

ABLAÇÃO COM LASER DE PULSOS ULTRACURTOS: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS NO COBRE E NO AÇO INOXIDÁVEL VI 138

Denilson de Camargo Mirim, dmirim@usp.br¹

Ricardo Elgul Samad, resamad@gmail.com²

Nilson Dias Vieira Junior, nilsondo@gmail.com²

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br²

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo- Campus Sorocaba, R. Maria Cinto de Biaggi 130, J. Santa Rosália CEP: 18095-410 – Sorocaba – SP BRASIL.

²Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN, Av. Lineu Prestes 2242 - Cidade Universitária - CEP: 05508-000 - São Paulo - SP BRASIL.

Resumo: Atualmente diversos processos comerciais de produção industrial utilizam lasers para executar operações de corte, furação e texturização. São processos bem estabelecidos, que contam com equipamentos dedicados e metodologias bem estabelecidas. Apesar de eficientes e de certa precisão, são processos térmicos com inconvenientes intrínsecos como rebarbas, material ressolidificado, zona afetada pelo calor e certa imprecisão dimensional. A utilização de pulsos laser ultracurtos, de largura temporal da ordem de algumas dezenas de femtossegundos torna possível a realização destes processos sem a produção de calor, como no caso de dielétricos, ou com geração desprezível de calor para o caso de metais.

Neste trabalho, utilizou-se o aço inoxidável para implantes cirúrgicos, VI 138 e o Cobre, para o estudo da interação com pulsos laser de femtossegundos, com o intuito de obter as condições de processo em que a produção de calor seja minimizada ou até mesmo eliminada nos processos de ablação. Os parâmetros de processo variados foram a largura temporal dos pulsos laser, 25, 80 e 125fs, a densidade de potência e o número de pulsos sobrepostos. A técnica D-Scan foi utilizada para a determinação dos limiares de ablação em função deste número de pulsos sobrepostos. Foram analisadas a região ablacionada e as mudanças de morfologia dos materiais consequentes do processo. Condições de mínima produção de calor foram obtidas com minimização de produção de rebarbas e de material ressolidificado, além de superfícies com morfologias distintas. Resultados que serão apresentados foram obtidos por microscopia óptica, eletrônica de varredura e no perfilometro óptico.

Palavras-chave: Laser de femtossegundo, Microusinagem, Aço inoxidável VI 138, Cobre

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, a necessidade de tecnologias de micro-usinagem impulsionou o crescimento da pesquisa científica para a indústria. Segmentos de aparelhos médicos, microeletrônica e a demanda do mundo automotivo proporcionaram uma grande variedade de aplicações, tais como micromotores, circuitos microfluídicos, MEMS (Micro Sistema Elétrico Mecânico), dispositivos médicos, ferramentas eletrônicas, filtros de partículas, micromoldes e microválvulas, entre outros, Gad-el-Hak (2006). Este enorme crescimento nesse segmento exige uma variedade de novos métodos de microusinagem.

Técnicas para usinar a superfície de materiais estão sendo continuamente melhoradas. Recentemente, microusinagens mecânicas com sistemas de posicionamento precisos e brocas muito pequenas foram usadas para cortar materiais, que abrange o intervalo de alguns milímetros até algumas dezenas de nanômetros, Dornfeld et al (2006). Uma técnica semelhante, que também se aplica à microusinagem direta e requer um sistema de posicionamento de alta precisão, mas sem contato, é a microusinagem por descarga de elétrons (EDM), em que o material é removido por um eletrodo guiado ao longo do percurso desejado, muito perto da superfície de um material condutor imerso em um fluido dielétrico. Neste processo, uma faísca é estabelecida entre o eletrodo e o material a ser processado, a remoção da matéria se dá por fusão e evaporação, Pradhan et al (2009), Kaminski e Capuano (2003), oferecendo uma resolução micrométrica.

A Fotolitografia, é outra técnica de microusinagem que está disponível para a fabricação de circuitos integrados desde 1970, foi melhorada, e hoje em dia é usada para criar estruturas que variam de micrometros, como no caso dos dispositivos MEMS, até dezenas de nanômetros para circuitos integrados, Chou (1996). Esta técnica remove seletivamente o material a partir de películas finas (de nitreto / óxido dePolissilício) depositados sobre substratos de silício, e também a partir da massa do substrato, Kovacs (1998). A fotolitografia permite a produção de lotes, mas é considerado um método indireto, uma vez que o material não é removido por uma ferramenta.

Embora amplamente utilizada, as técnicas descritas acima têm algumas desvantagens, tais como o desgaste da ferramenta (micro-usinagem mecânica e EDM) e alta complexidade (fotolitografia). Além disso, na usinagem de materiais diferentes, as taxas de erosão podem depender muito do material e da ferramenta, dos parâmetros de processo, ou ainda necessitam de troca da ferramenta. Além disso, a técnica pode ser restrita a uma classe de materiais específicos, tais como os metais, no caso EDM. Outras limitações incluem a pequena velocidade de ataque, nas técnicas que exigem o posicionamento preciso (Usinagem mecânica, EDM), impedindo o processamento em lote, e da alta complexidade da fotolitografia, o que não permite prototipagem rápida.

Em vista das limitações citadas acima, o laser de pulsos ultracurtos surge como uma ferramenta valiosa para microusinagem. Apenas alguns anos depois da invenção do laser, ele já estava sendo usado como uma ferramenta para ablacionar, Honig e Woolston (1963) e usinar, Boot et al (1966), uma ampla variedade de materiais, incluindo metais Anisimov (1968), dielétricos, Kochev et al (1972), semicondutores, Bourg (1975), compostos, Longfellow (1971), e tecidos biológicos, McGuff (1964). Nestes processos, a usinagem é baseada em processos térmicos resultantes do aquecimento de material pelo laser, Cohen (1968) e a ablação ocorre em consequência da fusão e vaporização resultantes das transições de fase devido ao calor depositado no material processado, Steen (2003) e Ion (2005).

