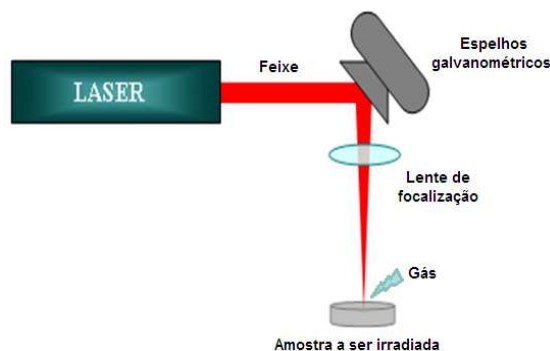


Figura 4: Arranjo experimental do processo. O feixe de laser é guiado por um conjunto de espelhos galvanométricos comandados por um software.

A velocidade de varredura do feixe de laser (V), a resolução em pulsos por polegada (R) e o número de ciclos de aquecimento (NCA) a serem utilizados neste experimento, foram selecionados a partir de testes previamente realizados [7]. A Tabela 2 mostra os parâmetros do feixe de laser utilizados no tratamento das amostras.

Tabela 2: Parâmetros do laser utilizados para a têmpera superficial do aço AISI 4340.

Amostras	Velocidade (mm/s)	Resolução (ppp)	Número de Ciclos
P1	40	300	5
P2	60	300	5
P3	80	300	5

A Figura 5 ilustra o esquema do processo de tratamento, com feixe de laser, das amostras previamente recobertas com negro de fumo.

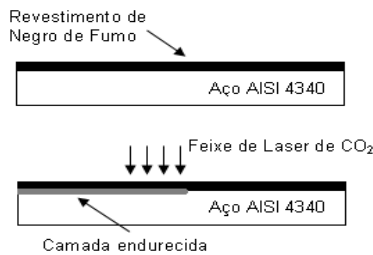


Figura 5: Esquema do processo de recobrimento. O feixe de laser é absorvido pela camada de negro de fumo. O negro de fumo aquecido transfere calor para o substrato metálico para que as transformações de interesse ocorram.

### Resultados e Discussão

Das amostras irradiadas de acordo com a Tabela 2, selecionou-se aquela que apresentou menor ablação superficial e maior extensão da camada tratada. Estes parâmetros foram avaliados por medidas de rugosidade e microscopia óptica, respectivamente. A secção transversal do aço AISI 4340, da amostra P2, é apresentado na Figura 6.

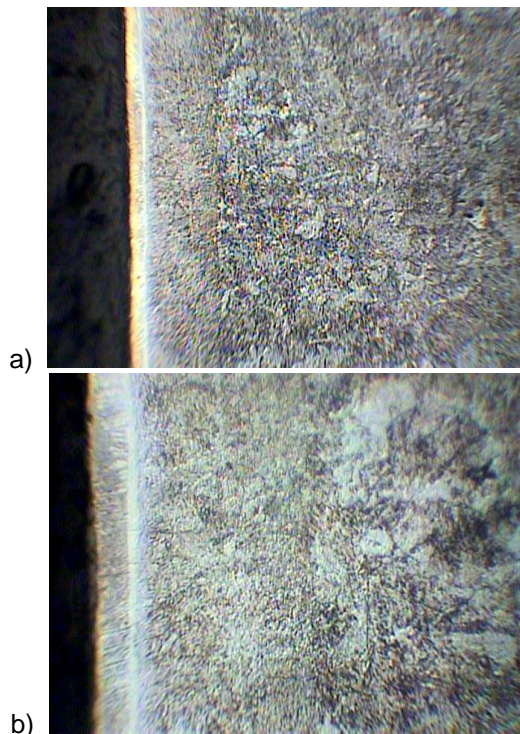


Figura 6: Secção transversal da superfície irradiada com  $V=60$  mm/sec,  $R=300$ ,  $NC=5$ . Microscopia óptica a) MO-200X, b) MO-500X.

Observa-se que a microestrutura do substrato (região não tratada) indica fases perliticas e ferritas, e na região endurecida apresenta fases martensíticas, característica de aços de baixo carbono, pela ocorrência de têmpera.

O valor médio da microdureza do aço AISI 4340 sem o tratamento térmico é de  $260 \text{ Hv}_{0,5}$ . Após o tratamento térmico com laser de  $\text{CO}_2$ , pode-se observar que a dureza do material aumentou expressivamente, atingindo uma média da ordem de  $805 \text{ Hv}_{0,5}$ . A Figura 7 apresenta o perfil de microdureza da secção transversal da região tratada. Estes resultados foram obtidos por meio do microindentador Future-Tech/ FM-700.

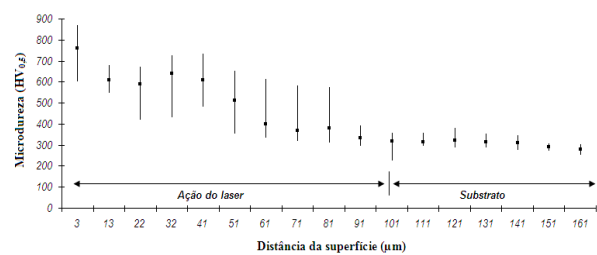


Figura 7: Perfil de microdureza da secção transversal da região tratada, após tratamento via laser com revestimento de negro de fumo.

