

346

Título: Aspectos do corte com laser de Nd:YAG pulsado.

Autores: Wagner de Rossi^a, José Roberto Berretta^b, Ivan Alves de Almeida^c, Nilson Dias Vieira Júnior^a, Spero Penha Morato^c.

a - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – Centro de Lasers e Aplicações

b - Centro Tecnológico da Marinha- São Paulo – CTMSP

c - LaserTools Tecnologia Ltda

9954

Aspectos do corte com laser de Nd:YAG pulsado.

Wagner de Rossi, José Roberto Berretta, Ivan Alves de Almeida, Nilson Dias Vieira Júnior, Spero Penha Morato

Resumo:

O mercado de processamento de materiais a laser, especialmente o corte, tem tido um grande crescimento no Brasil nos últimos anos. Ao contrário do que acontece no resto do mundo, onde o mercado é dividido entre sistemas que empregam o laser de CO₂ e os que empregam o laser de neodímio, no Brasil este mercado é dominado quase que exclusivamente por estes potentes lasers a gás. A sua maior capacidade de corte e velocidade de processamento, tornaram o laser de CO₂ o preferido das empresas que atuam na área de corte, especialmente de aços, com espessuras de 0,5 mm a mais de 6,0 mm. Mostramos neste trabalho, que a menor capacidade de corte e velocidade de processamento do laser de Nd:YAG é muitas vezes compensada pela sua maior precisão e versatilidade. Aspectos de corte e furação obtidos com um laser pulsado de Nd:YAG de 100 W de potência média e 3kW de potência pico são mostrados. Resultados experimentais típicos são apresentados sobre aspectos importantes do corte, como rugosidade, zona afetada pelo calor, largura de corte, etc. Estudos de casos reais são também apresentados onde o laser de Nd:YAG pulsado mostra suas vantagens em relação aos tradicionais lasers contínuos, e mesmo quando comparado a outros métodos de corte. Outra aplicação importante deste tipo de laser é a furação, onde razão de aspecto (espessura/diâmetro) de até 40 e alta produtividade são práticas rotineiras. Exemplos de aplicações típicas destes furos para a indústria também são apresentados.

Aspectos do corte com laser de Nd:YAG pulsado.

Wagner de Rossi, José Roberto Berretta, Ivan Alves de Almeida, Nilson Dias Vieira Júnior, Spero Penha Morato

Introdução

A operação no regime pulsado, do laser de Nd:YAG, permite o controle exato da potência pico (energia/largura temporal de cada pulso) sobre o ponto de trabalho; o posicionamento por controle CNC com utilização de uma mesa de deslocamento de alta precisão permite a escolha do exato ponto a ser processado; a manipulação do feixe laser, através do controle dos parâmetros do ressonador óptico permite ainda um refinamento da ferramenta de usinagem (diâmetro do feixe focalizado) e o conseqüente controle da intensidade e da largura de *kerf* (sangria do corte). É justamente esta possibilidade de controle de diversos parâmetros simultâneos que torna o laser de Nd:YAG pulsado um equipamento extremamente versátil e muito útil em uma gama muito grande de aplicações. A maioria dos atuais sistemas de corte a laser empregados por *job shops* no país são de lasers de CO₂, com alta potência, mesas muito grandes, e com pouca possibilidade de controle dos parâmetros de corte. Estes equipamentos, ao contrário dos lasers de neodímio, não são adequados a cortes de precisão em materiais muito finos, não podem ser utilizados na furação de precisão nem na furação com alta razão de aspecto e são bastante limitados a aplicações de soldagem.

No caso de um laser pulsado, o controle da potência pico e da intensidade permite o exato balanço entre o fluxo de energia entregue ao material e a perda desta energia por reflexão e condução; este balanço da dinâmica do fluxo de energia por elemento volumétrico permite estabelecer o quão rápido este elemento irá se aquecer, o que determinará seu estado físico durante o pulso laser. Assim, com intensidade moderada podemos apenas liquefazer o material no preciso ponto focal, o qual se estende por toda a espessura do material (chapa plana). O deslocamento desta "poça líquida", segundo um desenho predeterminado, ao mesmo tempo em que um forte jato de gás é direcionado sobre o ponto focal do laser faz surgir um corte limpo, com pequeno *kerf* seguindo precisamente o projeto armazenado no CNC. Se a intensidade for reduzida ainda mais, podemos liquefazer o material com baixíssima perda por evaporação e/ou ejeção; neste caso, uma solda de precisão pode ser obtida, onde no lugar de um forte jato de gás utiliza-se uma atmosfera protetora de gás inerte. A utilização de altas intensidades por sua vez leva a uma grande perda de material por evaporação e, principalmente, por ejeção de líquido; este regime é, portanto utilizado para a furação por percussão, onde uma alta razão de aspecto exige que o material seja expulso do fundo do buraco (antes de se completar o furo) com alta energia cinética.