Na usinagem com pulsos laser, o feixe é focado na superfície do material a ser processado, a luz é absorvida e o material sofre uma mudança física em torno da região de absorção. As dimensões das estruturas que podem ser usinadas dependem, em uma primeira aproximação, do diâmetro do feixe focado. Para um feixe Gaussiano TEM₀₀ limitado por difração, Kogelnik (1966), este diâmetro pode ser da ordem do comprimento de onda do laser, variando desde algumas centenas de nanômetros (UV lasers Excimer até algumas dezenas de micrometros, laser CO₂). No entanto, mesmo que o ponto de laser seja o menor possível sobre a superfície do material, a região de interação resulta em um volume muito maior devido à difusão de calor gerado no processo. Para pulsos longos, que duram mais do que o período de transferência de calor dos elétrons para a rede cristalina do material (cerca de dezenas de picosegundos), a dinâmica da interação laser-matéria depende dos parâmetros do laser (comprimento de onda, energia do pulso, taxa de repetição) e das características físicas (absorção, capacidade térmica, condutividade térmica) do material a ser usinado. Neste regime de pulsos longos, o processo de usinagem é uma consequência do aquecimento (que resulta na fusão, evaporação, sublimação), dependendo da energia absorvida por unidade de tempo e de volume e como ele flui dentro do material. Quando a radiação laser é absorvida, o material é aquecido e processos termodinâmicos são responsáveis pela difusão de calor e transformações de fases. À medida que a duração do pulso é diminuída, a propagação espacial de calor é diminuída e transformações de fase que levam à remoção de material ocorrem de forma mais eficiente. Neste regime, a extensão da propagação do calor (do seu efeito) diminui com a raiz quadrada da duração do pulso, demonstrando que a ablação é um processo térmico, Stuart et al (1995). O calor em excesso que não é usado para a ablação do material flui para o ambiente, para aumentar a temperatura, e para o interior do material, criando uma zona afetada pelo calor (ZAC), no qual as transições de fase modificam as propriedades do material, geralmente, de uma forma prejudicial. Como consequência, as estruturas menores que requerem pulsos curtos para serem gravados, produzem também uma reduzida ZAC. No entanto, embora pulsos de microssegundo e pulsos de sub-nanosegundos laser gerem intensidades altas o suficiente para usinar metais, semicondutores e mesmo alguns dielétricos transparentes, a condução de calor expande a região afetada para além do diâmetro do feixe focado, cria uma ZAC grande, e pode também gerar estruturas várias vezes maiores do que o comprimento de onda utilizado. Efeitos colaterais de calor, como de rebarbas, detritos, e material fundido, tendem a aumentar a área de interação e limitar a precisão de usinagem. Além disso, embora as intensidades elevadas atingíveis neste regime permitam a usinagem de materiais transparentes tais como sílica e safira, grandes quantidades de energia são necessárias para atingir o limiar de ablação, resultando em tensões térmicas e danos, tais como lascas e microrachaduras, Lan et al (2003), Ben-Yakar et al (2002). Para lidar com esses problemas, diferentes comprimentos de onda são necessários para a absorção eficiente de materiais diferentes. Para dielétricos, lasers com comprimentos de onda na região do UV são utilizados para melhorar a absorção; alguns vidros, contudo, têm maior absorção no infravermelho distante, Lane (1990), e, portanto, lasers de CO₂ são frequentemente utilizados nestes casos.

Assim, pulsos de femtosegundos (10⁻¹⁵s) surgem como uma nova possibilidade para microusinagem com algumas vantagens sobre os pulsos mais longos. A característica morfológica de uma superfície usinada por estes pulsos ultracurtos decorre diretamente da duração muito curta, que é menor do que o período de vibração térmica da rede cristalina. Isto leva a uma transferência de energia para o material extremamente pequena, que por sua vez resulta em efeitos térmicos minimizados, diminuindo ou eliminando a ZAC e conservando as propriedades físicas e metalúrgicas do material circundante. Além disso, a duração ultracurta dos pulsos cria intensidades muito elevadas que promovem uma interação altamente não-linear com a matéria, resultando em ablações com precisão nanométrica, e permitindo a microusinagem precisa de estruturas diminutas, assim como mudanças de ordens nanométricas, gerando uma superfície de metal amorfo, Hirayama Y.(2002). Além disso, os pulsos ultracurtos promovem uma ablação não-seletiva em relação à classe do material (dielétrico, metálico, etc), permitindo a usinagem de todos os tipos de materiais, com o mesmo laser. A capacidade de pulsos ultracurtos para usinar qualquer material, mesmo os mais transparentes, sem alterar o comprimento de onda do laser e a recente disponibilidade de sistemas relativamente baratos e estáveis e de alta potência média, que aumentam a velocidade de processamento, está fazendo desses pulsos ferramentas muito versáteis para processar materiais para muitas aplicações de alta tecnologia e dispositivos práticos, Ahmed et al (2015). As desvantagens para a microusinagem com pulsos de femtosegundos vêm do alto grau de precisão exigido, em sistemas de posicionamento com 3 eixos. Além disso, as baixas potências médias dificultam a produção de lotes, que, contudo vem sendo superado por sistemas modernos, com dezenas de watts, permitindo uma melhoria de rendimento. A invenção, na segunda metade da década de 1980, de amplificadores de pulso, (Strickland, 1985; Diels 2006), o método de Kerr Lens Modelocking (KLM) do laser de Ti: Safira, Sibbett (2012), e o bombeamento de lasers de estado sólido por lasers de diodo, Keller (2010), disseminou o uso de pulsos ultracurtos com energia da ordem de microjoule-milijoule (μJ-mJ). A ampla disponibilidade destes sistemas nas décadas de 1990-2000 resultou no surgimento de diversas novas aplicações, incluindo a usinagem por pulsos ultracurtos. Os lasers mais utilizados hoje em dia de pulsos

