

REDUÇÃO DO ATRITO POR MEIO DA TEXTURIZAÇÃO A LASER COM PULSOS ULTRACURTOS DO AÇO DIN 16MnCr5

Alexandre Vieira, alexandre.vieira@sp.senai.br^{1,2,3}

Ricardo E. Sama, resamad@ipen.br¹

Nilson D. V. Júnior, nilsondv@ipen.br¹

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br¹

¹ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Avenida Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP 05508-000

² Faculdade de Tecnologia Senai Suíço-Brasileira “Paulo E. Tolle”, Rua Bento Branco de Andrade Filho, 379 – São Paulo, SP - CEP: 04757-000

³ Escola Superior de Engenharia e Gestão, Rua Vergueiro, 1951 Vila Mariana - São Paulo, SP – CEP: 04101-000

Resumo: A indústria automobilística tem como um de seus principais desafios, e consequentemente, foco de pesquisa, a redução do coeficiente de atrito entre alguns componentes e sistemas presentes nos automóveis. Um dos grandes benefícios dos avanços nesta área é o aumento da vida útil dos componentes e a melhor eficiência do motor. Desta maneira, uma das formas propostas pela tribologia para a redução de atrito é a texturização de superfícies por laser. Neste trabalho, foi abordada a interação de pulsos laser com largura temporal na ordem de femtossegundos com o aço DIN 16MnCr5, utilizado na indústria automotiva. Objetivou-se buscar os melhores parâmetros de processo para obter micro cavidades com pouca ou nenhuma zona afetada pelo calor e sem a presença de rebarbas e material ressolidificado, normalmente presentes na texturização com laser de pulsos longos (nanossegundos). Para a realização do estudo foi utilizada a técnica de escaneamento diagonal, D-Scan, para determinação dos limiares de ablação em função da sobreposição de pulsos. Também foram realizados estudos de formação das cavidades com a variação da posição do ponto focal e do perfil espacial do feixe laser. São apresentados resultados de análises obtidas por microscopia óptica e de varredura e interferometria de luz branca, além de resultados dos ensaios tribológicos que mostraram redução de mais de 10% da força e coeficiente de atrito.

Palavras-chave: Laser de pulsos ultracurtos, tribologia, Texturização a laser

1. INTRODUÇÃO

A microusinagem tem sido alvo de estudos de diversas áreas do conhecimento há alguns anos, sendo que, esta possui aplicações nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, microeletrônica, automotiva, médica e odontomédica, biomecânica, óptica, ferramenteira, joalheira, além de outras. Possui aplicações na fabricação de dispositivos como micro moldes, micromotores, filtros, sistemas micro eletromecânicos (MEMS), microfluídicos, lentes e relógios, além de muitos outros que aqui poderiam ser citados. Devido a esta grande riqueza de aplicações e as demandas crescentes apresentadas pela indústria, cada vez mais é necessário desenvolver pesquisas relacionadas a esta área (SAMAD, et al., 2012).

Na indústria automotiva, um grande nicho de aplicação da microusinagem é a texturização de superfícies de componentes com o objetivo de melhorar a vida útil por meio da redução dos efeitos do desgaste causados pelos efeitos do atrito (ETSION, 2004 e TOMANIK, 2013). Outras formas de possível redução do coeficiente de atrito que poderiam ser citados são a redução da rugosidade superficial, desenvolvimento de novos materiais e aplicação de revestimentos sobre a superfície dos componentes (SINATORA, 2005), desenvolvimentos que na maior parte dos casos não devem ser tidos como concorrentes, mas sim como complementares.

A texturização a laser é uma das técnicas utilizadas para a redução do coeficiente de atrito entre duas superfícies que compõem um tribossistema. Os sistemas laser mais utilizados para este processo são os de pulsos longos, que são caracterizados por pulsos com duração maior que o tempo de difusão do calor no material processado. Normalmente estes sistemas possuem duração do pulso na ordem de alguns nanossegundos (ns), unidade referente a 10^{-9} s. No entanto, estes sistemas geram uma zona afetada pelo calor (ZAC) no material, podendo originar tensões residuais e micro trincas na região (SAMAD, et al., 2012).

Por conta dos problemas resultantes da utilização do laser de pulsos longos, os sistemas que emitem pulsos ultracurtos se mostram uma solução muito interessante. Estes sistemas laser apresentam duração de pulso na ordem de algumas

dezenas de femtossegundos (fs), unidade referente a 10^{-15} s, e devido à interação entre os pulsos do laser e o material ocorrer em tempos menores do que o tempo de difusão do calor, praticamente não ocorre interação térmica entre o feixe e o restante do substrato, reduzindo a presença de zona termicamente afetada ou até mesmo eliminando a mesma (SAMAD, et al., 2012; DULEY, 2005 e NOGUEIRA, 2015).

Nos motores de combustão interna, um dos principais sistemas afetados pelo efeito do atrito, que acaba gerando perdas de energia na ordem de um terço do total gerado, é o sistema cilindro-pistão-biela, onde cerca de 11% da energia total é utilizada para vencer as resistências impostas pelo atrito (HOLMBERG, ANDERSSON, ERDEMIR, 2012).