Os parâmetros de operação de um laser pulsado, e em particular, do equipamento utilizado neste trabalho são, portanto a energia por pulso, a largura temporal de cada pulso laser e a sua taxa de repetição. A relação entre a energia e a largura temporal fornece a desejada potência pico, enquanto que a taxa de repetição determina qual a velocidade permitida para o processo. A manipulação do feixe laser fornece ainda a possibilidade de se controlar o preciso diâmetro deste feixe em seu ponto focal; isto, além de determinar a intensidade utilizada também possibilita o controle do *kerf* e do diâmetro do furo para o caso de furação. A região de extensão destes parâmetros determina ainda a espessura do material processado e a velocidade do processo.

Equipamento utilizado

Os resultados experimentais apresentados neste trabalho foram obtidos com o uso de uma "Central de Processamento de Materiais a Laser" – CPML - inteiramente desenvolvida no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, em São Paulo. O equipamento, com capacidade

para usinagem em duas dimensões, é constituído por uma fresadora de controle numérico, à qual foi acoplado um laser de neodímio, juntamente com um sistema de guiamento e focalização do feixe. O sistema ainda incorpora um bico injetor de gás com pressão e fluxo controlado, possibilitando uso de gases inertes ou reativos durante o processo. Um sistema CAD-CAM, com pós-processador dedicado ao CNC e ao conjunto do laser possibilita a entrada de arquivos de desenhos do tipo dwg ou dxf para pronto reconhecimento pelo CNC facilitando a programação de usinagem.

A fresadora possui capacidade para usinagem em um plano com 700 mm x 300 mm, ou em um eixo de rotação, com possibilidade de interpolação entre quaisquer dois eixos. O laser, que foi especialmente projetado para o processamento de materiais, é de Nd:YAG, do tipo pulsado, com energia por pulso de até 8 J, taxa de repetição de até 500 Hz, potência média no ponto focal de 100 W, potência pico de 3 KW e largura temporal dos pulsos continuamente controlada entre 0,2 e 10 ms. O modo espacial do feixe laser pode ser multimodo ou TEM₀₀, com M² máximo de 12.

Estas características, juntamente com a possibilidade da escolha do tipo de ressonador, torna o equipamento adequado a diversas aplicações na área de processamento de materiais. Assim, a sua área de atuação abrange o corte, furação, solda e tratamento térmico, de uma gama bastante ampla de materiais, como cerâmicas, aços em geral e metais não ferrosos. A seguir são apresentados alguns resultados relevantes obtidos com este equipamento os quais foram desenvolvidos especialmente para uso prático da indústria.

Kerf

O "kerf" ou a largura da região de corte é um parâmetro de suma importância no corte a laser. Em qualquer desenho, esta largura de corte deve ser compensada para se atingir uma precisão dimensional adequada. O conhecimento prévio de sua dimensão e a manutenção desta dimensão durante o corte são fatores determinantes da precisão do corte. Contudo, este valor não é simples de se obter teoricamente¹, e uma medida experimental, nas condições do processo geralmente é necessária para a sua determinação. Como o kerf é uma função complexa do aporte térmico fornecido ao material, da espessura e das características térmicas deste material e ainda das características espaciais do feixe laser, qualquer flutuação em um destes parâmetros pode levar a uma variação indesejável da sua medida. Uma flutuação de apenas 5% na velocidade de corte ou na potência do laser pode levar, no caso de um laser contínuo, a uma variação de mais de 10% na largura do corte. Assim, cuidados especiais devem ser tomados para se evitar qualquer flutuação nos parâmetros do processamento. Mais que isto, programas especiais devem ser desenvolvidos para as regiões de cantos vivos e onde haja a necessidade de variação da velocidade. No caso de um laser pulsado, com pulsos de largura temporal da ordem de fração de milissegundo ou de até poucos milissegundos, este problema é extremamente minimizado. A tabela 1, mostra a variação da largura do kerf em função da velocidade de corte para três espessuras diferentes do aço inox AISI 304. Como visto, esta variação é consideravelmente menor que no caso de um laser contínuo; embora a espessura exerça uma influência importante na largura do corte, a variação desta largura em função da variação da velocidade é relativamente pequena.