ultracurtos para usinagem são Ti: Safira e Yb: fibra. Os sistemas de Ti: Safira podem entregar pulsos tão curtos quanto algumas dezenas de femtosegundos, centrados em 800 nm, com energias da ordem de mJ, e taxas de repetição de alguns kHz. Os lasers de itérbio geram pulsos centrados em torno de 1030 nm com centenas de femtosegundos, e, embora limitado em energia para a faixa de μJ , operam em dezenas de MHz de taxas de repetição, aumentando sua velocidade de usinagem. Desenvolvimentos recentes na tecnologia laser oferecem projetos de sistemas de alta potência média, que em conjunto com novos dispositivos, Russbuedt et al (2010), e com sistemas de digitalização de alta velocidade permitem a utilização de pulsos ultracurtos para usinagem na produção de lotes, sem limitar a sua capacidade de prototipagem rápida.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho utilizou a técnica de varredura na diagonal (D-Scan) (Samad e Vieira 2006; Samad et al 2008), em vez do tradicional método do "dano zero", Liu (1982), para medir o limiar de ablação como função dos pulsos sobrepostos N. Nesta técnica, a amostra é colocada com a sua superfície ortogonal à direção de propagação de um feixe Gaussiano TEM₀₀ focalizado, e é deslocada em duas direções ao mesmo tempo, paralela e perpendicular ao eixo do feixe. Numa posição próxima à cintura do feixe, um perfil é gravado como mostrado na Fig. (1). A região de ablação apresenta uma largura mínima na posição de focagem e dois lobos máximos com largura $2\rho_{\text{max}}$, simetricamente localizadas antes e depois da cintura do feixe.

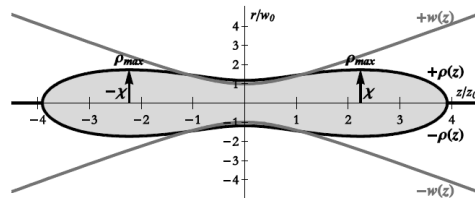


Figura 1. Perfil gravado na superfície da amostra que tem dois máximos de lobos transversais na posição X com o máximo de dimensão $2\rho_{\text{max}}$. As linhas $+W(z)$ e $-W(z)$ representam o perfil do feixe laser onde a intensidade é de $1/e^2$ do seu valor de pico.

Se não há nenhum efeito de calor importante, e a experiência é realizada acima de certa intensidade, pode ser mostrado, Samad e Vieira (2006), que, para um feixe Gaussiano TEM₀₀, o limiar de ablação está diretamente relacionado com a dimensão máxima ρ_{max} e os pulsos laser de energia E_0 , através da própria expressão:

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

Para levar em conta os efeitos de incubação, a sobreposição de N pulsos diferentes é considerada como a razão entre a soma das intensidades produzidas em (X, ρ_{max}) por cada pulso que atinge a amostra, durante o seu movimento, e a intensidade do pulso centrado gerado em $(X, 0)$. Partindo deste pressuposto, pode ser mostrado, Machado et al (2012) que:

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

Onde \mathfrak{G}_3 é a função elíptica do terceiro tipo, teta de Jacobi, f é a frequência de repetição do laser e v_y é a velocidade de translação transversal da amostra. Para as taxas de repetição transversais e velocidades baixas, a eq. (2) pode ser aproximada para:

$$N \sim 1.8\rho_{\text{max}}/v_y, \quad (3)$$

Os materiais utilizados para a investigação da interação com pulsos ultracurtos foram o cobre e o aço inoxidável VI 138. O cobre foi escolhido em função de sua alta condutividade térmica, o que pode indicar a importância dessa propriedade tanto na ablação do material quanto na condução do calor para fora da região irradiada. No caso do aço inoxidável, a escolha se deve ao interesse na microusinagem desse material, que é utilizado largamente em implantes cirúrgicos, para a marcação e gravação de informações do material implantado, sem alterações significativas da microestrutura da região gravada. Os materiais têm suas propriedades térmicas apresentadas na Tab (1). As amostras do aço inoxidável VI 138 utilizadas tinham espessuras de aproximadamente 1mm e a área irradiada era de geometria retangular de 13 x 18mm. As amostras de cobre utilizadas tinham espessuras de aproximadamente 1mm e a área

irradiada de 9 x 25. Ambas amostras em sua preparação foram embutidas em baquelite, lixadas e posteriormente polidas com pasta de diamante de granulação de 3µm.

Tabela 1. Características térmicas dos materiais.

Material	Ponto de Fusão (°C)	Coefficiente linear de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Condutividade térmica (W/m - K)	Calor espec. (J/Kg - K)
Cobre	1083	17,7	398	386
VI 138	1500	16	15,9	502

O experimento foi conduzido com um sistema laser de Ti: Safira (Femtopower Compact Pro CE-Phase HP / HR de Femtolasers), com emissão centrada em 785 nm, com 37 nm de largura de banda, taxa de repetição máxima de 4kHz, controlada por uma célula de Pockels, 800 µJ de energia máxima por pulso, e emissão polarizada linearmente na direção horizontal. Três durações temporais diferentes de pulsos foram utilizadas : 25 , 80 e 125fs. Para as irradiações, as energias dos pulsos foram atenuadas para aproximadamente 90µJ, o feixe foi focado por uma lente de comprimento focal de 75 milímetros (Thorlabs AC254 - 075 - B), e a amostra foi movida por um sistema de 3 eixos controlado por computador. Durante o experimento, a amostra foi sempre movida de antes para depois da cintura do feixe, isto é, no início o foco se encontrava no interior da amostra, movimentando-se da direita para a esquerda, terminando o movimento com o foco acima da sua superfície. Várias combinações de taxas de repetição e velocidades de deslocamento transversal da amostra v_y (no plano horizontal) foram utilizadas para cobrir as superposições de um único pulso até mais de 10^4 pulsos. Assim foram utilizadas as taxas de repetição de 100 , 500 e 4000 Hz e velocidades de 0,05 ; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20 e 30 mm/s. A velocidade de deslocamento longitudinal da amostra , v_z (no plano horizontal) , era sempre igual a v_y para gravar perfis alongados [30]. Após a gravação de cada traço D-Scan, a amostra foi deslocada verticalmente (direção x) por 400 micrômetros, esta separação foi usada como uma escalada para medir $2p$ máximo no microscópio óptico (MO). A Figura (2) apresenta traços obtidos no experimento de 25fs.

