

# DISPOSITIVO DE MICROTTEXTURIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES INTERNAS DE CILINDROS UTILIZANDO UM LASER VISÍVEL DE ALTA TAXA DE REPETIÇÃO

## **Rudimar Riva**

Instituto de Estudos Avançados, Rod. Tamoios, km 5, S. José dos Campos, SP, riva@ieav.cta.br

## **Davi Neves**

Instituto de Estudos Avançados, Rod. Tamoios, km 5, S. José dos Campos, SP, davis@ieav.cta.br

## **José Guilherme Alvarenga Batista Simões**

Instituto de Estudos Avançados, Rod. Tamoios, km 5, S. José dos Campos, SP, gmsimoes@ieav.cta.br

## **Sérgio Stefano Guerreiro**

ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo, Av. Alfred Krupp, 1050, Campo Limpo Paulista, SP, sergio.guerreiro@thyssenkrupp.com

**Resumo.** Neste trabalho é descrito o desenvolvimento de um dispositivo projetado para texturizar de forma regular e em escala micro-métrica, as superfícies internas de peças cilíndricas. A geração de uma estrutura regular de microcavidades em componentes móveis tem por objetivo a redução do coeficiente de atrito das superfícies de contato. As microcavidades foram obtidas utilizando um laser de Nd-YAG (532 nm) que emite pulsos curtos de radiação ( $< 100$  ns) e taxas de repetição de pulsos de até 20 kHz. O feixe de laser é focalizado sobre a superfície de peças utilizando um sistema óptico de distância focal variável que permite produzir microcavidades com diâmetros entre  $80 \mu\text{m}$  e  $120 \mu\text{m}$  e profundidade controlada pelo número de pulsos aplicados entre  $2 \mu\text{m}$  e  $50 \mu\text{m}$ . Um dispositivo mecânico de movimentação linear e angular, atuado por motores de passo de alta resolução e controlado por um módulo de programação lógica (PLC) posiciona o feixe de laser com uma precisão de  $\pm 2.5 \mu\text{m}$ . O dispositivo foi utilizado para texturizar a superfície interna de cilindros de aço (AISI 1070) com 40 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. Em toda a superfície interna do cilindro foram geradas mais de 13.0000 microcavidades com dimensões altamente regulares: diâmetro de  $85 \pm 2 \mu\text{m}$ , espaçamento de  $270 \pm 4 \mu\text{m}$  e profundidade controlada no intervalo entre  $10 \pm 2 \mu\text{m}$  e  $40 \pm 2 \mu\text{m}$ .

**Palavras-chave:** texturização a laser, ablação a laser, atrito, desgaste

## **1. INTRODUÇÃO**

O processo de microtexturização consiste na geração de microcavidades em superfícies de contato de componentes móveis, que atuam como reservatórios de lubrificante e armadilhas para os resíduos particulados, reduzindo de forma significativa o coeficiente de atrito e o desgaste dos componentes. A melhoria das propriedades tribológicas da superfície, é obtida com a geração de microcavidades de dimensões controladas e distribuição regular em toda a superfície de contato.

Diversos métodos podem ser utilizados para realizar a microtexturização de superfícies<sup>(1)</sup>: indentação mecânica, abrasão controlada, canhão de elétrons, ataque químico e mais recentemente,

ablação a laser. A texturização com laser vem sendo cada vez mais empregada, pela facilidade de controle dimensional das microcavidades. Vários componentes mecânicos são atualmente texturizados com esta técnica<sup>(2)</sup>: selos mecânicos, rolamentos, cilindros de motores, mancais, bielas, rotores de motores de indução.

Para superfícies de contato planas, o processo de texturização a laser é simples e pode ser realizado movimentando-se o feixe focalizado do laser com um sistema comercial de gravação de espelhos móveis<sup>(3)</sup>, ou simplesmente focalizando o feixe no componente que é fixado em um sistema de movimentação de dois eixos<sup>(4)</sup>. Entretanto, para a texturização da superfície interna de peças com geometria cilíndrica, como mancais e cilindros, não existem dispositivos prontos que possam ser adaptados facilmente. Assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo de ensaios de texturização a laser em peças com geometria cilíndrica.