Velocidade	k (e=0,5mm)	k (e=1mm)	k (e=1,5mm)
0,5. V _{máx.}	0,174		
0,65. V _{máx.}	0,174	0,245	0,260
0,75. V _{máx.}	0,184	0,256	
0,8. V _{máx.}	0,195	0,262	0,260
0,9. V _{máx.}	0,194	0,270	
V _{máxima}	0,199	0,281	0,284

Tabela 1 - Variação da largura k do corte (kerf) em função da velocidade V para diferentes espessuras "e" para o aço inoxidável AISI 304 com a utilização de O₂ como gás de processo.

A pouca influência da velocidade na largura do corte pode ser explicada pela pequena variação do aporte térmico ao material em função desta velocidade de corte; ou seja, no caso de um laser pulsado, o que determina primordialmente este aporte térmico é a energia, o diâmetro do feixe laser e a largura temporal do pulso. A velocidade de deslocamento da peça em relação ao ponto focal é de importância secundária, visto que durante a entrega da energia ao material (determinada pela largura temporal), o deslocamento da peça em relação ao feixe é muito pequeno. Assim, para uma velocidade de 1m/min, temos um deslocamento da peça de apenas 0,01mm e, para qualquer variação desta velocidade, temos uma variação de deslocamento proporcional a esta variação de velocidade. A variação do volume afetado será, portanto muito pequena o que afetará muito pouco a largura do corte. Outro fato a contribuir para a variação da largura do *kerf*, é a pluma formada sobre o ponto focal durante o corte. Esta pluma é formada por vapor e plasma do material ejetado, a qual espalha e defocaliza o feixe laser de seu ponto original. Este espalhamento e defocalização diminuem a retirada de material, e conseqüentemente de vapor e plasma, diminuindo o espalhamento e a defocalização; a intensidade volta ao seu valor máximo e o processo é restaurado até que novamente o vapor e o plasma formado novamente diminuam a intensidade do feixe. Esta flutuação de intensidade experimentada pelo material resulta na formação de estrias na superfície de corte e também contribui para a variação da largura do *kerf*. Como o espalhamento da luz laser é mais intenso para comprimentos de onda maiores, o feixe de um laser de neodímio (comprimento de onda de 1,064 μm) é consideravelmente menos espalhado que o feixe de um laser de CO_2 cujo comprimento de onda é dez vezes maior (10,6 μm). Assim, os efeitos da pluma são muito menores para os lasers de neodímio que para os lasers de CO_2 ².

Outra vantagem do uso de um laser pulsado de estado sólido em relação à largura do corte esta na possibilidade de "projetar" a sua largura. Ou seja, podemos obter uma largura de *kerf* conforme desejado com razoável precisão dimensional. Isto pode ser feito pela escolha adequada de um conjunto de parâmetros como a energia por pulso, o comprimento focal da lente de focalização, o posicionamento do foco em relação à superfície na chapa e principalmente pela escolha do modo espacial. Assim, largura de corte desde poucas dezenas de micra até 0,5mm podem ser obtidos com erro menor que $\pm 8\%$.

Dois exemplos reais de controle da largura do corte foram feitos para a confecção de rasgos controlados para a produção de filtros. Um para obtenção de água potável, em estação de saneamento e outro para produção de centrífuga para filtragem em processos químicos. Foram feitos rasgos de 0,25 mm em chapa de 1,5mm de espessura para o primeiro caso e de 0,3mm em chapa de inox de 2,3mm para o segundo caso.

Zona Afetada pelo Calor – ZAC

A Zona Afetada pelo Calor – ZAC - é outro fator que diferencia bastante o corte com laser pulsado do corte com laser contínuo. Quanto à variação da sua extensão o raciocínio é semelhante àquele utilizado para a explicação da variação do *kerf*, ou seja, a variação da ZAC é pequena em função de flutuações nos parâmetros de corte. Aqui, porém, temos uma das principais vantagens da utilização do regime pulsado, que é a dimensão bastante reduzida desta ZAC. Obviamente que ela depende de muitos fatores, principalmente do material e do aporte térmico, porém, sua extensão típica não vai além de 50 micra para a grande maioria dos casos, e pode ainda ser reduzida para os casos em que isto for necessário. Isto é feito reduzindo-se a largura temporal do pulso laser com um aumento relativo da intensidade no ponto focal. Como a energia é geralmente depositada em uma fração de milissegundo (a largura temporal típica utilizada em lasers pulsados de neodímio), o tempo de interação da radiação com o material é demasiadamente pequeno para que o calor se propague para muito além da superfície de corte. A

alta intensidade ainda afeta a relação entre a quantidade de material líquido e a quantidade de material em forma de vapor na frente de corte. Como no caso pulsado esta intensidade é maior, a relação líquido/vapor é menor, e faz com que o material fundido, além de estar em menor quantidade, ainda seja retirado mais rapidamente da região do corte. As expressões abaixo mostram a intensidade típica na região do corte para o caso de um laser pulsado em comparação com um laser contínuo.

