

CORTE DE METAIS POR ABLAÇÃO COM PULSOS LASER ULTRACURTOS

Leandro Matioli Machado; Ricardo Egmul Samad; Anderson Zanardi de Freitas; Nilson Dias Vieira Júnior; José Roberto Berretta, Wagner de Rossi

Centro de Lasers e Aplicações, IPEN/CENEN-SP, Av Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo, Brasil

Maurício David Martins das Neves

CCTM - IPEN/CENEN-SP, Av Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo, Brasil

Resumo. *Na usinagem a laser de alta precisão é muito importante que a zona afetada pelo calor ZAC seja a menor possível. Com o intuito de analisar a influência da largura temporal dos pulsos laser em um processo de corte, realizamos, neste trabalho cortes em chapas de molibdênio com diferentes parâmetros de usinagem. Foram feitas medidas de microdureza Vickers e microscopia eletrônica por varredura na região de corte para medida da zona afetada pelo calor. Larguras temporais da ordem de milissegundos e femtossegundos (fs) foram usadas, e para determinados regimes de usinagem, a ZAC foi a mesma tanto para pulsos longos quanto para pulsos curtos. Verificamos, contudo, que para pulsos de femtossegundos com fluência da ordem do limiar de ablação do material, a zona afetada pelo calor foi desprezível. Este resultado indica que estas condições podem ser adequadas à obtenção de estruturas usinadas com dimensões próximas a poucos microns.*

Palavras-chave: *microusinagem, laser, femtossegundo, molibdênio, zona afetada pelo calor*

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa na área de processamento de materiais a laser tem tido um desenvolvimento muito grande nos últimos anos. O aumento da confiabilidade dos novos sistemas laser, a maior versatilidade dos sistemas CAD-CAM e a maior velocidade e precisão dos sistemas de posicionamento têm feito com que muitos dos desenvolvimentos obtidos em laboratório passem ao setor produtivo com grande aceitação em diversos setores industriais. Estes fatos, e os desenvolvimentos de novos lasers tornam ainda mais importante o aprofundamento do entendimento dos fenômenos que ocorrem quando uma radiação concentrada incide sobre a matéria. Neste sentido, o surgimento dos lasers de pulsos ultracurtos, com larguras temporais de fração de picosegundos, torna primordial este entendimento, e o que já foi estudado neste campo tem agora que ser reavaliado.

O processo físico de interação do laser com o material pode ser resumido a seguir¹:

Quando o laser atinge o material, a absorção do pulso ultracurto primeiramente é feita pelos elétrons livres devido à inversão de Brehmsstrahlung e absorção por ressonância, a energia é então transferida para o sub-sistema de elétrons e depois transferida para a rede. Existem dois meios pelos quais ocorre a transferência de momento do laser e dos elétrons para os íons na zona de absorção: uma é devido ao campo elétrico da separação das cargas e a outra é a força ponderomotiva devido ao campo elétrico oscilante não homogêneo.

Três tempos característicos são: T_e - o tempo de esfriamento do elétron, que é da ordem de 1ps; T_i - é o tempo de aquecimento da rede; T_l - é a duração do pulso laser. T_e e T_i são proporcionais às suas capacidades térmicas, dividida pela mesma constante, e a capacidade térmica dos elétrons é muito menor que a da rede, entretanto $T_e \ll T_i$. Três casos ocorrem quando existem diferentes T_l .

Primeiro caso: $T_l > ms \gg T_i \gg T_e$, nesse caso a escala de tempo é muito maior que o tempo de acoplamento da energia eletron-rede. A transferência de calor ocorre e o material é afetado termicamente.

Segundo caso: $T_l > ns \gg T_i \gg T_e$, nesse caso existe tempo suficiente para a absorção da energia do laser pelos elétrons ser transferida para a rede, elétron e rede podem chegar ao equilíbrio térmico, como no primeiro caso, e então a energia pode ser perdida sob a forma de calor na rede. O material primeiro derrete, e quando o feixe é potente o suficiente, ocorre evaporação. Normalmente a zona afetada pelo calor nesse processo é menor que no caso anterior e sempre existe.