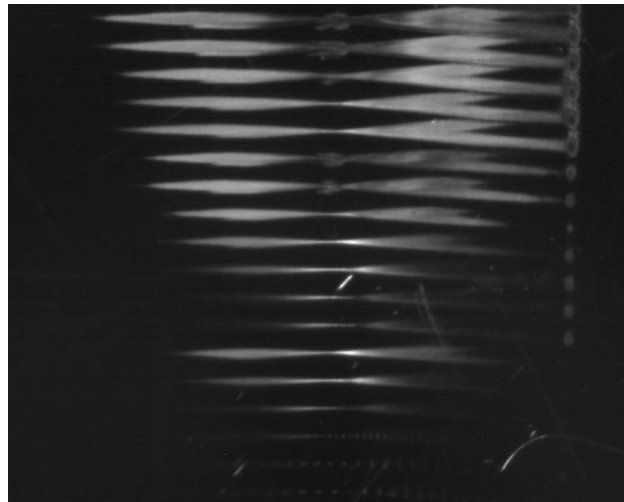


Figura 2. Traços gerados pela técnica D-Scan no experimento no aço VI 138, com pulsos de 25fs.

Esses traços foram usados para medir o limiar de ablação (F_{th}) para pulsos sobrepostos e o parâmetro de incubação (k) do aço inoxidável VI 138 e do cobre, assim como para verificação dos seus efeitos na morfologia da superfície desses materiais em função da variação dos parâmetros do experimento. Todas as irradiações foram realizadas em atmosfera protetora de Argônio (Ar) com fluxo de 10L/min. Posteriormente as amostras foram limpas com álcool isopropílico, no aparelho de ultrassom por 10 min, para remover detritos da ablação depositados.

A imagem obtida no microscópio eletrônico de varredura TM3000, apresentada na Fig. (3), mostra os seis primeiros traços gerados pela técnica D-Scan, no experimento onde foi usada a largura temporal do pulso de 25fs, com velocidades de varredura crescentes de cima para baixo (na Fig. 2). A figura da direita mostra o processo de medição dos traços.

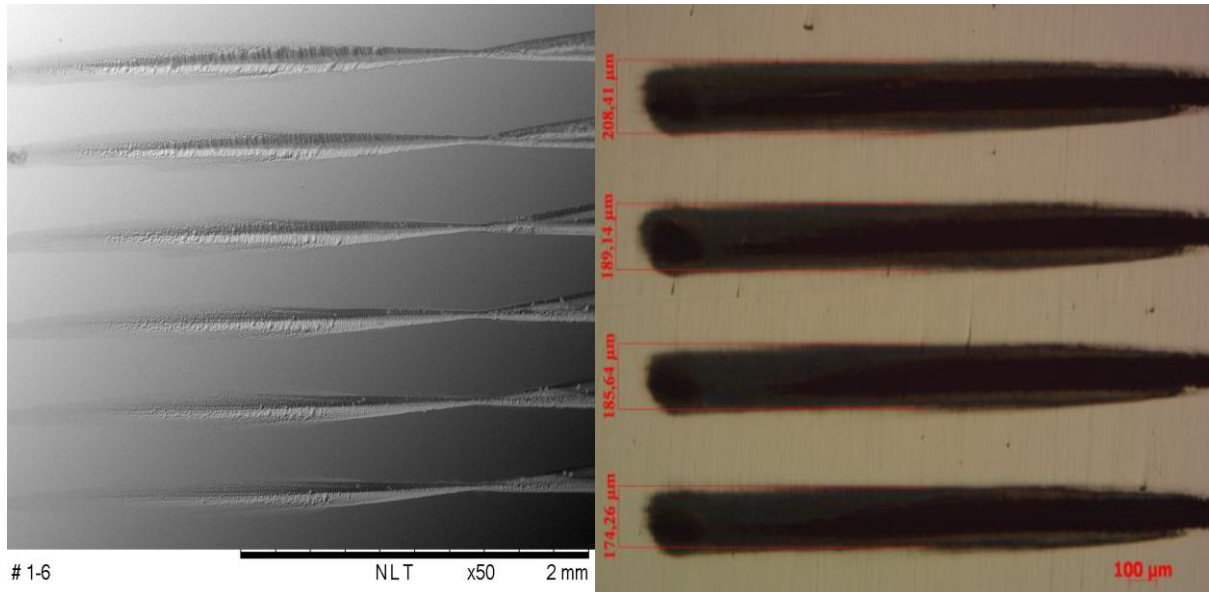


Figura 3. Na imagem da esquerda obtida no MEV, são mostrados os seis primeiros traços gerados pela técnica D-Scan. A imagem da direita obtida no MO, mostra medida $2\rho_{max}$ usada no cálculo do limiar de ablação do VI 138.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas análises dos traços, foram utilizadas a microscopia óptica (MO), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e o perfilmetro óptico. As imagens geradas foram utilizadas para se fazer as medidas das larguras dos traços (MO) e a análise das mudanças na morfologia dos traços na superfície do cobre, assim como do aço inoxidável VI 138 (MEV e Perfilmetro).

No gráfico da Figura (4), observa-se o decréscimo do limiar de ablação (F_{th}) do aço inoxidável VI 138 (à esquerda) e do cobre (à direita) com o aumento da sobreposição N de pulsos e um comportamento similar para as três larguras temporais utilizadas, para ambos os materiais. Porém no experimento do cobre, para menores sobreposições, este apresentou maiores limiares de ablação, em relação ao aço inoxidável.