## 2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS IMPORTANTES DO PROJETO

### 2.1 Fundamentos do Processo de Ablação a Laser

No processo de texturização de superfícies com o objetivo de melhoria de suas propriedades tribológicas, as microcavidades devem ser fabricadas com diâmetros entre 50 µm e 100 µm e profundidades entre 5 µm e 50 µm. Estes requisitos dimensionais podem ser obtidos facilmente pelo processo conhecido como ablação a laser, onde pulsos curtos de radiação (< 100 ns), com densidades de potência elevada (> 10<sup>7</sup> W/cm<sup>2</sup>), provocam a rápida evaporação do material da superfície. Com estas condições, praticamente toda a energia do pulso de radiação do laser absorvida na superfície do material é utilizada na vaporização do material, e assim a profundidade  $L_C$  da microcavidade por uma equação de balanço de energia, expressa por<sup>(5)</sup>:

$$L_C = \frac{\epsilon E_p}{A_c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{[L_V + L_f + c_p(T_V - T_a)]} \quad (1)$$

onde  $E_p$  é a energia do pulso do laser e  $A_c$  a área do feixe focalizado;  $\epsilon$  é o coeficiente de absorção do material no comprimento de onda do laser e  $\rho$  é a densidade do material;  $L_V$  e  $L_f$  são respectivamente o calor latente de vaporização e de fusão;  $c_p$  é o calor específico do material;  $T_V$  é a temperatura de vaporização e  $T_a$ , a temperatura ambiente.

Um laser de Nd-YAG (Coherent-Corona), dobrado em frequência (532 nm) e bombeado por diodos foi utilizado nos ensaios de texturização. O laser opera em regime pulsado, com frequências de repetição de pulsos variável entre 1 kHz e 20 kHz. Neste intervalo de frequências, a largura temporal do pulso de laser aumenta de 40 ns para 120 ns. A energia e a potência de pico dos pulsos de radiação variam com a frequência de repetição e a corrente de bombeamento dos diodos. A Figura 1 mostra os valores máximos da energia (em mJ) e da potência de pico (em kW) em função da frequência de repetição para o laser operando na corrente máxima de bombeamento, ( $I = 23$  A).

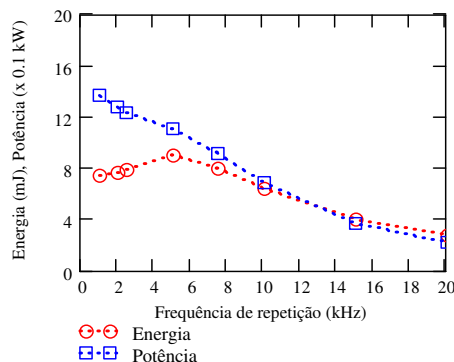


Figura 1. Parâmetros de operação do laser de Nd-YAG operando com a máxima corrente.

Utilizando as propriedades térmicas e óticas do ferro (Tabela 1), e considerando um diâmetro de 100  $\mu\text{m}$  do feixe de laser focalizado na superfície, é possível estimar-se a profundidade máxima das microcavidades que seria obtida um único pulso do laser de Nd-YAG em função da frequência de repetição do laser.

Tabela 1. Propriedades Físicas do Ferro.

Propriedade	$\varepsilon$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$L_v$ (J/kg)	$L_f$ (J/kg)	$c_p$ (J/g.K)	$T_v$ (K)
	0,4	7870	6,0.10 <sup>6</sup>	2,7.10 <sup>5</sup>	450	3023

Utilizando estas propriedades na Equação 1, estima-se que a profundidade das microcavidades geradas pelo laser de Nd-YAG com um diâmetro de feixe de 100  $\mu\text{m}$  é de 1  $\mu\text{m}/\text{mJ}$ , o que implica que a profundidade máxima que pode ser obtida com um único pulso de laser é 9  $\mu\text{m}$ .