A texturização de superfícies tem demonstrado bons resultados quanto ao aumento da capacidade de carga, aumento da resistência ao desgaste e redução do coeficiente de atrito, sendo os microfuros (dimples) o padrão de textura aplicado na maior parte dos estudos desta área. Cada cavidade pode assumir diferentes funções de acordo com a situação, por exemplo, e em casos de boa lubrificação estas podem atuar como micro rolamentos, através de um efeito hidrodinâmico causado pela pressão entre as superfícies de contato. No caso de condições limítrofes de lubrificação os microfuros podem atuar como reservatório de óleo, aumentando a eficiência do sistema lubrificante (TOMANIK, 2013). Já ao longo da vida útil dos componentes as cavidades poderão armazenar pequenas partículas que podem se desprender dos componentes, ou mesmo serem utilizadas para quebrar partículas abrasivas que podem ter se prendido a uma superfície (ETSION, 2004).

Portanto, este trabalho visa estudar o processo de confecção das microcavidades, ou microfuros, fabricados em componentes de motor, obtidos por meio da ablação por laser de pulsos ultracurtos, com o objetivo de obter os melhores parâmetros, de forma que sejam eliminados os problemas identificados no processo de texturização com laser de pulsos longos. Alguns dos problemas que se pode citar são: baixo controle geométrico, zona afetada pelo calor e produção de rebarbas e material ressolidificado na superfície (SAMAD e VIEIRA, 2006)

2. MÉTODOS E PROCESSOS

Para este trabalho, utilizou-se a técnica de escaneamento diagonal (D-Scan) (SAMAD e VIEIRA, 2006), para determinação do limiar de ablação em função do número de pulsos sobrepostos em uma região, embora o método mais tradicional aplicado a este tipo de estudo seja o método do dano zero (LIU, 1982). No método D-Scan, a amostra é fixada a uma mesa motorizada de forma que a sua superfície esteja posicionada perpendicular a um feixe Gaussiano TEM₀₀. O feixe, que se propaga na direção Z tem seu foco em $Z=0$; a amostra inicia seu movimento numa posição $Z<0$, na qual não ocorre ablação, e move-se simultaneamente nas direções Z e Y (transversal ao feixe), passando pelo foco, onde há ablação, e termina seu movimento numa posição $Z>0$ onde não ocorre mais ablação. O processo é repetido várias vezes, com diferentes velocidades e taxas de repetição dos pulsos, gravando diversos traços que possuem como principais variáveis a velocidade de avanço da mesa e a energia (E) utilizada. Os traços gerados pela varredura possuem uma geometria semelhante à apresentada na Fig. 1.

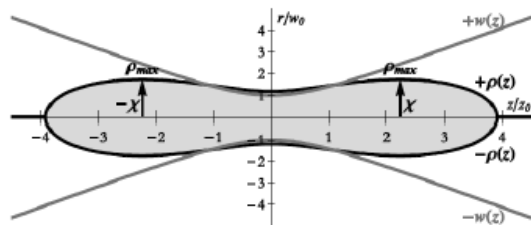


Figura 1. Geometria característica dos traços gravados na amostra (SAMAD e VIEIRA, 2006)

O ponto de menor largura representa a região onde o ponto focal do feixe laser está na superfície da amostra ($Z=0$); de maneira simétrica, em ambos os lados, o traço atinge uma largura máxima ($2\rho_{max}$) e diminui até desaparecer. Para efeito de estudo, porém, a largura máxima é sempre medida do lado onde o foco do feixe estava na posição $Z<0$ (abaixo da superfície).

Conforme o estudo apresentado por Samad e Vieira (2006), quando não existem efeitos térmicos significativos e o experimento é realizado acima da intensidade crítica do material, o limiar de ablação estará relacionado à dimensão ρ_{max} encontrada na extremidade do traço e à energia E_0 dos pulsos laser por meio da seguinte equação:

$$F_{th} = \frac{E_0}{e\pi\rho_{max}^2} \cong 0.117 \frac{E_0}{\rho_{max}^2}, \quad (1)$$

A variação de velocidade utilizada durante a confecção dos traços tem por função a variação da sobreposição de pulsos (N), e esta possui influência sobre os efeitos de incubação e pode ser considerada como uma razão entre o somatório da intensidade produzida em (χ, ρ_{max}) , em relação a cada pulso do laser que danificou a superfície da amostra durante o movimento contínuo da mesa e intensidade do pulso gerado em $(\chi, 0)$. Assim, Machado (2012) nos mostra que a seguinte equação pode ser aplicada para determinar N:

$$N = \mathcal{G}_3 \left(0, e^{-\left(\frac{v_y}{f \rho_{\max}} \right)^2} \right) \quad (2)$$

Onde, $\mathcal{G}_3$ é a função elíptica do terceiro tipo, teta de Jacobi, f é a taxa de repetição do laser e v_y é a velocidade de avanço transversal aplicada a cada traço durante o movimento dos eixos Z e Y da mesa. Quando se seleciona taxas de repetição altas ou velocidades de avanço baixas, é aceitável a aproximação mostrada a seguir:

$$N \cong 1.8 \frac{f * \rho_{\max}}{v_y} \quad (3)$$

O material utilizado neste estudo foi o aço DIN 16MnCr5, selecionado por ser um material comumente aplicado a componentes de motor, neste caso, especificamente em pinos de pistão, onde a texturização tem como um dos objetivos o aumento da resistência ao desgaste (PROFITO, 2010 e ETSION, SHER, 2009). Quando se submete um material à interação com um feixe laser, algumas das principais propriedades são as suas características térmicas, apresentadas na tabela 1. As amostras possuíam geometria plana retangular, com dimensões de aproximadamente 12 mm por 20 mm e 1 mm de espessura, e foram removidas a partir de um pino de pistão comercial, e para esta análise foram embutidas e polidas, apresentando inicialmente a rugosidade de 0,02 Ra / 0,03 Sa.