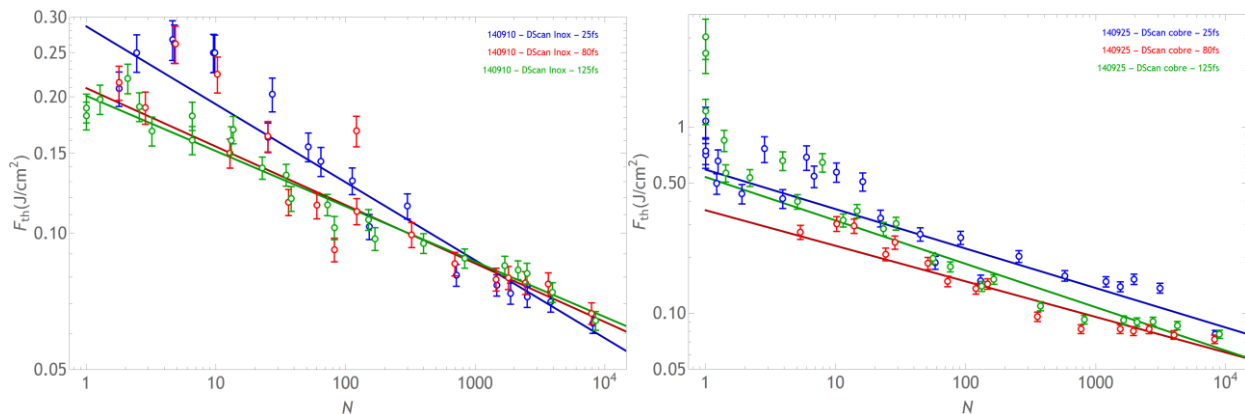


Figura 4. Gráfico dos limiares de ablação (F_{th}) em função do número de pulsos sobrepostos (N) obtidos na execução dos traços no aço inoxidável VI 138 (à esquerda) e no cobre (à direita).

Aproveitando a vantagem da técnica D-Scan, de proporcionar a reprodução rápida de diversas condições com diferentes morfologias de ablação o experimento foi dividido em três grupos principais de regimes de ablação, para as três larguras temporais, para ambos os materiais, porém para sobreposições distintas para cada material. No cobre, o primeiro grupo está compreendido entre o primeiro e o terceiro traço, na qual a sobreposição está aproximadamente entre 3100 e 16700 pulsos, onde ocorre a ablação mais efetiva (de maior volume) do material. Já no aço inoxidável, o primeiro grupo está compreendido entre o primeiro e o sexto traço, na qual a sobreposição está aproximadamente entre 1400 e 16100 pulsos, condição que também apresenta a ablação mais efetiva do material. A Fig. (5) apresenta os traços realizados na amostra do VI 138 com a maiores sobreposições de pulsos. Ao contrário do que se poderia esperar, observa-se que a região onde o foco está na superfície da amostra não corresponde à maior profundidade de ablação. Este fato também se repete para condições de menor sobreposição e também no cobre. Por ser a região onde a

intensidade é maior, esperava-se uma maior remoção de material e maior profundidade de usinagem. Um dos fatores que podem ter contribuído para esta diminuição de eficiência na remoção de material é que a alta intensidade produz uma ionização muito grande da atmosfera neste ponto. O plasma formado por esta ionização absorve parte do próprio feixe laser diminuindo a energia que chega até a superfície. Para regiões fora do foco, o diâmetro do feixe é maior, a intensidade é menor e o plasma passa a ser muito pequeno ou inexistente. A eficiência de remoção passa a ser maior quando não há plasma, e com o deslocamento do feixe para posições mais afastadas do foco, a profundidade de ablação passa por um máximo e depois decresce continuamente até não haver mais ablação. O estudo mais detalhado da relação entre intensidade e remoção de material ainda está sendo estudada e deverá resultar em uma otimização de processos com lasers de pulsos ultracurtos em ambos os metais. Comparando-se a morfologia dos traços obtidos no cobre e no aço inoxidável VI 138, nota-se o perfil mais alongado e profundo obtido no aço (a e b), proporcionando uma maior quantidade de material ablaçado em relação ao cobre (c) em condições similares de processo.

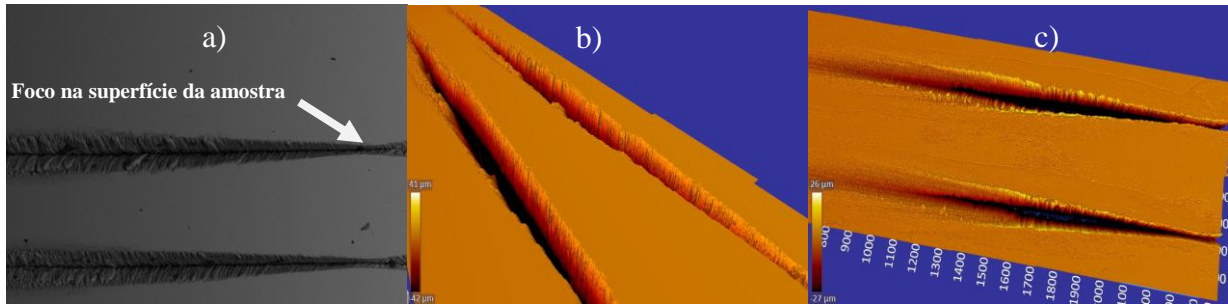


Figura 5. Condições de maiores sobreposições de pulsos na execução dos traços no aço VI 138(a e b) e no cobre(c).

A partir da observação dos traços realizados nos experimentos, em ambos os materiais, a condição de melhor acabamento, principalmente de borda, foi obtida na largura temporal de 25fs. No cobre a melhor condição de ablação/acabamento, ocorreu no terceiro traço, onde a sobreposição foi de $N \sim 3100$ pulsos. No aço inoxidável a condição mais favorável obtida foi no traço 6, com $N \sim 1450$ pulsos sobrepostos, Fig. (5).