Assim, para maiores profundidades de microcavidades são necessários vários pulsos de laser incidindo na mesma posição do material. Como o feixe de laser é deslocado continuamente sobre a peça, os pulsos de laser incidirão em posições diferentes na peça. Para que os vários pulsos de laser aprofundem a cavidade é necessário que o deslocamento da posição do feixe durante o tempo de aplicação do laser não seja maior que o diâmetro do feixe, o que limita velocidade de processo e leva a formação de cavidades assimétricas. Este efeito é mostrado qualitativamente na Figura 2, onde a vista de topo da superfície mostra os vários pulsos de laser que incidem em posições deslocadas e uma vista lateral em profundidade mostrando a provável forma dos furos na direção de movimentação do feixe. A largura da cavidade é definida pelo diâmetro do feixe focalizado, e o seu comprimento depende da velocidade de translação e do tempo de aplicação dos pulsos de laser.

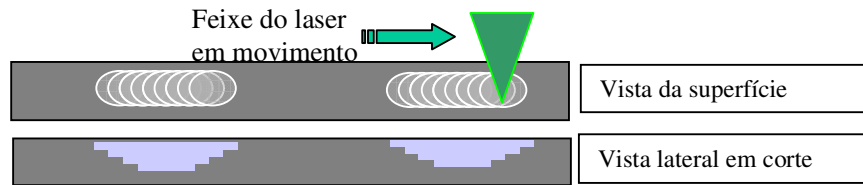


Figura 2. Geometria do processo de furação de uma amostra em movimento.

## 2.2 Focalização do feixe de radiação

Outro fator importante no processo de ablação por laser é a qualidade do feixe de radiação, que limita o diâmetro mínimo da cavidade e a tolerância na posição de incidência do feixe, definida pela profundidade de foco, como mostrado na Figura 3.

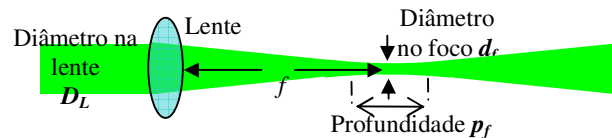


Figura 3. Esquema da região de focalização do feixe de laser.

O diâmetro do feixe de laser focalizado por uma lente de distância focal  $f$  é definido por<sup>(6)</sup>:

$$d_f = \frac{4\lambda f}{\pi D_L} M^2 \quad (2)$$

onde  $\lambda = 532$  nm é o comprimento de onda do laser,  $d_f$  é o diâmetro no foco e  $D_L$  é o diâmetro do feixe na entrada da lente de distância focal  $f$ . O parâmetro  $M^2$  define a qualidade do feixe, que no modo fundamental tem  $M^2=1$ . A profundidade de foco  $p_f$  é definida pela distância na qual o diâmetro do feixe não varia mais do que 5 %, e é expressa por:

$$p_f = 0,5 \frac{d_f^2}{\lambda M^2} \quad (3)$$

O feixe de radiação do laser de Nd-YAG utilizado neste trabalho tem um fator de qualidade  $M^2 = 36$ , o que impõe uma limitação no diâmetro mínimo que pode ser utilizado de forma prática no processo de texturização. Para o intervalo de diâmetros entre 50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , a profundidade de foco com este laser fica entre 60  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$ , que define a máxima tolerância no posicionamento mecânico das amostras. Por esta razão, o menor diâmetro de cavidade a ser gerada com este laser fica restrito ao maior valor de diâmetro, i.e., 100  $\mu\text{m}$ .

Para se obter um diâmetro do feixe focalizado de 100  $\mu\text{m}$  com o laser de Nd-YAG, que tem um feixe de radiação de saída de apenas 5 mm de diâmetro, a lente deve ter uma distância focal de apenas 20 mm (ver Equação 2). Para aplicar o laser na superfície interna de componentes cilíndricos utiliza-se um espelho a 45° para desviar o feixe na direção da superfície, o que limitaria a aplicação do dispositivo para componentes com diâmetro interno inferior a 20 mm.

Para aumentar o intervalo de diâmetros dos componentes, foi projetado um sistema óptico triplo, mostrado abaixo na Figura 4.

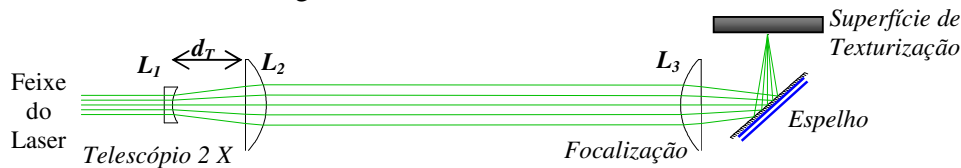


Figura 4. Sistema óptico de focalização com correção de aberração esférica.