Tabela 1 – Características térmicas

	Ponto de fusão (°C)	Coefficiente linear de expansão térmica ($\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)	Condutividade e térmica (W/m·K)	Calor específico (J/g·°C)
Aço DIN 16MnCr5	1410	12,0	52,0	0,470

Para a confecção dos traços foi utilizado um laser de Ti:Safira, Femtopower Compact Pro CE-Phase HP / HR do fabricante Femtolasers, com emissão centrada em 785 nm, com 37 nm de largura de banda, taxa de repetição (f) máxima de 4 kHz, controlada por célula de Pockels, 800 μJ de energia máxima por pulso e emissão polarizada linearmente na direção horizontal. Foi utilizada para este experimento a largura temporal de 25 fs. Para estas irradiações as energias dos pulsos foram atenuadas para aproximadamente 80 e 72 μJ . O feixe foi focado com uma lente dubleto de comprimento focal (WD) de 75 mm (Thorlabs AC254 – 075 – B). A amostra foi transladada por uma mesa motorizada de 3 eixos, controlada por software dedicado instalado em um computador acoplado ao equipamento. Cada traço foi executado com velocidade diferente, dentro de um intervalo ente 0,05 e 30 mm/s. Para este estudo foram utilizadas as taxas de repetição de 500 e 4000 Hz. A Fig. 2 apresenta alguns dos traços de D-Scan obtidos no experimento.

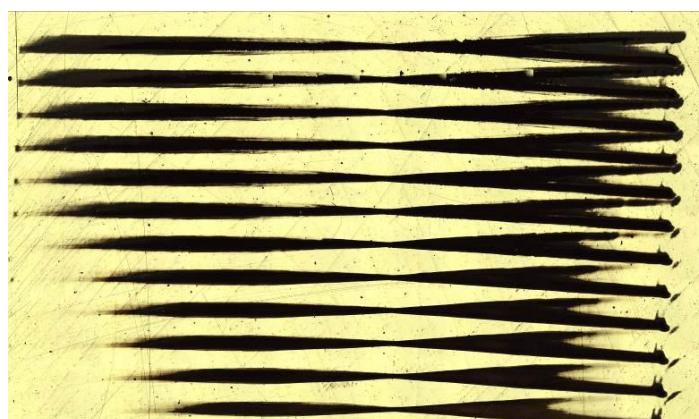


Figura 2. Traços fabricados para a análise pela técnica D-Scan com taxa de repetição de 4 kHz, pulsos de 25 fs e visualizados através de microscópio confocal

Para a obtenção da dimensão $2p_{\max}$, que como foi mostrado na equação (1) será utilizada para a obtenção do limiar de ablação (F_{th}), foi utilizada a técnica de microscopia confocal, o equipamento utilizado foi um CSM 700, Carl Zeiss, com lentes Zeiss com ampliação de 50 $\times$ e magnificação de 1376 $\times$ e a medição foi realizada por meio de software vinculado ao equipamento. Para a medição foi utilizado um bloco padrão classe 1 com a dimensão de 1,003 mm para calibração do software. Todos os traços foram produzidos sem o uso de atmosfera protetora e após o procedimento, as

amostras foram limpas com álcool isopropílico em aparelho ultrassom, para remoção de impurezas e detritos que possam ter sido depositadas sobre as superfícies durante e após o processo.

Para um estudo mais pontual da superfície dos traços, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) EVO HD 15, Carl Zeiss, que permite obter imagens com maior ampliação e qualidade que as imagens obtidas no microscópio confocal. Para a obtenção de imagens de boa qualidade no MEV, há a necessidade de a amostra ser condutora e estar em contato com a superfície do stub, assim, para obter-se melhores resultados, foi utilizada uma fita condutora de eletricidade composta de carbono. Os parâmetros aplicados na análise foram os seguintes: EHT 20 kV, WD 11,5 mm, spot size 574 e I probe 2,6 nA. As imagens foram obtidas através dos sinais coletados pelo detector de elétrons secundários (SE1).

Utilizando os parâmetros obtidos pelo método D-Scan, as microcavidades, objeto de estudo deste trabalho, foram produzidas. Para a fabricação, foi utilizada outra estação de trabalho que conta com óptica para manipulação e focalização de feixe, sistema de movimentação 3D com precisão micrométrica e diversos dispositivos para monitoração e controle dos pulsos laser. Pode-se, por exemplo, controlar com precisão, a energia, largura temporal, taxa de repetição e número de pulsos, entre outros parâmetros. O sistema também conta com visão ampliada do campo de usinagem, através de zoom óptico e CCD colinear com o ponto focal. A caracterização e controle da distribuição de intensidade do feixe laser podem ser feitas através de CCD dedicada a esta finalidade. Qualquer geometria e sequência de parâmetros de processo podem ser programados através de um CadCam e interfaces que controlam e conectam os diversos dispositivos citados acima.