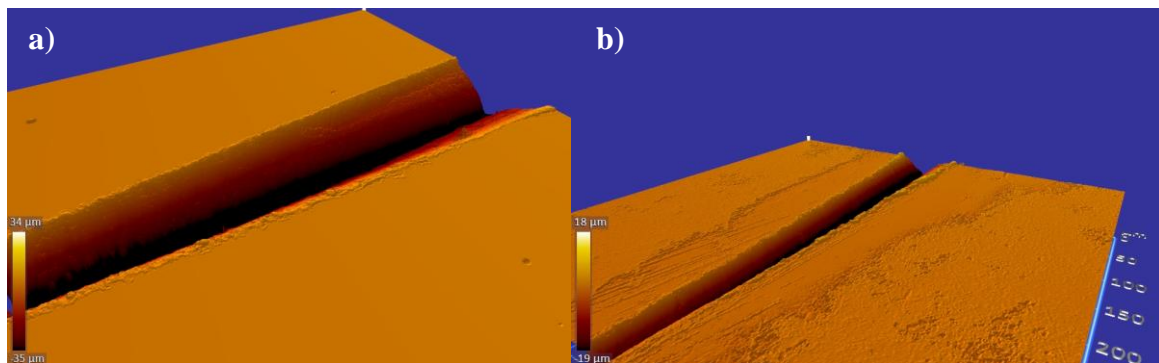
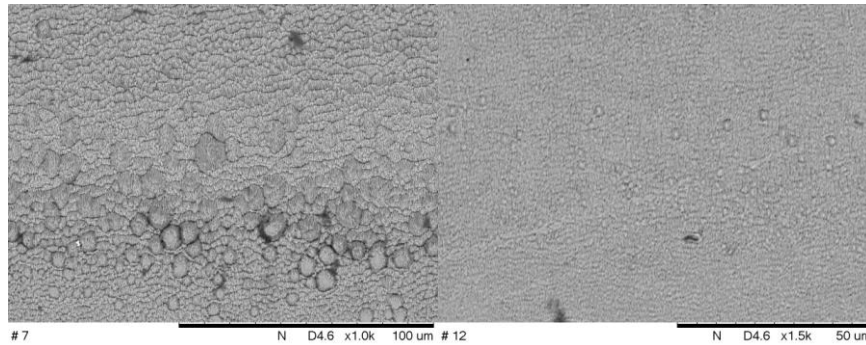


Figura 5. Condição na qual se obteve a borda melhor definida na execução dos traços no aço VI 138 (a) e do cobre (b).

No aço inoxidável, o segundo grupo está compreendido entre o sétimo e o décimo traço, em que a sobreposição está aproximadamente entre 45 e 720 pulsos, condição na qual ocorre a remoção de pequenas porções de material que formam uma estrutura granulada. No cobre, está compreendido entre o quarto e o sétimo traço, onde a sobreposição está aproximadamente entre 600 e 2000 pulsos, condição que também ocorre a remoção de pequenas porções de material que formam uma estrutura granulada, Fig. (6). Moradi et al (2013), obtiveram resultado similar a essa estrutura no estudo da rugosidade e superhidrofobicidade do aço inoxidável 316L.

VI 138



Cobre

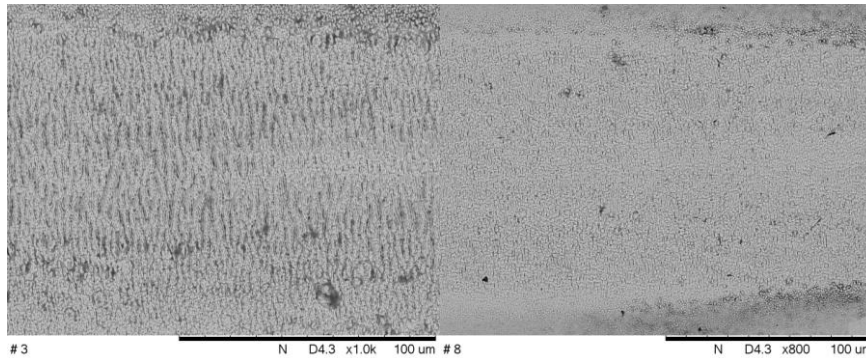


Figura 6. Condições em que se obtém estrutura granulada sem a ablação mais intensa no VI 138 e no cobre.

O terceiro grupo está compreendido, no aço inoxidável VI 138, entre um único pulso e a sobreposição de aproximadamente 50 pulsos. Nesta condição ocorre a formação de pequenas ondulações periódicas na superfície do material, com período de aproximadamente 600nm, e que não variam em função da maior ou menor sobreposição de pulsos. Observa-se, apenas uma maior profundidade destas estruturas com a maior sobreposição, alterando a coloração do material que se torna mais escurecido. No cobre essa estrutura ocorre com mesmas características, porém apenas acima de 10 até 130 pulsos sobrepostos. Fig. (7). Em estudo sobre a formação de micro/nano estruturas na superfície do silício, Barada et al (2010), descrevem a formação de estruturas semelhantes às obtidas nesse terceiro padrão obtido no VI 138, assim como no cobre.

