

# RECOBRIMENTO DE AÇO AISI 4340 COM CARBETO DE BORO VIA LASER DE CO<sub>2</sub>

Alex Nogueira Dias<sup>1,2</sup>, Daniele Cristina Chagas<sup>1,2</sup>, Getúlio de Vasconcelos<sup>2</sup>,  
Eliandra de Sousa<sup>1</sup>

**Resumo** – Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos da aplicação de uma camada de carbeto de boro sobre a superfície do aço AISI 4340 via laser de CO<sub>2</sub>. O carbeto de boro por apresentar elevada dureza, ponto de fusão e resistência química, quando aplicado às superfícies metálicas pode promover ao metal suas qualidades mecânicas de interesse, destacando-se dentre elas, a elevada resistência ao desgaste. Para que ocorresse o ancoramento desta camada de carbeto de boro sobre o substrato, uma camada de negro de fumo foi previamente depositada sobre o aço, pelo mesmo processo via laser. As análises por microscopia óptica e ensaios microdureza revelaram a formação de uma camada homogênea com espessura regular com dureza de 805 HV, ou seja, três vezes maior que o substrato. As amostras submetidas a ensaio tribológico apresentam seu coeficiente de atrito reduzido à 0,2.

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

**Abstract** – This paper presents the results of applying a layer of boron carbide on the surface of AISI 4340 through CO<sub>2</sub> laser. The boron carbide to produce high hardness, melting point and chemical resistance when applied to metal surfaces can promote metal to its mechanical qualities of interest, outstanding among them, the high wear resistance. For this to occur the anchoring of boron carbide layer on the substrate, a layer of carbon black was previously deposited on the steel, the same process via laser. The analysis by optical microscopy and microhardness testing revealed the formation of a homogeneous layer with regular thickness with hardness of 805HV, that is three times larger than the substrate. The samples tested have their tribological friction coefficient reduced to 0.2.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> laser, surface hardness, boron carbide, steel AISI 4340.

---

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, São José dos Campos, SP.

<sup>2</sup>Instituto de Estudos Avançados - IEAv, EFO-L, São José dos Campos, SP.

## 1. Introdução

Lasers são amplamente utilizados em vários processos da manufatura industrial, como soldagem, corte, furação e têmpera. O crescimento da sua utilização e aplicação foi motivado, certamente, pela redução do custo do equipamento e o avanço tecnológico, que disponibilizou equipamentos com diferentes comprimentos de onda e elevadas densidades de energia ou intensidades. Entretanto, em meados da década de 70, devido ao alto custo do equipamento, era comum a utilização de lasers de baixa densidade no processamento de materiais metálicos. Dentre as inúmeras técnicas de deposições, por exemplo, feixe eletrônico, pulverização catódica, dentre outras, a deposição a laser tem sido utilizada com sucesso para aplicação de revestimentos de vários materiais com elevada taxa de deposição. Para suprir esta desvantagem da baixa densidade, utilizavam-se revestimentos com o MoS<sub>2</sub> ou grafita, para auxiliar na absorção da energia proveniente do feixe de laser, devido à alta refletividade pelos aços. Para a radiação de um laser de CO<sub>2</sub>, cujo comprimento de onda é de 10,6 μm, 90% da energia perdiam-se por reflexão na superfície dos aços e somente o restante era utilizada no processamento. Em trabalhos anteriores [1][2], utilizando grafita e/ou negro de fumo como acoplador em um processo de têmpera, apresentou-se a formação de um revestimento sobre a superfície do aço, após irradiação com feixe de lasers de CO<sub>2</sub>. Esta nova superfície revestida, quando submetida a ensaios tribológicos, apresentou seu coeficiente de atrito reduzido, onde antes apresentava 0,7 (aço sem revestimento) reduziu-se para 0,2 o coeficiente de atrito no aço com revestimento. E abaixo desta camada de revestimento pode ser observada uma camada difusa, que pode ter sido favorecida pelo revestimento, e a camada de têmpera. Portanto, neste processo pode-se obter cementação e têmpera simultaneamente [3].