Para o controle dimensional e geométrico das cavidades foi utilizado um interferômetro de luz branca (WLI) CCI Lite, Taylor Hobson, e foram tomados como objeto de estudo a variação dimensional apresentada pelas cavidades em relação ao diâmetro e profundidade, e outra caracterização foi em relação a morfologia, realizada através de estudos com a utilização de MEV.

Para a execução do ensaio tribológico, foi utilizado o tribômetro TE-67, do fabricante Plint&Partners Ltda. Para auxílio na lubrificação do contato, foi utilizada uma bomba peristáltica, alimentada com óleo motor comercial SAE 5W30. Para os ensaios, fixou-se os discos no equipamento, mantendo o mesmo em rotação, com velocidade fixa de deslizamento de 1 m/s. Para o ensaio utilizou-se uma esfera de aço SAE 52100 pressionada contra a superfície do disco por meio de uma célula de carga, com carga fixa de 30 N. O ensaio foi repetido em diferentes raios do disco, mantendo-se sempre a mesma velocidade e carga, além de realizar ensaios na zona texturizada, realizou-se ensaios na zona sem textura do mesmo disco para comparar os resultados. A força de atrito foi monitorada pela célula de carga (Phoenix Tribology), com precisão de 0,2 N.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para determinar o limiar de ablação (F_{th}) em função do número de pulsos é necessário obter o parâmetro p_{max} , este por sua vez é obtido através da medida dimensional da largura dos traços obtidos no processo D-Scan. Com estes valores, e aplicando a equação (1), é então obtido o limiar de ablação para cada um dos traços, enquanto que a equação (3) fornece o valor de N . A Fig. 3 mostra os resultados obtidos.

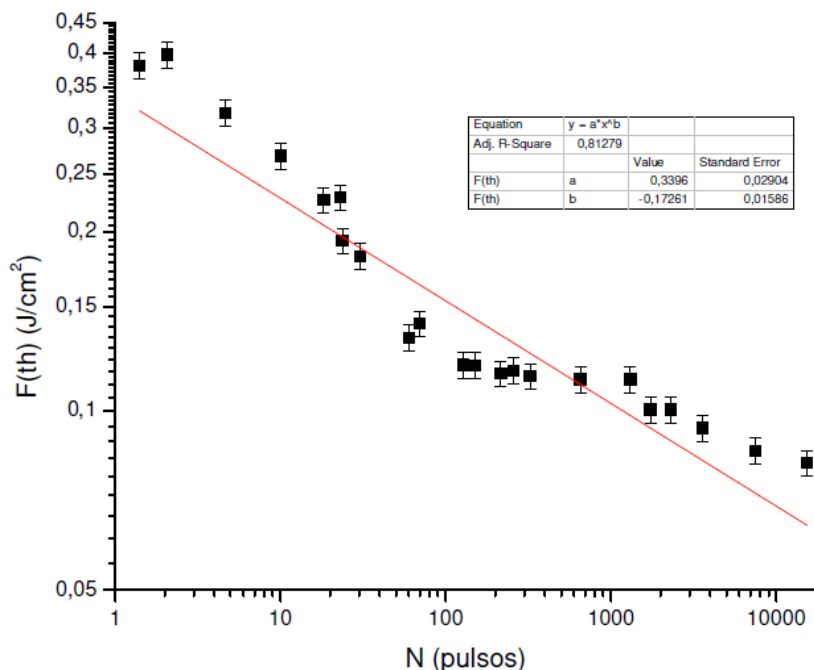


Figura 3. Gráfico apresentando os limiares de ablação (F_{th}) em função do número de pulsos sobrepostos (N) para o aço DIN 16MnCr5

Observa-se uma queda constante do limiar de ablação com o aumento do número de pulsos sobrepostos. Isto significa que o material se torna menos “resistente” à ablação com o acúmulo de pulsos em um mesmo local. Isto indica que os pulsos, de alguma maneira, modificam a estrutura do material responsável pela absorção da luz laser. Assim, cada pulso encontra uma condição de material modificada pelo pulso anterior, de maneira que sua absorção é mais eficiente na remoção de material. Este efeito é conhecido como efeito de incubação, e para metais, a relação entre F_{th} e N é dada pela expressão abaixo (Jee, et al, 1998):

$$F_{th}(N) = F_{th1} N^{S-1} \quad (4)$$

Aqui, F_{th1} e F_{thN} são os limiares de ablação para 1 e para N pulsos sobrepostos respectivamente, e S é o parâmetro de incubação. S varia de 0 a 1, e quanto mais próximo de zero, maior é este efeito.

O conhecimento deste comportamento, e da relação entre $F_{thN} \times N$, é necessário para evitar o surgimento de efeitos térmicos. Assim, a utilização de fluências próximas ao limiar de ablação evita a formação de material fundido e resolidificado (rebarbas), bem como uma possível transformação de fase na zona afetada pelo calor (ZAC). É preciso, portanto, utilizar uma fluência próxima ao limiar para aquele determinado número N de pulsos laser sobrepostos.