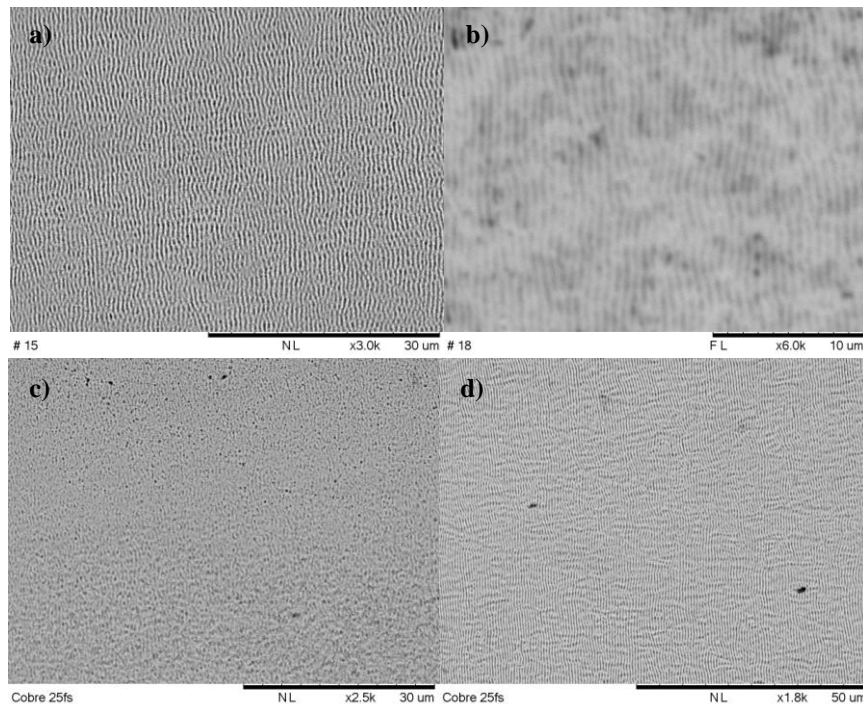


Figura 7. Condições em que se obtém estrutura ondulada e mudança de coloração na superfície irradiada no VI 138 e no cobre . Em (a) 9 pulsos, em (b)1,7 pulsos sobrepostos no VI 138. Em (c) 10 pulsos, em (d) 130 pulsos sobrepostos no cobre.

4. CONCLUSÃO

Com o uso da técnica D-Scan foi possível obter uma grande quantidade morfologias na superfície do aço VI 138 e do cobre. Os dados referentes às medidas dos traços evidenciaram que o limiar de ablação (F_{th}) diminui de maneira similar para as três larguras temporais estudadas em função da sobreposição de pulsos, para ambos os materiais. Na comparação dos resultados obtidos no VI 138 e no cobre, verificou-se para condições similares de processo, os perfis usinados no aço são mais profundos e alongados, enquanto no cobre são mais curtos e rasos. Também foi possível identificar três distintas morfologias de ablação na superfície de ambos materiais. No VI 138, observou-se uma ablação mais severa nas sobreposições entre 1400 e 16100 pulsos, enquanto no cobre ocorreu entre 3100 e 16700 pulsos sobrepostos. Uma formação granulada entre 60 e 720 pulsos no aço e entre 600 e 2000 pulsos sobrepostos no cobre. A formação de ondulações periódicas ocorreu entre 1 e 50 pulsos no aço e entre 10 e 130 pulsos sobrepostos no cobre. Nessa última condição ocorre uma suave ablação de uma camada superficial, porém ocorre o seu escurecimento, possibilitando o uso desses parâmetros para marcações na superfície destes materiais. Assim semelhantes padrões morfológicos de ablação podem ser obtidos para ambos os materiais, porém em distintas Fluências e sobreposições de pulsos.

Verificou-se também que, à medida que se diminui a largura temporal dos pulsos ocorre uma melhoria nas bordas dos traços, sendo a largura temporal de 25fs a mais adequada para a produção de cortes precisos em ambos os materiais.

A ablação com pulsos laser ultracurtos no aço VI 138, assim como no cobre, apresentou nas diversas morfologias e promissores resultados, que poderão ser usados na microusinagem de precisão, na gravação e marcação destes materiais.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo fomento a este trabalho através dos projetos CNPQ n° 310111/2009-9, ao IPEN por disponibilizar a infraestrutura necessária a este projeto e ao IFSP por disponibilizar seu laboratório para medição e análises no seu microscópio óptico. Agradecem também a empresa Villares Metals do Brasil por disponibilizar o material utilizado nesse estudo.

7. REFERÊNCIAS

- Ahnmmed T. K.M., Ling E. J.Y., Servio P., Kietzig A. M., 2015, "Introducing a new optimization tool for femtosecond laser-induced surface texturing on titanium, stainless steel, aluminium and copper" *Optics and Lasers in Engineering*; 66: 258–268.
- Anisimov S.I., 1968, "Vaporization of Metal Absorbing Laser Radiation". *Sov. Phys. JETPUSSR.*; 27: 182-183.
- Barada K.N., Mool C.G., 2010, "Ultrafast laser-induced self-organized conical micro/nano surface structures and their origin." *Optics and Lasers in Engineering*; 48: 966–973.
- Ben-Yakar A., Byer R.L. 2002, "Femtosecond laser machining of fluidic microchannels forminiaturized bioanalytical systems." In: Sugioka K, Gower M. C., Haglund R.F., Pique A.,Dubowski J.J., Hoving W., editors. *Photon Processing in Microelectronics and Photonics.* : 212-217.
- Boot H.A.H., Clunie D.M., Thorn R.S.A., 1966, "Micromachining with a pulsed gas laser". *Electron. Lett.*; 2: 1.
- Bourg H., Frederick R.W.1975, "Laser Machining of Silicon." *J. Electrochem. Soc.*; 122: 260-260.
- Chou SY, Krauss P.R., Renstrom P.J., 1996, "Imprint lithography with 25-nanometer resolution". *Science.* 1996; 272: 85-87.
- Cohen M.I., Unger B.A., Milkosky J.F., 1968 "Laser Machining of Thin Films and Integrated Circuits." *AT&T Tech. J.*; 47: 385-405.
- Diels J.C., Rudolph W. "Ultrashort laser pulse phenomena : fundamentals, techniques, and applications on a femtosecond time scale." Burlington, MA: Academic Press.
- Dornfeld D., Min S, Takeuchi Y.,2006, "Recent Advances in Mechanical Micromachining. *CIRP Ann.-Manuf. Techn*" 55: 745-768.
- Gad-el-Hak M., 2006, "MEMS : introduction and fundamentals the MEMS handbook." "Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis".
- Hirayama Y., Obara M., 2002, "Heat effects of metals ablated with femtosecond laser pulses" *Applied Surface Science*; 197-197: 741–745.
- Honig R.E., Woolston J.R., 1963 "Laser-Induced Emission of Electrons, Ions, and Neutral Atoms from Solid Surfaces". *Appl. Phys. Lett.*; 2: 138-139.
- Ion J.C.2005, "Laser processing of engineering materials : principles, procedure and industrial application. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann.