O sistema óptico de focalização foi projetado livre de aberrações ópticas com o programa OSLO<sup>(7)</sup>, para uma razão  $(f/D_L) \geq 2$ . As lentes  $L_1$  e  $L_2$ , com distâncias focais  $f_1 = -20$  mm e  $f_2 = 40$  mm compõe um telescópio expensor de 2X. A terceira lente  $L_3$ , com distância focal  $f_3 = 40$  mm, focaliza o feixe sobre a amostra. Com a expansão do diâmetro do feixe de laser, a distância focal efetiva do sistema é de 40 mm, com um diâmetro do feixe focalizado  $d_f = 100$   $\mu\text{m}$ . Com este sistema óptico, a distância entre a saída do conjunto óptico (lente  $L_3$ ) e a superfície do componente pode ser variada, alterando-se a distância  $d_T$  entre as lentes  $L_1$  e  $L_2$  do telescópio. Dessa forma, é possível processar componentes com diâmetros entre 30 mm e 60 mm, mantendo-se o diâmetro do feixe focalizado entre 80  $\mu\text{m}$  e 120  $\mu\text{m}$ .

### 3. DISPOSITIVO DE MOVIMENTAÇÃO DO FEIXE

O sistema óptico de focalização foi fixado em um estágio de translação linear, suportado por dois guias lineares e um fuso de 5 mm de passo, como mostrado na Figura 5.

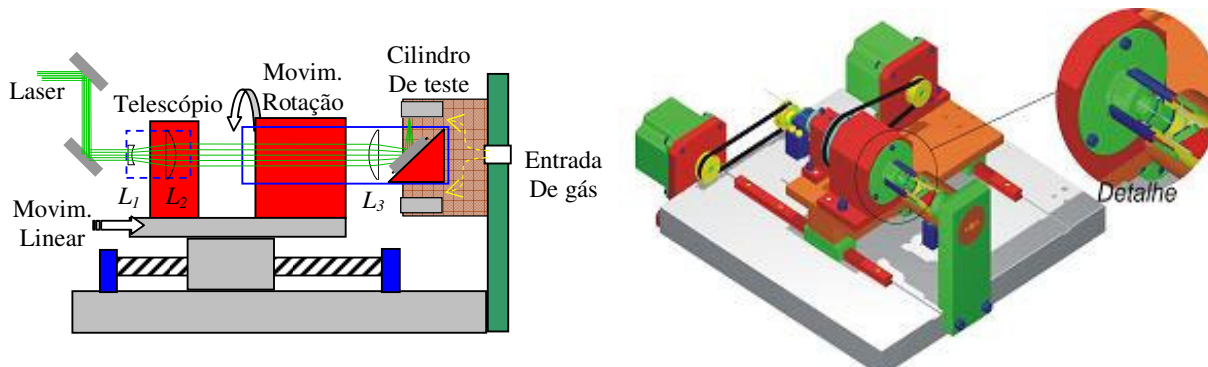


Figura 5. Diagrama do dispositivo de microtexturização.

O feixe do laser é direcionado à entrada do telescópio por meio de dois espelhos de alta refletividade. A perda total de potência ao passar pelo sistema ótico é de 30 %. O fuso é acionado por meio de um motor de passo de alta resolução (10.000 passos/volta). A lente de focalização  $L_3$  e o espelho de desvio de feixe são separados do telescópio ( $L_1$ - $L_2$ ), e montados em um estágio de rotação controlado por um motor de passo de alta resolução, acoplado ao eixo de rotação por um sistema de transmissão com redução de 3:1. A resolução no posicionamento angular do feixe de laser é de  $0,012^\circ$ . A velocidade de rotação dos motores de passo é controlada entre 0,1 rpm e 100 rpm, por meio de um Controlador Lógico Programável (LG, Mod. PLC MK-125). O CLP controla a posição inicial e final do processo de texturização enviando um sinal de controle modulado ao laser de Nd-YAG como mostrado na Figura 6.