Terceiro caso: $T_l \ll T_e \ll T_i$, onde T_l é da escala de femtossegundos, a duração do pulso é menor que o tempo de resfriamento dos elétrons e transferência para a rede. Os elétrons são aquecidos instantaneamente, então, por volta de 1ps, os elétrons transferem sua energia para os íons positivos da rede que são ejetados (ablação). A separação de carga ocorre se a energia de absorção dos elétrons excedem a energia de Fermi, que é aproximadamente a soma da energia de ligação mais a função trabalho, então os elétrons podem escapar do alvo. O campo elétrico gerado pela separação das cargas ejeta os íons do alvo, e ao mesmo tempo, a força ponderomotiva do campo do laser na casca do alvo empurra os elétrons mais profundamente no alvo. Como esse processo é ultra-rápido, o material é ejetado sem que haja transferência de calor dos elétrons para a rede.

Alguns trabalhos mostram que aplicações com laser de femtossegundos podem às vezes resultar em interações com zona afetada pelo calor. Isso ocorre quando a energia do pulso de femtossegundos é muito maior que o limiar de ablação do material para aquela escala de tempo. Então o processo em sólidos em geral é caracterizado por dois regimes de ablação: o de alta fluência e o de baixa fluência, sendo o primeiro, portanto, pouco adequado às aplicações que necessitam alta precisão. Obviamente, o tempo de processo para o regime de baixa fluência será muito maior, e por este motivo, lasers com baixa energia por pulso e altas taxas de repetição, da ordem de centenas de MHz, estão sendo desenvolvidos.

Como visto, a escala de tempo característica para a relaxação elétron-fonon em metais, está entre um e centenas de picosegundos (10^{-12} a 10^{-10} s). Assim, a escala de tempo é vital para o entendimento dos mecanismos envolvidos na ablação do material. Um estudo da intensidade de limiar de ablação para diferentes metais, com diferentes tempos de relaxação elétron-fonon, torna-se, portanto muito importante no entendimento da interação da radiação com metais nesta nova escala de tempo de trabalho. O estudo aqui realizado faz parte de um desenvolvimento maior, onde se pretende investigar os diferentes regimes de ablação de metais em função de diferentes parâmetros do feixe laser utilizado, principalmente da largura temporal destes pulsos.

O entendimento dos fenômenos que ocorrem nessa escala de tempo, quando se trata de processamento de materiais a laser, pode virtualmente levar a processos ou “usinagens” de metais, verdadeiramente livres de rebarbas ou de zona afetada pelo calor. Estudos estão sendo realizados em muitos laboratórios do mundo^{2, 3, 4} onde existe este tipo de laser dedicado ao processamento de materiais.

Um controle preciso do sistema mecânico de movimentação, juntamente com um bom entendimento dos parâmetros de processo tornam possível a usinagem de estruturas com dimensões menores que o limite de difração da luz utilizada para esta usinagem, ou seja, se a intensidade de

ablação para um determinado material for obtida somente na parte central de um feixe (focalizado) com distribuição gaussiana, então o dano causado deve ser o correspondente da dimensão desta parte do feixe. Como a dimensão de um ponto focal pode ser da ordem de 1 micron, ou menos, observa-se aqui a possibilidade de usinagem de estruturas submicrométricas, ou mesmo nanométricas.

A seleção do molibdênio como material de base foi motivada por: suas aplicações em micro eletro mecânica e a falta de trabalhos com pulsos ultracurtos. Aproximadamente dois terços do molibdênio consumido no mundo é empregado em ligas metálicas de alta resistência, as quais suportam bem temperaturas elevadas e possuem alta resistência à corrosão. Normalmente, essas ligas são usadas na construção de peças para aviões e automóveis, mas também existem aplicações do molibdênio na área da micro-eletrônica, nos chamados MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Nestes sistemas, as estruturas são muito pequenas e a sua usinagem não deve interferir nas suas propriedades físicas e metalúrgicas. Assim, a usinagem com laser de pulso ultracurto pode ser uma alternativa interessante para estas aplicações. Uma aplicação do molibdênio nos MEMS, é de um filme fino transparente e condutor aplicado em telas de projeção de cristais líquidos, e em sensores solares; também são utilizados como primeiro espelho nos reatores de fusão termonuclear⁵. Outras aplicações são encontradas em MEMS com o molibdênio na forma de ligas.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar as características de corte de chapas de molibidênio puro e a extensão da zona afetada pelo calor utilizando pulsos laser ultracurtos.

3. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

A interação do feixe laser com chapas molibidênio em diferentes regimes de usinagem foi analisada. Utilizamos dois tipos de lasers: um laser pulsado de Nd:YAG de pulso longo e um sistema de Cr:LiSaF de pulsos ultracurtos. O primeiro denominado de CPML (Central de Processamento de Materiais a Laser), emite radiação com comprimento de onda de 1,06 μm e pulsos com largura temporal da ordem de milissegundos. O laser de pulso ultracurto emite luz com comprimento de onda de 820 nm e largura temporal de 60 fs. Os lasers estão alocados no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN.

Com o laser de pulsos longos, foram realizados cortes em placas de molibidênio puro de 0,5 mm de espessura. Alguns parâmetros foram mantidos constantes como energia, taxa de repetição e distribuição espacial do feixe. Os parâmetros variados foram: velocidade de corte e largura temporal dos pulsos (Tabela 1).

O objetivo aqui foi o de variar não somente a intensidade do laser no ponto de interação, mas também o aporte térmico na região de corte, variando-se a velocidade de corte. Desta maneira, temos não somente o efeito térmico causado por um único pulso, mas também o efeito cumulativo representado pela superposição destes pulsos, que é uma função da relação entre a velocidade e a taxa de repetição do laser.

A análise da zona afetada pelo calor causada pelo feixe laser foi realizada por meio de ensaios de microdureza Vickers e por microscopia eletrônica de varredura da região vizinha à superfície de corte.

Utilizando-se o laser de Nd:YAG cortamos 4 placas com os seguintes parâmetros de corte: lente de focalização de 50mm de distância focal; energia por pulso de $1 \pm 0,1\text{J}$, taxa de repetição de 53 Hz e argônio como gás de processo a uma pressão 100 psi antes do bico de corte. Na tabela 1 são mostrados os valores usados nos ensaios

Tabela 1 - parâmetros de corte com o laser CPML.

	energia (J)	largura temp (ms)	velocidade (mm/min)
Mo n0	1	0,8	150
Mo n1	1	0,6	80
Mo n2	1	0,6	120
Mo n3	1	0,8	80

Com o laser de femtossegundos escolhemos dois regimes de interação: um de alta e outro de baixa fluência (razão entre energia do pulso e área do feixe laser). No regime de alta fluência usamos energias de 400 mJ por pulso, e no de baixa 50 mJ em ambos foi utilizada uma lente de focalização de 150mm de distância focal. Os parâmetros de corte são mostrados na Tabela 2. Como as energias utilizadas neste caso são muito pequenas, a quantidade de material retirada por pulso também deve ser muito pequena, assim, um corte completo somente é possível com a utilização de uma velocidade muito baixa ou através de diversas passagens do feixe laser sobre a linha de corte. Optou-se pela segunda alternativa para a minimização do aporte térmico.

Tabela 2 – parâmetros de corte com laser de femtossegundos.

	energia (J)	largura temp (fs)	velocidade (mm/min)	frequência(Hz)
Mo n4	400 μ J	60	10	1000
Mo n5	50 μ J	60	5	200

4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Na Figura 1 é mostrada a variação da microdureza Vickers em função da distância da borda do corte para as amostras cortadas com pulsos longos e ultracurtos. Conforme pode ser visto na figura 1 não são observadas diferenças distinguíveis na microdureza, mesmo para os pulsos de femtossegundos.