Além de se obter valores adequados para a fluência utilizada no processo, os traços também podem fornecer dados mais precisos acerca dos parâmetros de processo para a produção dos dimples. Para isso, observou-se características dimensionais e morfológicas dos traços, como uniformidade, simetria, ausência de material resolidificado e outros sinais que poderiam indicar presença de efeitos térmicos, ausência ou mínima presença de ripples, perfil, largura e profundidade. A região com estas características é mostrada na Fig. 4:

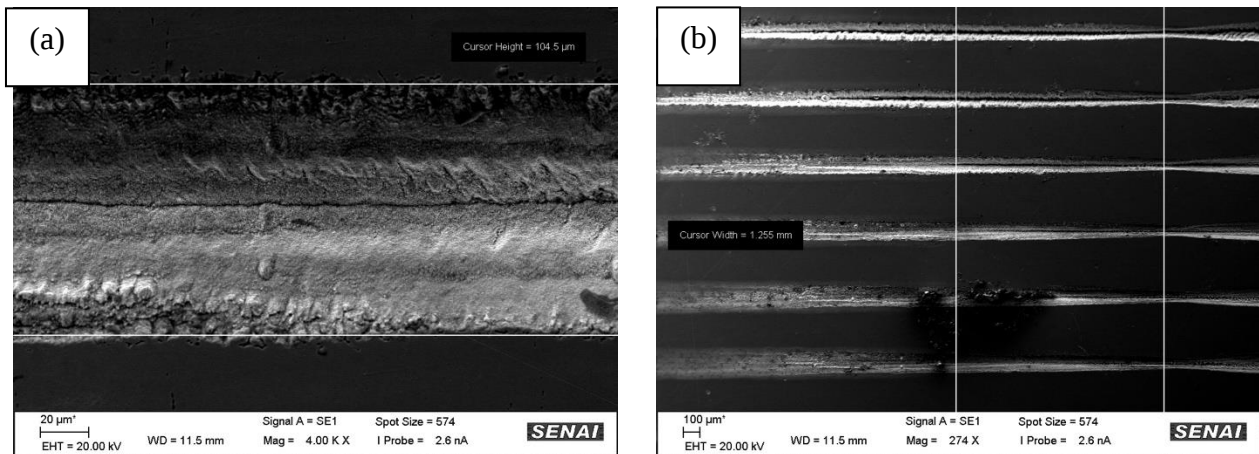


Figura 4. Imagem obtida por MEV do traço 4. (a): região localizada à esquerda do centro do traço. (b): Medição da distância entre o centro do traço e a região de interesse

Na região apresentada, não se observa material resolidificado e nem rebarbas. Os parâmetros de processo aqui utilizados podem ser então bons candidatos à formação de um dimple com as características pretendidas. Utilizando como referência o centro do traço, a localização da região de interesse estava deslocada 1,25 mm à esquerda, o que representa posição do ponto focal aproximada de 1250 μm acima do foco, este valor é obtido devido ao sincronismo do movimento dos eixos Z e Y , descritos anteriormente. As dimensões do traço neste ponto são de 104,5 μm de largura e 46,78 μm de profundidade. Com a posição Z da amostra conhecida, pode-se calcular o diâmetro do feixe laser e, consequentemente a fluência correspondente nesta posição. Neste caso, obteve-se uma fluência de 100,64 mJ/cm^2 e $N = 2316$. A utilização desta fluência e do correspondente N na confecção de um dimple deve então levar a uma estrutura livre de ZAC e de rebarbas.

A utilização de uma fluência adequada, com pouco ou nenhum efeito térmico, ainda não garante a formação de uma geometria adequada ao dimple. Como se vê na Fig. 4 (esquerda), há um sulco profundo no centro do traço, indesejado para o processo. A Fig. 5 mostra uma figura 3D da região analisada na Fig. 4, obtida no microscópio confocal, e um perfil da sua seção transversal. Além do sulco, não visto na Fig. 5 devido à resolução do equipamento, porém visto na Fig. 4, como um traço no centro da imagem, também se observa um perfil em “V”, não adequado ao que se pretende para um dimple.

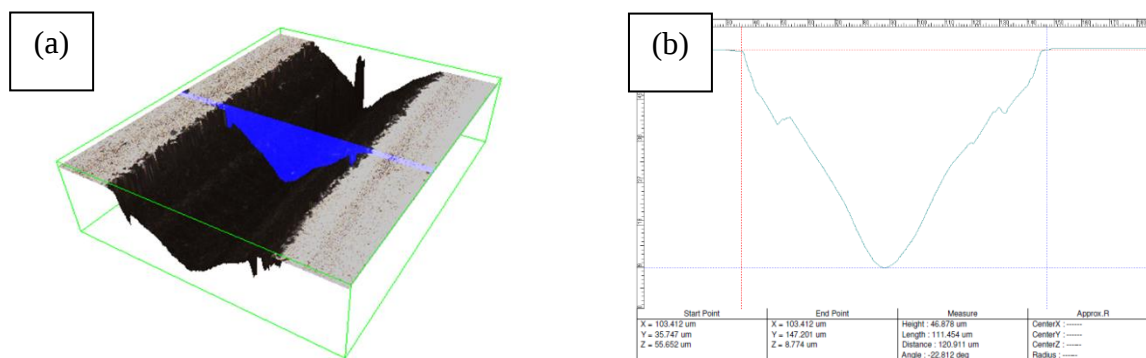


Figura 5. Análise do traço por microscópio confocal. (a): perfil 3D da região de interesse. (b): perfil 2D da região de interesse