A indústria oferece diferentes tipos de revestimentos, nos quais o carbeto de boro e o negro de fumo estão presentes. Sólidos ligados covalentemente baseados em boro, carbono ou nitrogênio, dão origem aos materiais mais duros que existem, como o B<sub>4</sub>C (carbeto de boro) que é o terceiro mais duro, após o diamante e o nitreto de boro cúbico. Além de elevada dureza, o B<sub>4</sub>C tem ponto de fusão de 2350°C e resistência à ação de reagentes químicos. Estas propriedades apontam o carbeto de boro como um bom candidato para aplicações em ambientes onde se requer, além de altas temperaturas, inércia química.

O negro de fumo ou negro de carbono, como também é conhecido, é formado por partículas finas obtidas pelo processo de pirólise (craqueamento) ou combustão parcial de hidrocarbonetos gasosos ou líquidos [4]. Ele apresenta grãos nanoparticulados, que favorece um recobrimento com camadas finas em áreas mais extensas. Além disso, possui elevada resistência mecânica.

As aptidões do laser em efetuar aquecimentos localizados com versatilidade de utilização e a variedade de tratamentos, que são possíveis, tornaram-no uma ferramenta importante para o tratamento superficial dos materiais. Para o tratamento de peças metálicas, o domínio de aplicações do laser está principalmente relacionado à formação de regiões tratadas de 0,1mm a 3mm sobre partes submetidas a altas solicitações mecânicas. Ainda que existam inúmeros processos para esta gama de tratamento, o laser possui vantagens exclusivas:

- Ligação metalúrgica perfeita entre a camada superficial e o substrato;
- Zona afetada termicamente reduzida, permitindo limitar ao máximo as distorções na peça;
- Taxas de resfriamento elevadas, favorecendo microestruturas extremamente finas e formação de novas fases;
- Excelente qualidade superficial, com pequeno ou nenhum custo em usinagem posterior;
- Ausência de contaminação química e de descarte de resíduos, pois nenhum líquido de resfriamento é utilizado.

O tratamento térmico de têmpera a laser consiste num aquecimento local da superfície do material metálico, promovendo o endurecimento por meio da energia absorvida através da irradiação do feixe de laser [5][6]. Se a densidade da potência for relativamente alta, uma camada fina na superfície do aço irá atingir a temperatura de austenitização (durante o aquecimento), e posteriormente com o resfriamento rápido, ocorrerá a formação de martensita. A profundidade da camada temperada 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. A têmpera a laser permite o endurecimento superficial com profundidade controlada, alcançada em altas temperaturas, de áreas específicas e/ou pequenas regiões de uma peça, com deformações mínimas na superfície quando comparado a outros métodos [7][8]. Neste processo, a temperatura na superfície do metal pode ser controlada pela densidade de

potência e pela velocidade do feixe, exemplificado pela Figura 1. Com a vantagem de que não haverá a necessidade de gastar energia para o aquecimento do volume total da peça, tornando o processo mais econômico. Através da têmpera, pode-se observar que em grande parte de aplicações práticas se obtêm propriedades diferenciadas quando expostas aos fenômenos térmicos (desgaste e corrosão). Há um favorecimento de melhores propriedades mecânicas como resistência a fadiga, tração, desgaste (redução do fator de atrito) e aumento da resistência a corrosão [9].

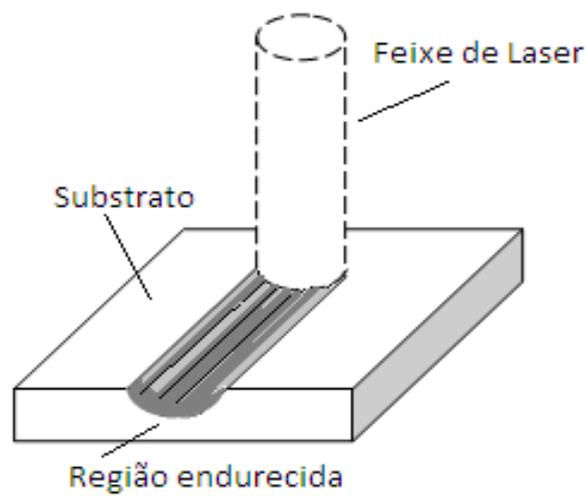


Fig. 1 - Representação esquemática da região tratada durante processamento de têmpera por laser.