- Kaminski P.C., Capuano M.N., 2003, "Micro hole machining by conventional penetration electrical discharge machine" *Int. J. Mach. Tool Manu.*; 43: 1143-1149.
- Keller U., 2010, "Ultrafast solid-state laser oscillators: a success story for the last 20 years with no end in sight." *Appl. Phys. B-Las. Opt.*; 100: 15-28.
- Kocher E., Tschudi L., Steffen J., Herziger G., 1972 "Dynamics of laser processing in transparent media" *IEEE J. Quantum Elec. QE.*; 8: 120-&.
- Kogelnik H., Li T., 1966, "Laser Beams and Resonators". *Appl. Opt.*; 5: 1550-1567.
- Kovacs G.T.A., Maluf N.I., Petersen K.E., 1998, "Bulk micromachining of silicon". *Proceedings of the IEEE.*; 86: 1536-1551.
- Lan B., Hong M.H., Ye K.D., Wang Z.B., Chong T.C., 2003, "Laser microfabrication of glasssubstrates by pocket scanning." In: Miyamoto I, Ostendorf A, Sugioka K, Helvajian H, Laser Pulses – Theory, Technology, and Applications editors. *Fourth International Symposium on Laser Precision Microfabrication*; 168: 133-136.
- Lane D.W. 1990 "The optical properties and laser irradiation of some common glasses." *J. Phys. D Appl. Phys.*; 23 : 1727.
- Liu J.M., 1982, "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes." *Opt. Lett.*; 7: 196-198.
- Longfell J. 1971, "High Speed Drilling in Alumina Substrates with a CO2 Laser". *Am Ceram Soc Bull*; 50: 251-&.
- Machado L.M., Samad R.E., Rossi W. and Vieira Junior N.D., 2012, "D-Scan measurement of ablation threshold incubation effects for ultrashort laser pulses." *Opt. Expr.*; (20): 4114-4123.
- McGuff P.E., Deterling R.A., Gottlieb L.S., Bushnell D., Fahimi H.D., 1964, "Surgical Applications of Laser". *Ann. Surg*; 160: 765-&.
- Morada M., Kamal S., Englezos P., Hatzikiriakos G.S., 2013, "Femtosecond laser irradiation of metallic surfaces: effects of laser parameters on superhydrophobicity." *Nanotechnology*. 2013; 24
- Pradhan B., Masanta M., Sarkar B., Bhattacharyya B., 2009, "Investigation of electrodischarge micro-machining of titanium super alloy." *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*; 41: 1094-1106.
- Russbuedt P., Mans T., Weitenberg J., Hoffmann H.D., Poprawe R., 2010, "Compact diode-pumped 1.1 kW Yb:YAG Innoslab femtosecond amplifier." *Opt. Lett.*; 35: 4169-4171.
- Samad R.E. and Vieira N.D., 2006 "Geometrical method for determining the surface damage threshold for femtosecond laser pulses." *Las.Phys.*; 16: 336-339.
- Samad R.E., Baldochi S.L. and Vieira Junior N.D., 2008, "Diagonal scan measurement of Cr:LiSAF 20 ps ablation threshold," *Appl. Opt.*; 47: 920-924.
- Sibbett W., Lagatsky A.A., Brown C.T.A. 2012 "The development and application of femtosecond laser systems." *Opt. Expr.*; 20: 6989-7001.
- Steen W.M. 2003, "Laser material processing." New York: Springer.
- Strickland D., Mourou G., 1985, "Compression of amplified chirped optical pulses." *Opt. Commun.*; 56: 219-221.
- Stuart B., Feit M., Rubenchik A., Shore B., Perry M. 1995, "Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses." *Phys. Rev. Lett.*; 74: 2248-2251.

ABLATION LASER PULSE ULTRASHORT: EVALUATION OF THE EFFECTS OF COPPER AND STAINLESS STEEL VI 138

Denilson de Camargo Mirim , dmirim@usp.br¹

Ricardo Elgul Samad, resamad@gmail.com²

Nilson Dias Vieira Junior, nilsondo@gmail.com²

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br²

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo- Campus Sorocaba, R. Maria Cinto de Biaggi 130, J. Santa Rosália CEP: 18095-410 – Sorocaba – SP BRASIL.

²Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, Av. Lineu Prestes 2242 - Cidade Universitária - CEP: 05508-000 - São Paulo - SP BRASIL.

Abstract: Currently many business processes of industrial production use lasers to perform cutting operations, drilling and texturing. Are well established processes, which have dedicated equipment and well established methodologies. Although efficient and certain precision, are thermal processes with inherent disadvantages as burrs, solidified material, heat affected zone and some dimensional inaccuracy. The use of ultrashort laser pulses, the time width of the order of a few tens of femtoseconds makes it possible to perform these processes without the heat generation as in the case of dielectric or with negligible heat generation in the case of metals.

In this study, we used stainless steel for surgical implants, VI 138 and Copper, to study the interaction with femtosecond laser pulses in order to obtain the process conditions in which the heat generation is minimized or even eliminated. The process parameters were varied temporal width of the laser pulses 25, 80 and 125fs, the power density and the number of overlapping pulses. D-scan technique was used to determine the ablation threshold as a function of the number of overlapping pulses. We analyzed the ablated area and the morphology changes of the resulting materials of the case. Conditions minimum heat were obtained with minimizing production of burrs and solidified material, and surfaces with different morphologies. Results that will be presented were obtained by optical microscopy, scanning electron and optical profilometry.

Keywords: femtosecond laser, Micro Machining, Stainless Steel VI138, Copper