Este perfil em “V” deve-se ao perfil gaussiano de distribuição de intensidade do feixe laser. Para modificar o perfil do traço, portanto, é preciso modificar o perfil de intensidade do feixe laser. Assim, foram realizados alguns estudos para modificação do perfil do feixe, de forma que a intensidade da região central fosse reduzida. As modificações foram realizadas por meio da inserção de uma íris no caminho do feixe antes da lente de focalização. Esta íris tem um diâmetro 7 vezes menor que o diâmetro original do feixe, o que causa um efeito de difração que transforma o perfil gaussiano em um perfil em anel, conforme mostrado na Fig. 6. Com este perfil, já não se tem um pico central de intensidade que pode provocar o sulco observado na Fig. 5. Isto, contudo, só é verdade para regiões fora do plano focal, pois neste plano, o anel se colapsa em um perfil muito próximo ao de uma gaussiana. Assim, é preciso então encontrar um plano fora do foco onde a distribuição espacial de energia produza uma cratera com perfil próximo ao desejado, ou seja, de uma semiesfera.

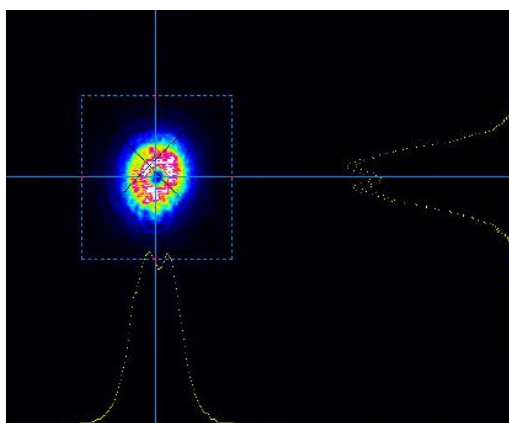


Figura 6. Perfil de intensidade do feixe laser após retenção pela íris

Desta maneira, conduziu-se um novo experimento utilizando como variáveis a posição Z (da superfície da amostra em relação do plano focal) a energia e o número de pulsos sobrepostos. O principal objetivo foi a análise da variação dimensional e da geometria das cavidades. As energias utilizadas foram de 5,0 μJ e 9,3 μJ , com variação do número de pulsos de 100, 200, 400 e 1000 e variação da posição da amostra no eixo Z nas posições de +400 μm , +300 μm , +200 μm , +100 μm , 0 μm , -100 μm , -200 μm , -300 μm e -400 μm . A definição destes parâmetros se deu devido aos experimentos realizados anteriormente pelo método D-Scan. A largura temporal dos pulsos foi de 30 fs, taxa de repetição de 50 Hz, lente com comprimento focal de 40 mm e polarização circular.

Por meio deste experimento foi possível observar dimples com superfícies mais uniformes e com característica geométrica semi-esférica, um dos objetivos propostos até então. Observou-se também que mesmo com a variação do número de pulsos e energia, o diâmetro dos dimples manteve-se muito próximo ao valor de 50 μm . A profundidade apresentou variação de acordo com o número de pulsos aplicados. Especial atenção é dada aos dimples confeccionados com a amostra posicionada 200 μm antes do foco e energia de 5,0 μJ , estes ofereceram uma variação dimensional linear. Realizando um estudo de relação entre a profundidade e o número de pulsos, percebe-se que para cada pulso foram removidos aproximadamente 0,024 μm (profundidade) em todos os casos. Além disso, este apresentou menor variação dos diâmetros dos dimples, estando todos na faixa de 50 a 52 μm . A Fig. 7 apresenta dois gráficos com os resultados correlacionando a variação da profundidade em relação ao número de pulsos e a variação do foco (Z):

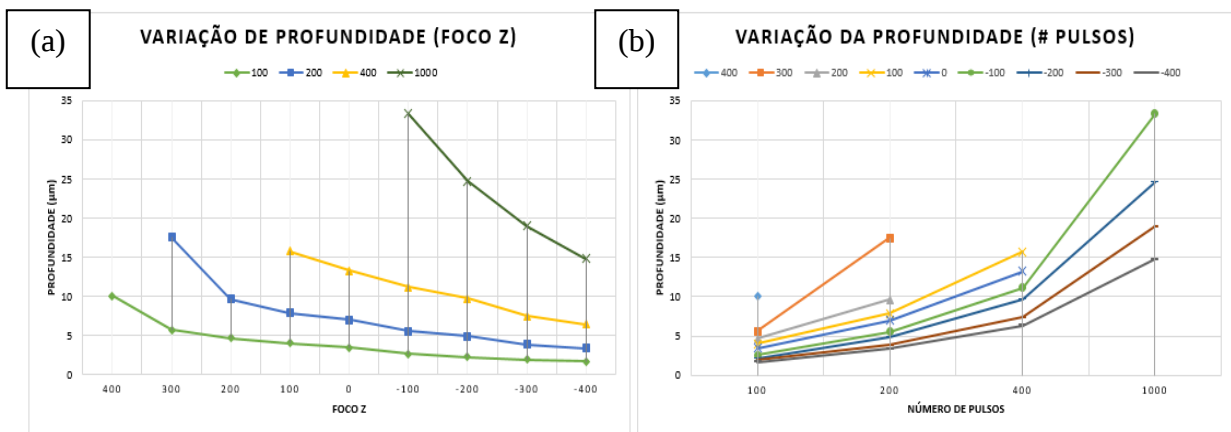


Figura 7. Variação da profundidade: (a): em relação ao número de pulsos. (b): em relação a posição da amostra