O processo via laser é feito em atmosfera normal, e de fácil automação permitindo tratar geometrias complexas e não necessita câmaras especiais. Mediante este processo em desenvolvimento, é possível tratar superfícies com laser tanto para o setor aeroespacial quanto para a indústria de partes automotivas e mecânica, como moldes de injeção, matrizes e ferramentas em geral. Com a otimização das propriedades da superfície apenas nas áreas de trabalho crítico, é possível utilizar matérias-primas menos nobres, reduzindo o custo ou o peso dos materiais, o que é particularmente significativo para o setor aeronáutico e industrial.

O aço 4340 tem como principal característica a mais alta temperabilidade dentre os de construção mecânica. Tem usinabilidade e soldabilidade ruim, porém, boa forjabilidade. Dependendo do teor de carbono, a dureza na condição temperada varia de 250HV a 270HV. É utilizado na fabricação de virabrequins para aviões, tratores, veículos em geral e utilizado também na fabricação de engrenagens e eixos [10].

Neste trabalho será avaliado a utilização do revestimento de carbeto de boro, sobre o material metálico já revestido com negro de fumo, suas propriedades tribológicas e o comportamento microestrutural do material metálicos.

## 2. Metodologia

### *Caracterização dos materiais de partida*

O aço utilizado foi o AISI 4340, cuja composição química é apresentada na Tabela 1. A análise da composição química foi realizada através do espectrômetro de emissão ótica Thermo Scientific, modelo ARL 3460 OES Metals Analyzer.

Tabela 1 - Composição química do aço 4340 - % massa.

	<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
<i>Aço 4340</i>	95.79	0.361	0.638	0.261	0.794	1.702	0.221	0.024	0.008

Como o tamanho médio de partícula influencia na espessura da camada depositada e no revestimento após a irradiação do laser, os pós foram caracterizados, para determinação da distribuição do tamanho de partículas através do ensaio por difração a laser. A difração a laser baseia-se no princípio da difração de Fraunhöffer, que descreve quanto menor o tamanho da partícula, maior o ângulo de difração de um feixe luminoso que atravessa uma população de partículas. Essa técnica não mede partículas individuais [11]. Por este método, as partículas são dispersas num fluido em movimento e um feixe de luz as irradia. Através de detectores mede-se a intensidade e o ângulo da luz espalhada. Os sinais detectados são convertidos através de transformações matemáticas complexas, onde calcula-se uma estatística de distribuição de tamanho dessa população de partículas [12].

A Figura 2 apresenta a curva de distribuição granulométrica, onde se obteve através do ensaio de difração a laser, um histograma do tamanho médio de partículas do carbeto de boro, sendo da ordem de 1,89  $\mu\text{m}$ , e o tamanho médio de partículas do negro de fumo, sendo da ordem de 9,06  $\mu\text{m}$ . O equipamento utilizado foi o CILAS 1064L, com range de 0,04 a 500  $\mu\text{m}$ .