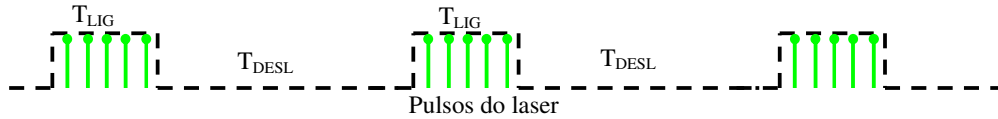


Figura 6. Sinal modulado do CLP para controle dos pulsos de laser.

O tempo de exposição ( $T_{LIG}$ ) e a frequência de repetição dos pulsos do laser controlam o número de pulsos aplicados e consequentemente, a profundidade da microcavidade. O espaçamento entre as microcavidades é controlado variando-se a velocidade de rotação e o intervalo de tempo em que o laser permanece desligado ( $T_{DESL}$ ).

O dispositivo foi utilizado para texturizar cilindros de aço (AISI 1070), fixados em um flange centralizado com o eixo de rotação do sistema ótico. Um gás em alta pressão ( $N_2$ , Ar) é injetado entre o cilindro de ensaio e o suporte da ótica de focalização para proteger o espelho de desvio.

## 4. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MICROTTEXTURIZAÇÃO

### 4.1 Preparação das amostras de ensaio

Os ensaios de microtexturização foram efetuados com cilindros de aço AISI 1070, com diâmetro interno de 40 mm. As amostras foram limpas com ultra-som em uma solução de tricloroetileno, em seguida lavadas com álcool isopropílico, e submetidas a um fluxo de Nitrogênio para a retirada dos resíduos de álcool.

Após a aplicação do laser, as amostras foram polidas com lixa 1200 Gr para retirada do material depositado, e foi repetido o procedimento de limpeza com ultra-som para remoção de resíduos do interior das microcavidades. A Figura 7 mostra as micrografias óticas das microcavidades, antes e após o polimento.

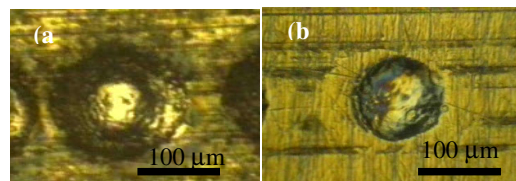


Figura 7. Microscopia ótica da superfície da microcavidade: (a) antes e (b) após o polimento.

A profundidade foi medida localizando a imagem de topo e de fundo da microcavidade com um microscópio ótico de alta resolução (Reichert, Mod. Polyvar 2), acoplado a um micrômetro com 1  $\mu$ m de resolução no posicionamento da imagem. Foram realizadas três medições para cada condição experimental, e o erro médio na determinação das profundidades foi de  $\pm 2 \mu$ m.

### 4.2 Controle das dimensões das microcavidades

A Figura 8 mostra os resultados obtidos experimentalmente para a profundidade e o diâmetro das microcavidades obtidos experimentalmente em função da frequência de repetição de pulsos e

para dois valores de corrente  $I$  de bombeamento do laser:  $I = 18 \text{ A}$  e  $I = 23 \text{ A}$ . Em ambos os casos, a dependência da energia dos pulsos do laser com a frequência de repetição de pulsos segue o comportamento mostrado na Figura 1, com um valor máximo de energia em 5 kHz igual a 3 mJ para  $I = 18 \text{ A}$  e 6 mJ para  $I = 23 \text{ A}$ .

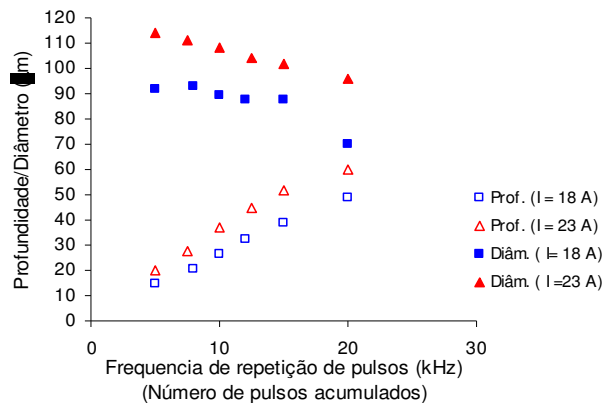


Figura 8. Profundidade e diâmetro das microcavidades em função da frequência de repetição de pulsos (ou número de pulsos aplicados) para  $I = 18 \text{ A}$  ( $\square$ ) e  $I = 23 \text{ A}$  ( $\triangle$ ).