A Fig. 8 apresenta uma comparação entre os dimples confeccionados com a superfície da amostra 200 μm antes do foco, além das imagens obtidas por MEV e das superfícies tridimensionais obtidas por WLI:

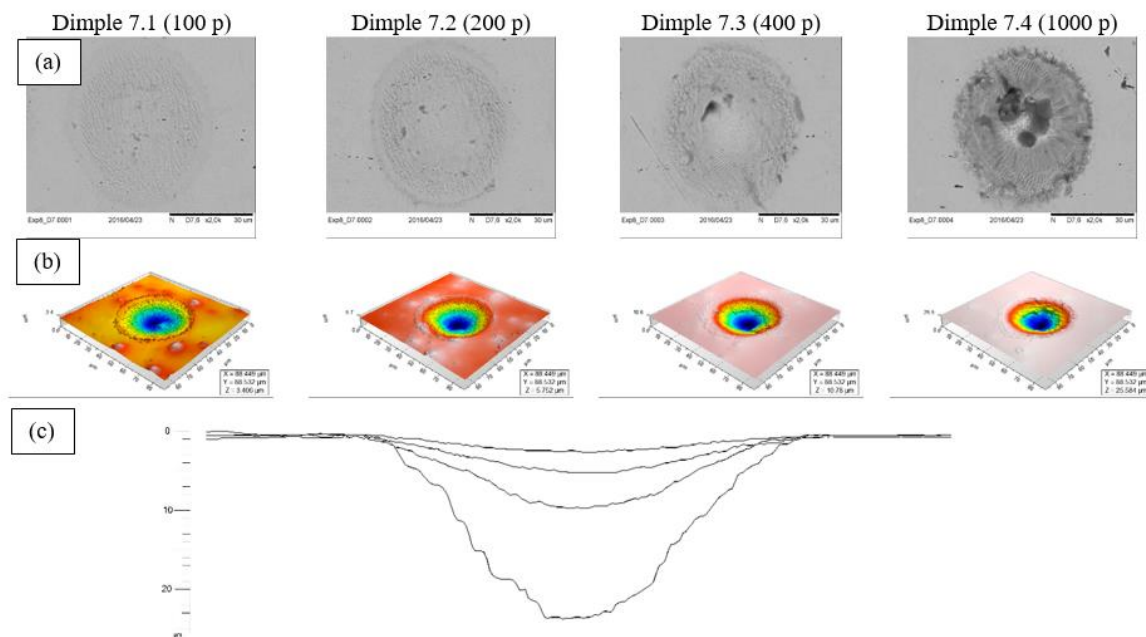


Figura 8. (a) Imagens obtidas por MEV (b) Superfícies 3D obtidas por WLI (c) Perfis 2D obtidos por WLI

Após a otimização dos parâmetros do laser, confeccionou-se um disco com uma região texturizada. Nesta região, cerca de 10% da área total correspondia a dimples com relação entre diâmetro e profundidade na ordem de 10/1, estes valores foram obtidos por meio de revisão bibliográfica (PROFITO, 2010) e por outros meios empíricos. Realizou-se um ensaio tribológico esfera-disco com contato lubrificado, velocidade de deslizamento fixa de 1 m/s e carga axial constante de 30 N, controlada por uma célula de carga. Para este ensaio realizou-se aproximadamente 1 km de deslizamento, sem variação de nenhum dos parâmetros, o ensaio foi repetido três vezes com variação no raio da amostra e respectiva variação de rotação do equipamento para manutenção da velocidade de deslizamento proposta inicialmente. Além de realizar ensaios na zona texturizada, realizou-se ensaios no mesmo disco em uma zona sem texturização. Para comparação dos resultados foi registrado os valores correspondentes da força de atrito e do coeficiente de atrito.

Na região sem texturização, foi encontrado um valor médio de força de atrito na ordem de 2,94 N e o coeficiente de atrito medido foi de 0,105. Na região texturizada a força de atrito medida foi de 2,61 e o coeficiente de atrito de 0,085. Os valores foram obtidos por meio da média de três ensaios, sendo que as variações na comparação dos ensaios de forma isolada, apresentaram valores semelhantes. A redução média da força de atrito na zona texturizada foi de 11,2 % e a redução do coeficiente de atrito atingiu 17,1 %.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que para fabricação dos dimples utilizados para melhoria de propriedades tribológicas no aço DIN 16MnCr5, a técnica D-Scan possibilitou um estudo da interação entre o laser e o material, de forma que a morfologia ideal da superfície fosse obtida. O feixe com perfil de intensidade de energia gaussiano não apresentou bons resultados

devido à geometria desejada para esta aplicação, por este motivo o feixe foi modificado para um perfil de intensidade de energia com uma característica diferenciada que foi fundamental na obtenção da geometria semi-esférica. Ao desenvolver experimentos com a amostra fora do foco, percebeu-se que era possível obter melhores resultados, por este motivo desenvolveu-se experimentos com a amostra em diversas posições e em um destes experimentos, com os parâmetros: amostra 200 μm antes do foco, com largura temporal de 30 fs, energia de 5,0 μJ e comprimento focal de 40 mm. Notou-se ser possível obter uma dependência linear da profundidade do dimple com o número de pulsos, o que pode ser interessante em um processo de linha de produção ou mesmo para estudos científicos.