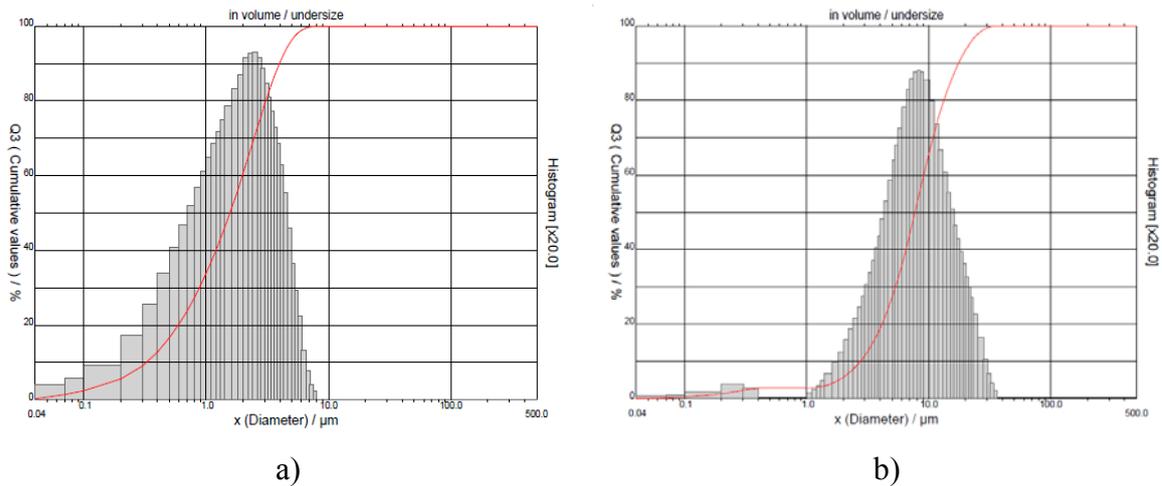


Fig. 2 - Histograma da distribuição granulométrica do a) carбето de boro e b) negro de fumo.

### *Preparação das amostras e aplicação dos materiais cerâmicos*

Inicialmente, foram preparadas amostras de aproximadamente 20 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, previamente lixadas, com granulométricas diferentes (granos 280 a 600) e posteriormente limpas por 15 minutos em ultra-som mergulhadas em acetona. Em seguida, as amostras foram aspergidas com uma solução de negro de fumo feita a partir de 10 g de negro de fumo e 0,1 g de carboximetilcelulose sódica (CMC) em 100 ml de álcool etílico absoluto e misturada por 20 minutos em um agitador mecânico. Posteriormente aplicou-se, com uma pistola pneumática, uma camada homogênea da solução, recobrando toda a superfície da amostra. Após a preparação do substrato e aplicação da solução de negro de fumo, a superfície das amostras foi irradiada com laser de CO<sub>2</sub>, com potência de saída igual a 50 W, diâmetro do feixe de laser de 300 μm, e um fluxo de nitrogênio para evitar a oxidação da camada tratada.

A superfície então recoberta com negro de fumo foi aspergida com uma nova camada, a de carбето de boro e em seguida, irradiado com feixe de laser. A solução utilizada foi preparada em moagem mecânica por 32 horas, com 25 g de carбето de boro em pó e 0,24 g de carboximetilcelulose sódica (CMC), para aumentar a resistência a verde da camada, em 200 ml de álcool etílico absoluto. O esquema do processo é apresentado na Figura 3.

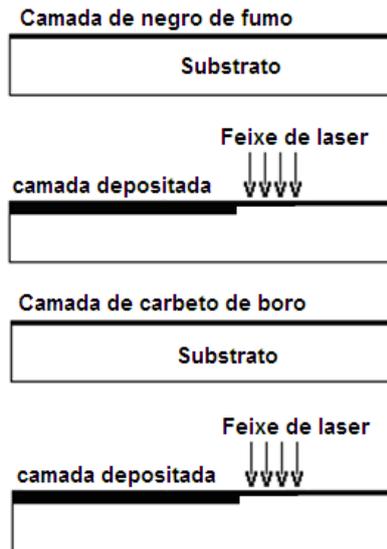


Fig. 3 - A amostra de aço AISI 4340 é recoberta primeiramente por uma camada de negro de fumo, onde é irradiada com o feixe de laser, e posteriormente recobriu-se-á com uma camada de carbeto de boro e irradiou-a com feixe de laser.

O laser de CO<sub>2</sub> utilizado, Marca: Synrad e Modelo: J48-5W, apresenta um arranjo de espelhos galvanométricos, onde no processo de irradiação, o feixe de laser movimenta-se sobre a superfície da amostra sendo guiado pelos espelhos galvanométricos, gerando trilhas de espessura e largura determinadas através de um software interligado com o laser [13]. A Figura 4 apresenta o arranjo experimental do laser utilizado.