O tempo de exposição (aplicação) do laser em cada microcavidade foi mantido constante em 1 ms, com uma velocidade de translação de 20 mm/s. Nesta velocidade o deslocamento do feixe do laser durante o tempo de exposição é inferior a 15  $\mu\text{m}$ , e pode-se considerar que todos os pulsos são praticamente aplicados na mesma posição. O diâmetro das microcavidades varia pouco com a frequência de repetição de pulsos e depende mais fortemente da energia. Os valores encontrados, entre 80  $\mu\text{m}$  e 110  $\mu\text{m}$  estão de acordo com o valor calculado para o sistema ótico com uma distância focal efetiva de 38 mm.

A profundidade das microcavidades aumenta linearmente com o número de pulsos aplicados, o que permite facilmente controlar as dimensões das microcavidades. Para o laser operando com uma corrente  $I = 18 \text{ A}$ , a profundidade média por pulso varia entre 2,5  $\mu\text{m}$  e 3,0  $\mu\text{m}$ , e para a maior corrente ( $I = 23 \text{ A}$ ), entre 3,0  $\mu\text{m}$  e 4,0  $\mu\text{m}$ . Os resultados experimentais obtidos podem ser comparados com aqueles estimados pela Equação 1, considerando-se a profundidade média por pulso em cada condição experimental em função da densidade de energia do pulso de laser (Energia/Área), que é calculada levando em conta os valores de diâmetros medidos. Esta comparação é mostrada na Figura 9, onde vemos uma boa concordância entre os valores estimados pela Equação 1, representados pela reta (linha pontilhada) e os resultados experimentais.

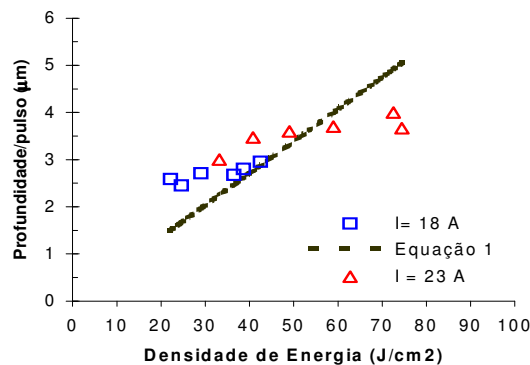


Figura 9. Profundidade média por pulso em função da densidade energia.

Um exemplo do controle e regularidade que pode ser obtido com o dispositivo variando o número de pulsos aplicados é mostrado na Figura 10, onde a corrente de laser foi mantida em  $I = 18 \text{ A}$  e a frequência de repetição em 8 kHz.

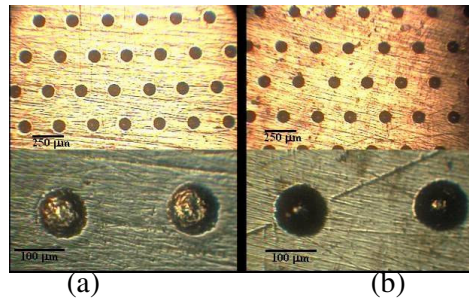


Figura 10. Microscopia óptica das microcavidades para (a) 4 e (b) 8 pulsos de laser aplicados.

Cerca de 13.000 microcavidades foram geradas em um cilindro de 40 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. Os resultados de 100 medições das dimensões das microcavidades obtidas para os dois ensaios (4 e 8 pulsos) é mostrado na Tabela 2 abaixo, confirmando o bom controle da profundidade com o número de pulsos aplicados.

Tabela 2. Medição das dimensões das microcavidades.