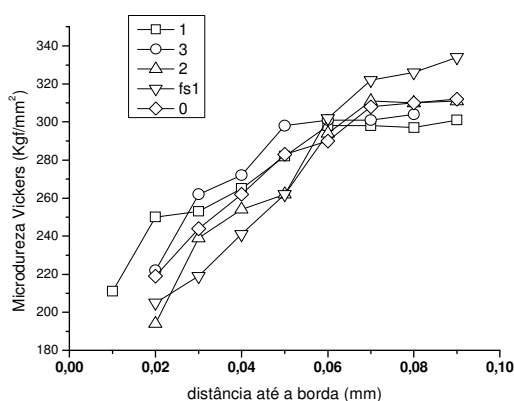


Figura 1 – Microdureza em função da distância até a borda do corte para os pulsos longos (0, 1, 2 e 3), e para a interação de alta fluência com o laser de femtossegundo (fs1).

Ao contrário do observado, no caso dos pulsos ultracurtos esperava-se uma ZAC inexistente ou muito pequena. A presença de ZAC pode ser atribuída ao uso de um regime de alta fluência (razão da energia do pulso pela área do feixe laser no ponto de interação com o material), ou seja, a fluência por

pulso, de aproximadamente $3,0 \text{ J/cm}^2$ foi muito maior que a fluência de limiar de ablação para os metais^{6, 7}, da ordem de $0,20 \text{ J/cm}^2$. Vale aqui salientar que a fluência de limiar para o molibdênio não foi encontrada na literatura, e também ainda não foi medida por nós.

Na Figura 2 é observada a variação de microdureza Vickers na região da borda do corte para uma amostra (fs2) irradiada com pulsos de 60 fs, porém, com energia de 50mJ. Portanto com fluência oito vezes mais baixa que a usada na amostra (fs1). Nestas condições não foi possível observar uma modificação significativa na microdureza Vickers em função da distância à borda de corte.

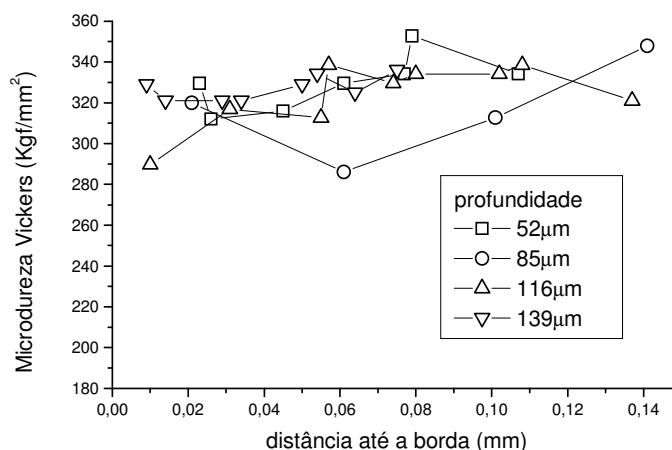


Figura 2 - Microdureza em função da distância à borda para diferentes distâncias à superfície de corte. Interação de baixa fluência. Amostra fs2.

Nas Figuras 3 e 4 é mostrada a microestrutura obtida com microscopia eletrônica de varredura (MEV) das chapas cortadas com pulsos longos de milissegundos. É observada uma clara mudança na microestrutura próximo à borda de corte mostrando a existência da ZAC.

A Figura 5 é referente à amostra cortada com pulso de 60 fs e 400µJ. Observa-se, na região de corte, uma mudança significativa na microestrutura quando comparada com a microestrutura original do material base MB, pois ocorre aumento no tamanho dos grãos, em relação ao tamanho dos grãos originais, indicando também a presença de ZAC.