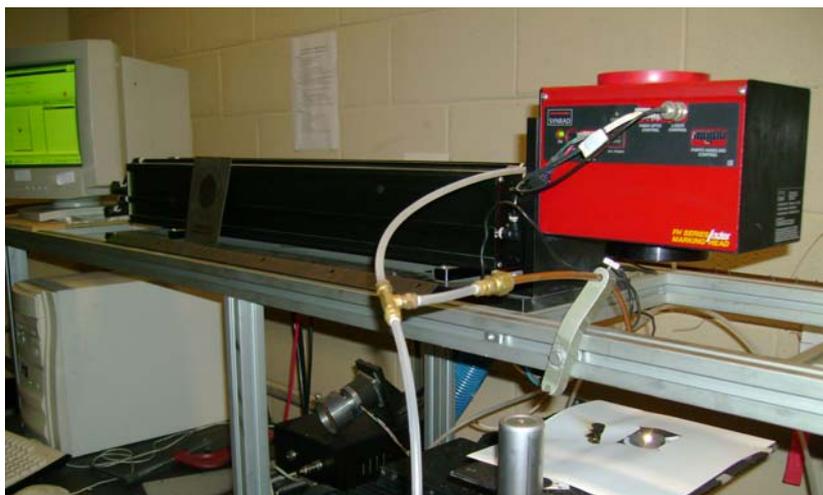


Fig. 4 - Laser de CO<sub>2</sub>. Na caixa retangular, localizam-se os espelhos galvanométricos que guiam o feixe na superfície da amostra.

Os principais parâmetros de laser do processo são: velocidade de varredura (mm/s), resolução – número de pulsos por unidade de área (ppp), números de ciclos de aquecimento (NCA), intensidade do feixe de laser (W/cm<sup>2</sup>), potência do feixe (W) e sobreposição de camadas (SC). O parâmetro a ser utilizado para o revestimento de negro de fumo foi obtido através de estudos anteriores, onde é apresentado o melhor resultado das análises [3]. E o parâmetro definido para o carbetto de boro foi de acordo com a análise da microestrutura obtida por microscopia óptica (MO), onde se avaliou a melhor condição de tratamento térmico, recobrimento e menor remoção da superfície. A Tabela 2 mostra os parâmetros de laser utilizados no processo de irradiação das amostras.

Tabela 2 - Parâmetros do laser utilizados para a irradiação do negro de fumo e carbetto de boro no aço AISI 4340.

<i>Amostras</i>	<i>V(mm/s)</i>	<i>Resolução</i>	<i>NCA</i>	<i>I (kW/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>P(W)</i>
Negro de Fumo	60	300	5	55	50
B <sub>4</sub> C	20	400	8	15	50

Após tratamento com o feixe de laser, as amostras foram cortadas transversalmente à direção da irradiação e preparadas por métodos metalográficos para a observação da microestrutura da superfície e do substrato. Utilizou-se Nital 3% para revelar as fases presentes. A análise microestrutural foi realizada através do microscópio óptico Leica AG, Modelo: 302001 e caracterizado quanto à dureza da camada tratada até o substrato, pelo microindentador Future Tech, Modelo: FM-700.

As amostras foram submetidas a ensaios tribológicos para se determinar o coeficiente de atrito. Os parâmetros utilizados no ensaio foram: velocidade linear igual a 10 cm/s, raio da pista de 5 mm, esfera de aço 52100 com 6 mm de diâmetro, número de voltas iguais a 2000 e carga igual a 5 N. Neste ensaio, a amostra em estudo é apoiada em um suporte de rotação com um pino ou esfera em contato com a superfície da amostra e sobre uma carga conhecida, a amostra é rotacionada para simular atrito e desgaste [3]. A Figura 5 apresenta o esquema do tribometro.

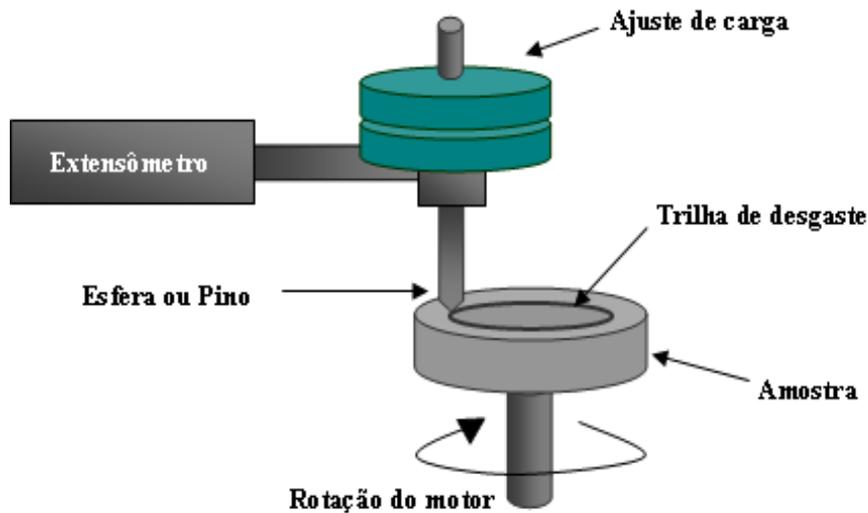


Fig. 5 - Desenho esquemático do teste de tribologia.