$$\text{Para o caso CW: } I = P.(\phi.V.t)^{-1}$$

onde I é a intensidade; ϕ é o diâmetro do feixe laser no ponto focal, V a velocidade de corte e t é o tempo de interação.

$$\text{Para o caso pulsado: } I = E.(t_p.A)^{-1}$$

onde E é a energia por pulso; t_p é a largura temporal do pulso laser e A é a área do feixe no ponto focal.

No caso de um laser típico CW (emissão contínua) de CO_2 de 5 kW, diâmetro do feixe de 0,2 mm e velocidade de corte de 2 m/min., temos uma intensidade de 750 W/mm^2 . Para um laser como o utilizado neste trabalho, com potência pico de até 3 kW, podemos chegar a intensidades de até 10^5 W.mm^{-2} .

A pequena zona afetada pelo calor, e o seu controle, pode levar à execução de peças com grande importância prática; a figura 1 e figura 2 abaixo, mostram dois exemplos. No primeiro caso temos rasgos em aço inox AISI 304 de 0,2mm de espessura, onde a mínima distancia deveria ser obtida. Como visto na foto, uma distancia entre cortes de 0,15mm foi obtida, com uma distorção muito pequena da peça. No segundo caso, temos uma tela feita em molibidênio com uma densidade de furos muito alta. São furos de 1mm de diâmetro, distribuídos em um arranjo hexagonal, espaçados de 1,3 mm entre centros, o que dá uma parede de largura muito pequena entre os furos. Em um diâmetro de 150 mm, foram executados mais de 12.000 furos, com uma distorção mínima da superfície da peça.

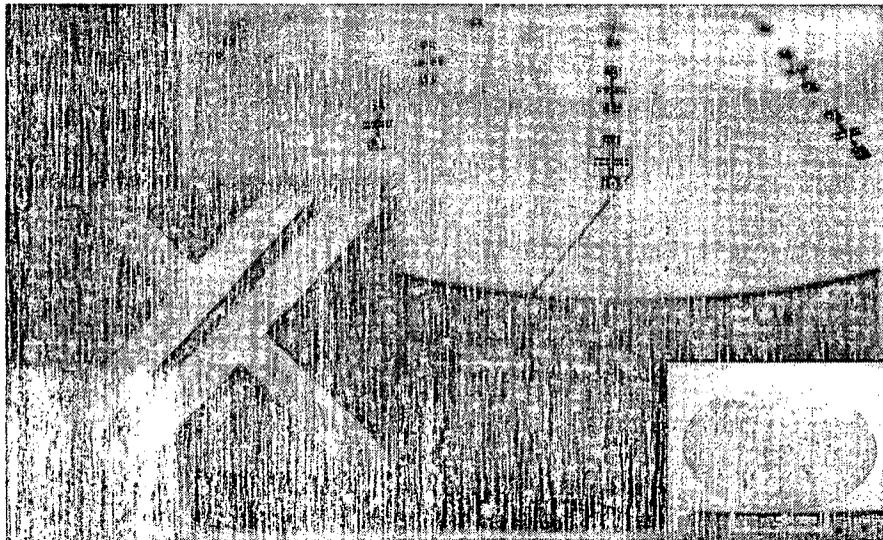


figura 1 Cortes feitos em aço inoxidável AISI 304 de 0,2 mm de espessura. O detalhe à direita mostra a peça inteira enquanto que a inserção à esquerda mostra o detalhe da parede obtida de 0,15 mm de espessura.

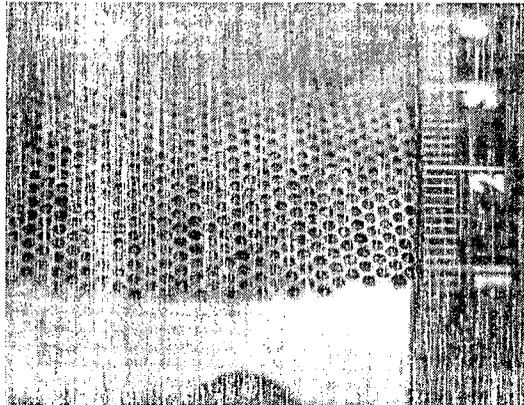


figura 2 Tela de molibidênio feita com 12.000 furos de 1,0 mm de diâmetro e espaçados de 1,3 mm entre centros.