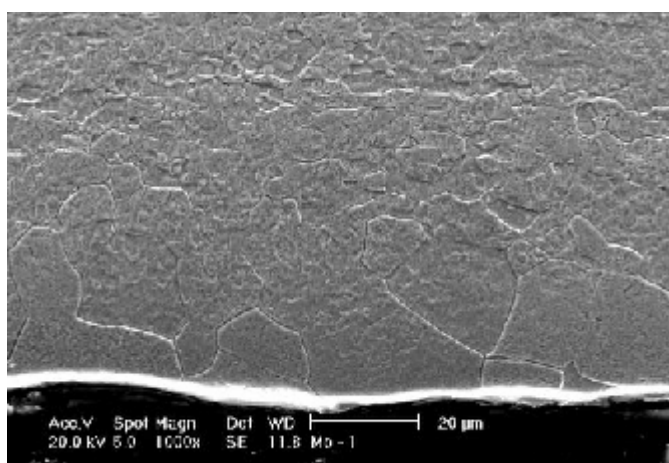


Figura 3. Amostra Mo-1 irradiada com pulsos de ms.

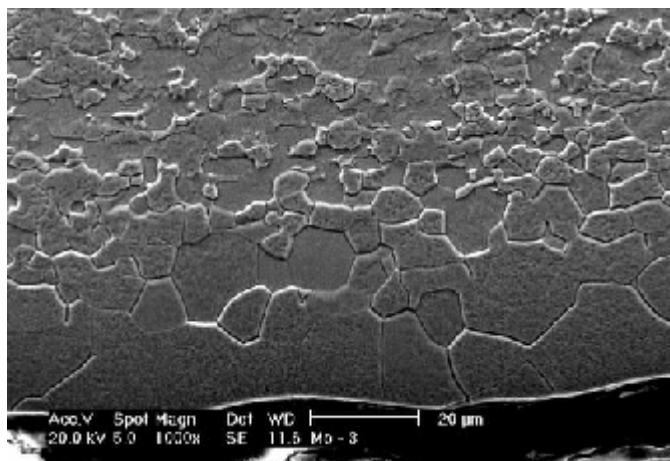


Figura 4. Amostra Mo-3 irradiada com pulsos de ms.

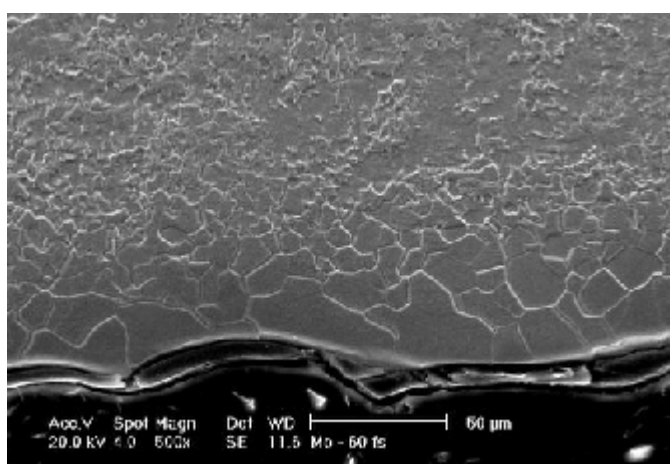


Figura 5. Amostra irradiada com pulsos de fs em regime de alta fluência (Mo - 60fs).

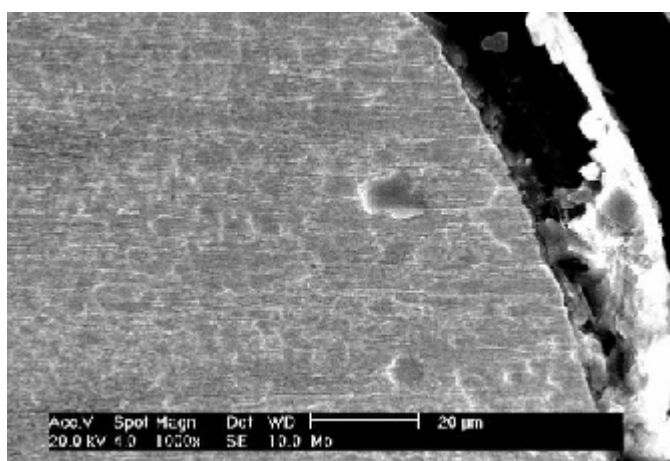


Figura 6. Borda de corte com pulsos de 60fs com regime de baixa fluência.