### 3. Resultados e Discussões

Através de ensaios previamente realizados, nos testes de irradiação somente com o revestimento de carbeto de boro sobre o aço, apresentou-se uma ancoragem ineficiente da camada cerâmica sobre o metal, portanto utilizou-se revestimento de negro de fumo para ancorar o carbeto de boro. Como apresentado em estudos anteriores o negro de fumo facilitou a absorção de cerca de 90% da radiação incidente quando se utiliza laser de CO<sub>2</sub> e, devido a essa absorção de energia, gera elevadas temperaturas que facilita a molhabilidade do revestimento no substrato, favorecendo a formação de camadas intermediárias que facilitam a ancoragem.

Através da análise por microscopia óptica, observou-se que os parâmetros do laser influenciam na qualidade da deposição do carbeto de boro na superfície do aço. Os parâmetros selecionados para o carbeto de boro foram, velocidade de 20 mm/s, resolução de 400 ppp, NCA = 8 e intensidade de 15 kW/cm<sup>2</sup>. O recobrimento obtido com estes parâmetros é apresentado na Figura 6.

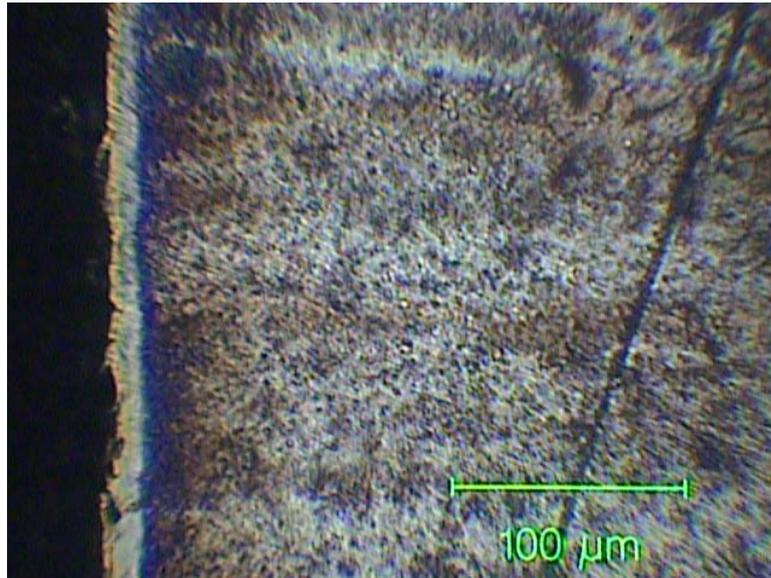


Fig. 6 - Micrografia da secção transversal da amostra final.

O valor médio da microdureza do aço AISI 4340 sem o tratamento térmico é de  $250 \text{ HV} \pm 20$ . Após o tratamento térmico com laser de  $\text{CO}_2$ , pode-se observar que a dureza da amostra aumentou expressivamente, na região tratada, atingindo médias da ordem de  $850 \text{ HV} \pm 20$ , ou seja, até 3 vezes maiores do que os valores de dureza do material sem tratamento, e com extensão desta região tratada de  $90 \mu\text{m}$ . A Figura 7 apresenta os valores da microdureza em função da distância da superfície tratada até o substrato.