Número de pulsos	<i>Diâmetro</i>	<i>Profundidade</i>	<i>Espaçamento</i>
4	$82 \pm 2 \mu\text{m}$	$11 \pm 2 \mu\text{m}$	$270 \pm 4 \mu\text{m}$
8	$85 \pm 2 \mu\text{m}$	$23 \pm 2 \mu\text{m}$	$273 \pm 3 \mu\text{m}$

## 5. CONCLUSÃO

Foi projetado e construído um dispositivo de texturização a laser para componentes cilíndricos, com excelente controle das dimensões das microcavidades. A regularidade de espaçamento e o controle da profundidade das microcavidades obtidas com este dispositivo atendem perfeitamente os critérios exigidos em aplicações de melhoria das propriedades tribológicas de superfícies de contato.

## 6. AGRADECIMENTOS

O trabalho foi parcialmente financiado pela empresa ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo, através do convênio THYSSENKRUP/FCMF/IEAv # 01/2005.

## 7. REFERÊNCIAS

1. ETSION, I. State of the art in laser surface texturing. **Journal of Tribology - Transactions of ASME**, vol.127, n.1, p.248-253, 2005.
2. ETSION, I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing, **Tribology Letters**, vol.17, n.4, p.733-737, 2004.
3. DUNSKY, C. High-speed microvia formation with uv solid-state lasers. **Proceedings of the IEEE**, vol. 90, p. 1670-1680, 2002.
4. DUMITRU, G. et al. Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications. **Applied Physics A – Materials Science & Processing**, vol.70, n.4, p.485-487, 2000.
5. READY, John F. **Industrial applications of lasers**. 2 ed. New York: Academic Press, 1997, p.385.
6. STEEN, William M. **Laser Material Processing**. 2 ed. London: Springer, 1998, p.85.
7. OSLO – The Optical Software for Layout and Optimization- EDU-Version. Disponível em <http://www.lambdare.com>. Acesso em 15/10/2005.

# DEVICE FOR MICROTTEXTURING OF INTERNAL SURFACES OF CYLINDERS USING A HIGH REPETITION RATE VISIBLE LASER

## **Rudimar Riva**

Institute for Advanced Studies, IEAv, Rodovia Tamoios, km 5, São José dos Campos, SP, riva@ieav.cta.br

## **Davi Neves**

Institute for Advanced Studies, IEAv, Rodovia Tamoios, km 5, São José dos Campos, SP, davis@ieav.cta.br

## **José Guilherme Alvarenga Batista Simões**

Institute for Advanced Studies, IEAv, Rodovia Tamoios, km 5, São José dos Campos, SP, gmsimoes@ieav.cta.br

## **Sérgio Stefano Guerreiro**

ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo, Av. Alfried Krupp, 1050, Campo Limpo Paulista, SP, sergio.guerreiro@thyssenkrupp.com

### ***Abstract.***

*In this work it was described a device designed to fabricate regular micro-structures on the inner surface of components with cylindrical geometry. The generation of a regular structure of micro-dimples on the contact surfaces of mobile components aimed to reduce friction coefficient. The micro dimples were obtained by surface laser ablation using a visible 532 nm Nd-YAG laser that emits short radiation pulses ( $< 100$  ns) at up to 20 kHz repetition rate. A variable focal distance optical system controls the diameter of micro-dimples from  $80 \mu\text{m}$  up to  $120 \mu\text{m}$ . The depth of micro-dimples was controlled from  $2 \mu\text{m}$  up to  $50 \mu\text{m}$  by simply varying the number of applied laser pulses. A mechanical device, with angular and linear translations stages actuated by high resolution step motors that are controlled by a PLC module, allows a  $\pm 2.5 \mu\text{m}$  positioning of the laser beam. The device was used to texturing the inner surface of steel cylinders (AISI 1070) with 40 mm of diameter and 30 mm of length. More than 13,000 micro-dimples separation were generated on the whole cylinder internal surface with very regular dimensions: diameter of  $85 \pm 2 \mu\text{m}$ , distance between micro-dimples of  $270 \pm 4 \mu\text{m}$  and controlled depth from  $10 \pm 2 \mu\text{m}$  up to  $40 \pm 2 \mu\text{m}$ .*

**Keywords.** *Laser texturing, laser ablation, friction, wearing.*