Os dimples confeccionados por laser de pulsos ultracurtos apresentaram geometria constante e ausência de material ressolidificado, que para estudos científicos pode representar uma maior fidelidade aos modelos utilizados em simulações computacionais. Além disso, a ausência de material ressolidificado também influencia nas rebarbas, comuns na texturização com pulsos ultracurtos, e neste caso não houve rebarbas, o que significa um número menor de processos em uma linha de produção.

A texturização a laser mostrou-se eficaz na redução do coeficiente de atrito e da força de atrito, porém, em equipamentos laboratoriais, ainda se trata de um processo de fabricação relativamente lento devido a quantidade de furos que precisam ser realizados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Tecnológico da Mahle Metal Leve por disponibilizar as amostras para os ensaios, em especial ao Dr. Eduardo Tomanik pelo apoio e incentivo.

Este trabalho contou com o apoio financeiro do CNPq – Projetos 2009/310111-9 e 405707/2013-4 e da FAPESP – Projeto 2013/26113-6.

6. REFERÊNCIAS

- DULEY, W. W., 2005, “UV lasers: effects and applications in materials science”. Cambridge University Press. New York, NY.
- ETSION, I., 2004, “Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing”. Tribology Letters, Israel, v. 17, pp. 733-737.
- ETSION, I.; SHER, E., 2009, “Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings”. Tribology International. Vol. 42, pp. 542-547
- HOLMBERG, K., ANDERSSON, P., ERDEMIR, A., 2012, “Global fuel consumption due to friction in passenger cars”. Tribology International. Vol. 47, pp. 221-234.
- JEE, Y., BECKER, M. E WALSER, R., 1998. “Laser induced damage on single crystal metal surfaces”. J. Opt. Soc. Am. B. Vol. 5, pp. 648-659.
- LIU, J. M. "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes," Opt. Lett. 7, 196-198 (1982).
- MACHADO, L. M. et al. 2012. “D-Scan measurement of ablation threshold incubation effects for ultrashort laser pulses”. Optics Express, v. 20, n. 4.
- NOGUEIRA, A. F., 2015, “Texturização em Superfícies de Titânio Grau 2 Irradiadas com Laser de Pulsos Ultracurtos”. (tese de doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares. São Paulo, pp. 111.
- PROFITO, F. J., 2010, “Modelagem unidimensional do regime misto de lubrificação aplicada a superfícies texturizadas”. (dissertação de mestrado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, pp. 34-42.
- SAMAD, R. E. et al., 2012, “Ultrashort Laser Pulses Machining”. In: PESHKO, I. Laser Pulses - Theory, Technology and Applications. Croácia: InTech. Cap. 5, p. 143-174.
- SAMAD, R. E.; VIEIRA, N. D. "Geometrical method for determining the surface damage threshold for femtosecond laser pulses," Las. Phys. 16, 336-339 (2006).
- SINATORA, A., 2005, “Tribologia: um resgate histórico e estado da arte”. Universidade de São Paulo - Escola Politécnica. São Paulo, pp. 33.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

FRICITION REDUCTION BY ULTRASHORT PULSED LASER SURFACE TEXTURING OF STEEL DIN 16MnCr5

Alexandre Vieira, alexandre.vieira@sp.senai.br^{1,2,3}

Ricardo E. Sama, resamad@ipen.br¹

Nilson D. V. Júnior, nilsondv@ipen.br¹

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br¹

¹ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Avenida Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP 05508-000

² Faculdade de Tecnologia Senai Suíço-Brasileira “Paulo E. Tolle”, Rua Bento Branco de Andrade Filho, 379 – São Paulo, SP - CEP: 04757-000

³ Escola Superior de Engenharia e Gestão, Rua Vergueiro, 1951 Vila Mariana - São Paulo, SP – CEP: 04101-000

Abstract. One of the most demanding challenges for the automotive industry is reducing the coefficient of friction between some components and systems present in cars, defining an important research focus. One of the great benefits of the advances in this area is increasing components life and improve engine efficiency. Thus, one way proposed by tribology for friction reduction is laser surface texturing (LST). In this study, we addressed the interaction of femtosecond laser pulses with DIN 16MnCr5 steel used in the automotive industry, seeking the best process parameters for etching micro cavities with a semi-spherical shape, with little or no heat affected zone and without the presence of burrs and remelted material normally found in laser texturing with long pulses (nanoseconds). For the study the diagonal scanning technique, D-Scan, was used to determine the ablation threshold dependence on the pulses superposition. Studies were also conducted for the formation of cavities by varying the position of the focal point and the spatial profile of the laser beam. Analysis of the obtained results were done by optical and scanning microscopy and also by white light interferometry, also were presented results obtained by tribological tests that showed reduction above of 10% of friction force and friction coefficient.

Keywords: Ultrashort laser pulses, tribology, Surface texturing