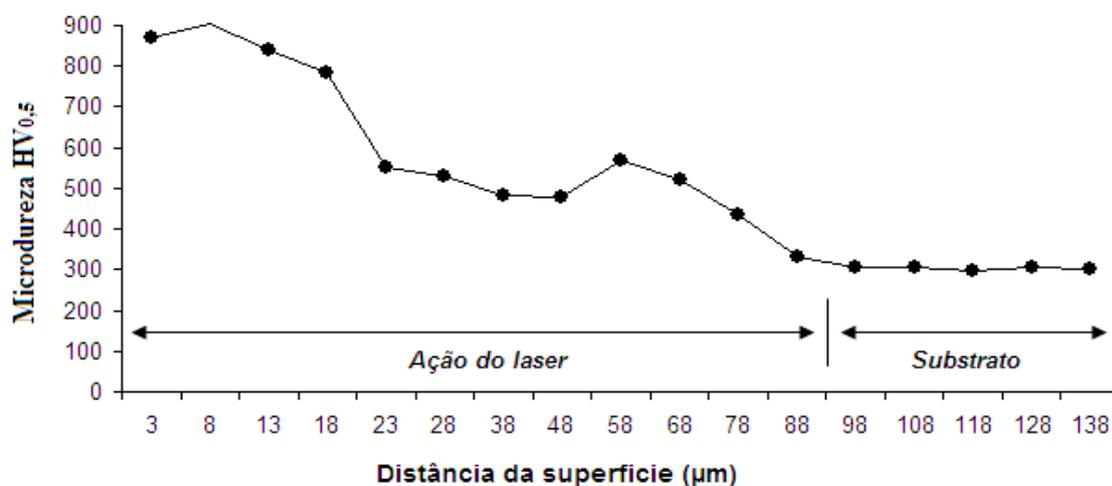


Fig. 7 - Resultados do perfil de microdureza da amostra final.

A análise tribológica demonstrou que o coeficiente de atrito da amostra inicial sem revestimento é da ordem de 0,6 a 0,7 e com o revestimento de carbeto de boro o coeficiente reduziu para 0,2, apresentado na Figura 8. Também pode ser observado que o coeficiente de atrito inicial da amostra com revestimento é de 0,35, devido a rugosidade existente na superfície da amostra, que decresceu e manteve-se constante percorrendo 30 m, provavelmente, devido à redução da rugosidade promovida pelo revestimento.

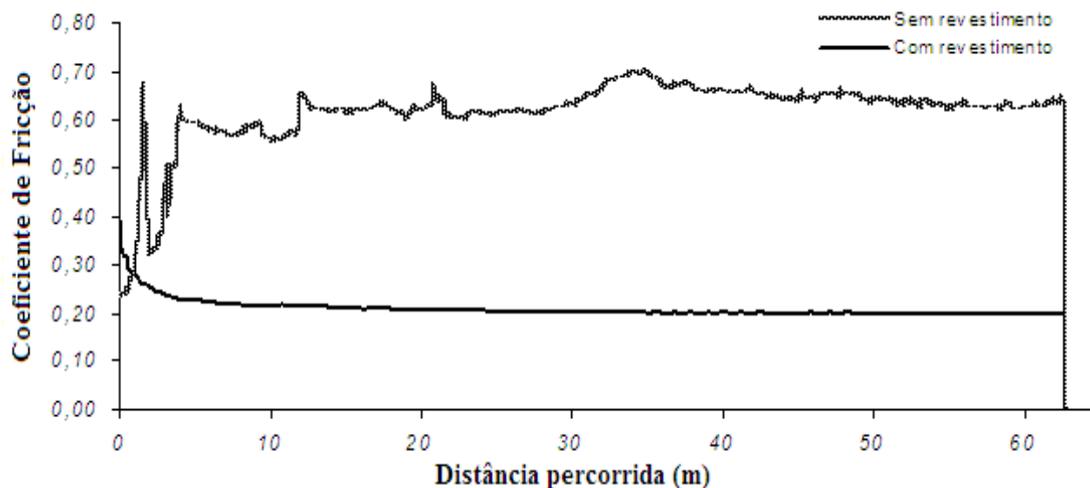


Fig. 8 - Resultado de coeficiente de atrito do aço 4340 com revestimento e sem revestimento de  $B_4C$ .

#### 4. Conclusão

O método de tratamento superficial via laser não foi eficaz em aplicações de recobrimento somente de carbeto de boro em aço, pois observou a ocorrência de destacamento do revestimento, por isso houve a necessidade de uma aplicação previa de uma camada de negro de fumo para aumentar a absorção da irradiação incidente e melhorar o processo difusivo formando uma camada intermediária que favoreceu o ancoramento do revestimento de carbeto de boro.