Na Figura 6 observamos a amostra cortada usando pulsos de fs com baixa fluência. Nas condições usadas não é possível observar uma mudança na microestrutura mesmo na região muito próxima à

borda de corte. Observamos uma definição de corte muito maior desta borda quando comparada à definição da borda obtida com pulsos longos.

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho mostrou que diferentes intensidades e aportes térmicos resultam em uma zona afetada pelo calor sem diferenças significativas para o caso de pulsos com larguras temporais da ordem de milissegundos.

O uso de pulsos com 60 femtossegundos de largura temporal, diferentemente do esperado, também causou uma modificação na microestrutura do material base, indicando uma ZAC com dimensões semelhantes às resultantes quando do uso de pulsos longos.

Não foi detectada a presença da ZAC no MB quando utilizado pulsos ultracurtos juntamente com a condição de baixa fluência. Neste caso, a boa definição de corte na borda indica que estas condições podem ser adequadas à obtenção de estruturas usinadas com dimensões próximas a poucos microns.

6. AGRADECIMENTOS

O Presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico – CNPQ – Brasil, e apoio financeiro FINEP Conv. FNDCT/CT-INFREA n. 1604/04 e FAPESP conv. 00/15135-9.

6. REFERÊNCIAS

1. E. G. Gamaly, A. V. Rode, B. Luther-Davies, and V. T. Tikhonchuk, Ablation of solids by femtosecond lasers: ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics, **Phys. Plasmas** 9, 949–957 (2002).
2. Lawrence Yao , Hongqiang Chen , Wenwu Zhang, Time scale effects in laser material removal : a review, **Springer-Verlag London Limited 2004**, pp . 598 - 608
3. Chen X, Liu X. “Short-Pulsed laser machining: how short is enough?” **J Laser Appl** 1999;11:268-72
4. D. Breitling, A. Ruf, F. Dausinger, Fundamental aspects in machining of metals with short and ultra short laser pulses, **Proc. of SPIE** Vol. 5339
5. **Fusion Engineering and Design** 66_/68 (2003) 865_/869 - Frequency laser damage of Mo mirrors A. Gorshkov *, I. Bel’bas, V. Sannikov, K. Vukolov
6. Nolte, C. Momma, H. Jacobs, A. Tunnermann, B. N. Chichkov, B. Wellegehausen, and H. Welling, Ablation of metals by ultrashort laser pulses , **J. Opt. Soc. Am. B** 14, 2716- (1997)
7. Experimental investigation of micromachining on metals with pulse durations in the range of the electron-phonon relaxation time (pico to subpicosecond)
Paul Mannion, Sebastian Favre, Dmitriy Ivanov, Gerard O’Connor, Thomas Glynn.
Proc. Int. Conf. on Lasers in Manufacturing (Munich) 2005, LIM Proc. page 521

METALS CUT BY ULTRASHORT LASER PULSES

Leandro Matioli Machado; Ricardo Egmul Samad; Anderson Zanardi de Freitas; Nilson Dias Vieira Júnior; José Roberto Berretta; Wagner de Rossi

Center of Lasers and Applications, IPEN/CNEN-SP, Av Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, 05508-000, São Paulo-SP, Brazil

Maurício David Martins das Neves

CCTM- IPEN/CNEN-SP, Av Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, 05508-000, São Paulo-SP, Brazil

Abstract. *For laser machining with high precision it is very important that the heat-affected zone (HAZ) generated is minimized. With the intention to analyze the influence of the time width of the laser pulses in the cut process, some plates of molybdenum were cut with different machine process parameters. Measurements of Vickers microhardness and Scanning Electron Microscopy for analyzes of the HAZ were made. Time widths of the order of millisecond (ms) and femtosecond (fs) were used, and for one determined regimen of machining, the HAZ was the same for long pulses and for ultrashort pulses. We verify that for femtoseconds pulses, with fluence of the order of the ablation threshold of the material, the heat-affected zone was worthless. Indicating that these conditions can be adjusted to the attainment of few microns laser machine.*

Keywords. *micromachining, laser, femtosecond, molybdenum, heat-affected zone*