De acordo com Figura 7, observa-se aumento da dureza, ocorrido devido ao processo de têmpera superficial, decorrente do aquecimento e resfriamento rápido da amostra. A extensão da camada endurecida foi da ordem de  $100 \mu\text{m}$ , e a dureza máxima alcançada foi da ordem de  $892 \text{ Hv}_{0,5}$ , para as condições de parâmetros de laser apresentados.

A amostra foi submetida a ensaios tribológicos para se determinar do coeficiente de atrito. Os parâmetros utilizados no ensaio foram: velocidade linear igual a  $10 \text{ cm/s}$ , raio da pista de  $5 \text{ mm}$ , esfera de aço 52100 com  $6 \text{ mm}$  de diâmetro, número de voltas igual a  $2000$  e carga igual a  $5 \text{ N}$ . Neste teste, a amostra é apoiada em um suporte de rotação e pressionada com uma esfera de aço com carga conhecida, conforme apresenta o esquema da Figura 8.

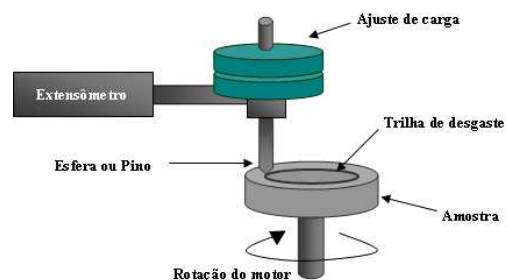


Figura 8: Desenho esquemático do teste de tribologia.

Em seguida, a amostra é rotacionada para avaliar o atrito, e os resultados obtidos através dos ensaios tribológicos, são consolidados através de um software. O resultado dos ensaios são apresentados na Figura 9.

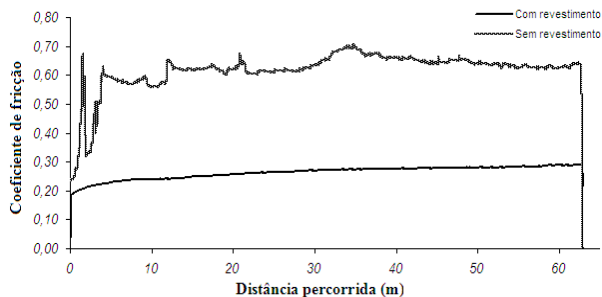


Figura 9: Curvas dos coeficientes de atrito do aço 4340 com e sem revestimento.

Nos resultados obtidos no ensaio tribológico das amostras com e sem revestimento, observa-se que a amostra sem revestimento apresenta um maior coeficiente de atrito de 0,70 e as amostras revestidas com negro de fumo e posteriormente tratadas com laser, apresenta coeficiente de atrito da ordem de 0,25. Com menores valores de coeficiente de atrito, há maior durabilidade e tempo de vida útil do material e do processo.

## Conclusão

Os experimentos realizados indicam que a utilização do negro de fumo é viável, apresentando resultados de microdureza, coeficiente de atrito, têmpera e extensão da camada tratada, semelhantes aos resultados apresentados pelo REIS (2009), e ainda elimina a etapa de moagem, que é necessária quando se utiliza a grafita.

Observou-se que o negro de fumo auxilia na absorção da radiação incidente ao aço. Influência na alteração da microestrutura superficial e promove a tempera da superfície e ainda a fixando-se à superfície do aço. A extensão da camada tratada e sua microestrutura podem ser controladas mediante a variação dos parâmetros do laser.

A região temperada apresentou microestrutura homogênea e com profundidades de camadas tratadas com até três vezes a dureza superficial do aço.

No ensaio tribológico, observou-se que ocorreu uma diminuição significativa do coeficiente de atrito, onde a amostra sem revestimento apresenta um maior coeficiente de atrito da ordem de 0,70 e as amostras revestidas com negro de fumo e posteriormente tratadas com laser, apresentam coeficiente de atrito da ordem de 0,25.

## Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa PBIC oferecida, ao Grupo DEDALO-IEAv, ao Prof. Dr. J.R. Martinelli do IPEN-USP, ao Eng. André Zanatta do CCM-ITA e a UNIVAP.

## Referências Bibliográficas

- [1] REIS, J. L., Tratamento térmico superficial do aço AISI M2 via laser de CO<sub>2</sub>. 2009. 104f. Tese de mestrado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [2] Ganeev, R. A., Low-power laser hardening of steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 121(2002), 414-419.
- [3] Benedeck, J.; Shachrai, A.; Levin, L., Case hardening of steel by a CO<sub>2</sub> laser beam, *Optics and Laser Technology*. October 1980.
- [4] Dohotre, N. B., *Lasers in Surface Engineering: Surface Engineering Series, Volume 1*, ASM International – The Materials Information Society, 1998, Chapter 1 and 3.
- [5] Machado, I. F., Technological advances in steels heat treatment, *Journal of Materials Processing Technology*, 172(206), 160-173.
- [6] Informe Setorial N°09 - Complexo Químico, Negro de Fumo, BNDES - Janeiro de 98.
- [7] Chagas, D. C.; Dias, A. N.; Vasconcelos, G.; Antunes, E. F., Tratamento superficial de têmpera e recobrimento com negro de fumo do aço AISI 4340 via laser de CO<sub>2</sub>. ISSN 1983-1544. *Ativ.P&D IEAv*, v.3, p.84, mar/2009-fev/2010.