Houve tratamento térmico duplo e simultâneo, devido a sobreposição de camadas dos pós, que favoreceu a formação de têmpera superficial, e com revestimento cerâmico possibilitou um menor coeficiente de atrito. Com o revestimento de carbeto de boro obtêm-se uma inércia química, e além da elevada dureza superficial. Devido às propriedades adquiridas, esse material tratado pode ser utilizado em aplicações como

tanques e tubulação ou qualquer peça que tenha contato com agentes químicos, e em ferramentas de processo de estampagem e forjamento que necessita de minimização dos desgastes.

Intensidades baixas do feixe de laser promovem superfícies revestidas homogêneas e com microestrutura mais refinada. Elevados valores de resolução e/ou altos valores de intensidade não necessariamente indicam que maior dureza superficial seja atingida na parte tratada, pois, neste caso, o resfriamento pode estar comprometendo a formação da fase esperada.

Com tudo, o trabalho apresentou a possibilidade de um aço aderir um revestimento cerâmico e ao mesmo tempo sofrer um tratamento superficial via laser de CO<sub>2</sub>. Demonstrou a viabilidade do processo a laser, que dispensa a utilização de vácuo ou atmosfera inerte confinada e a viabilidade de tratamento de superfície de dimensões reduzida, e uma melhor ancoragem do revestimento reduzindo o stress mecânico-térmico, mediante a formação de uma nova interface na zona de aquecimento, dispensando-se, assim, a utilização de binders ou camadas de acomodação térmica.

## **5. Agradecimentos**

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

## **6. 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] SILVA, A. F., Avaliação tribológica da aplicação de lubrificantes sólidos com laser de CO<sub>2</sub> em ATM ambiente em aços AISI 52100, 2010, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

[3] Chagas, D. C.; Dias, A. N.; Antunes, E. F.; Vasconcelos, G., APLICAÇÃO DE LUBRIFICANTES SÓLIDOS (NEGRO DE FUMO) E TRATAMENTO TÉRMICO SUPERFICIAL DE TÊMPERA EM MATRIZES DE AÇO AISI 4340 VIA LASER DE

CO<sub>2</sub>, IV SICI - Anais do Seminário Anual de Iniciação Científica e Pós Graduação do IEAv, vol.1, São José dos Campos, São Paulo, 2010, ISSN 2175-2729.

[4] Informe Setorial N°09-Complexo Químico, Negro de Fumo, BNDES- Janeiro de 98.

[5] R. A. Ganeev, Low-power laser hardening of steels, Journal of Materials Processing Technology, 121(2002), 414-419.

[6] J. BENEDEK, A. SHACHRAI, L. LEVIN, Case hardening of steel by a CO<sub>2</sub> laser beam, OPTICS AND LASER TECHNOLOGY. OCTOBER 1980.

[7] Dohotre, N. B., Lasers in Surface Engineering – Surface Engineering Series, Volume 1, ASM International – The Materials Information Society, 1998, Chapter 1 and 3.

[8] I. F. Machado, Technological advances in steels heat treatment, Journal of Materials Processing Technology, 172(206), 160-173.

[9] Stein, C. R.; Hermenegildo, T. F.; Araújo, F. G. S.; Cota A. B., EFEITO DA RÁPIDA AUSTENITIZAÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO SAE1045, Metalurgia e Metais, REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, p. 51-56, jan./mar. 2005, Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rem/v58n1/a09v58n1.pdf>, acessado em: 08/04/2009.

[10] Comercial Gerdau. AÇOS PARA BENEFICIAMENTO. Disponível em: [http://www.comercialgerdau.com.br/produtos/acos\\_especiais\\_beneficiamento.asp](http://www.comercialgerdau.com.br/produtos/acos_especiais_beneficiamento.asp), Acessado em: 20/01/2010.

[11] Análise de distribuição de tamanho de partículas - Difração a laser (Fraunhöffer). Disponível em: <http://www.instrutec.com.br/v2/produtos/particulas/Difracao.html>. Acessado em: 10/06/2010.

[12] Papini, C. J, Neto, R. M. L., Análise Granulométrica de pós metálicos por difração de laser via seca, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

[13] L. C. M. Lavras, J. L. dos Reis, G. de Vasconcelos, Tratamento térmico de aço SAE 1045 via laser de CO<sub>2</sub> de baixa potência, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.