Como exemplo da pequena zona afetada pelo calor, a figura 3 mostra o perfil da borda de corte de um aço elétrico Epstein 2% Si não orientado de 0,485 mm de espessura cortado com o laser da CPML com os seguintes parâmetros: largura temporal do pulso laser de 0,2 ms; energia por pulso de 0,5 Joules; taxa de repetição de 165 Hz e velocidade de corte de 300 mm/min. Vemos que nas condições do corte e do aumento utilizado não foi notada uma modificação na estrutura do material próximo à região do corte.

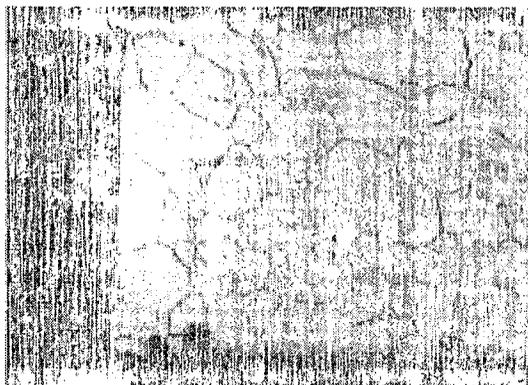


figura 3 perfil da borda de corte da folha de aço elétrico Epstein 2% Si não orientado de 0,485 mm de espessura³.

Piercing

O fato de se poder controlar de maneira mais efetiva a intensidade de um pulso laser do que de um feixe contínuo, possibilita a obtenção de um "piercing" (primeira entrada do feixe laser) com uma qualidade muito melhor. Para um mesmo diâmetro de feixe no ponto focal, ou seja, sem a mudança da lente de focalização ou da óptica do laser ou ainda do sistema de guiamento do feixe, é possível mudar o diâmetro do buraco obtido e até mesmo minimizar a quantidade de material respingado nas suas bordas. Controlando a intensidade do pulso laser, ou seja, da intensidade de pico, leva como visto, a uma maior relação vapor/líquido na poça produzida pelo feixe focalizado. O vapor, mais quente, apresenta-se como um filamento no centro da poça líquida; este filamento de vapor serve ainda de condutor para o restante do feixe, o que torna a poça mais profunda do que larga, exatamente como no caso de uma soldagem por "key hole". A rápida expansão deste vapor fornece energia suficiente para a retirada do líquido do restante da poça; quanto maior for a

intensidade, maior será a relação vapor/líquido. Quanto maior for esta relação, maior será a quantidade de material líquido retirado e maior será a sua energia cinética; assim, as pequenas partículas líquidas são ejetadas com energia cinética grande o suficiente para que não sejam depositadas nas imediações das bordas do furo. Obviamente, que o processo se torna menos eficiente, mas para os casos onde não se pode desprezar a região do *piercing* isto se torna uma alternativa importante. A foto mostrada na figura 4 apresenta um exemplo de *piercing* reduzido com praticamente nenhum respingo à sua borda.

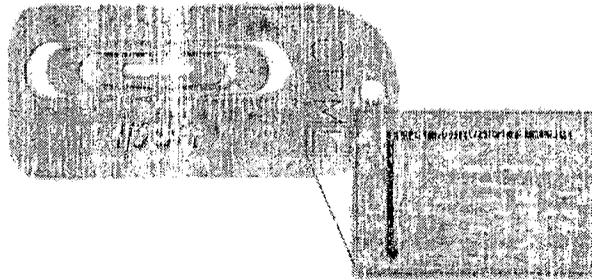


figura 4 Corte típico feito com o laser da CPML. As letras "CPML" foram feitas com um único corte; têm 0,15 mm de largura (de *kerf*) e a entrada do pulso é praticamente imperceptível.

Além do controle da intensidade para a minimização do material espirrado, podemos ainda no caso de um laser pulsado de neodímio, escolher um ressonador onde o modo espacial seja de menor ordem, levando a um diâmetro menor do furo. O limite depende da espessura do material, da óptica de focalização e das características do próprio laser. Esta solução, contudo, deve levar em conta o corte que segue logo após este *piercing*; ou seja, as condições da óptica e do ressonador não podem ser modificadas para a execução do corte subsequente e estas novas condições podem ser muito desfavoráveis ao corte.

Furação

No caso de uma furação, um laser pulsado pode oferecer uma solução muito eficiente para inúmeros casos práticos. Muitas vezes a furação a laser não é o método mais preciso para se obter um determinado furo, mas certamente é o método mais rápido e freqüentemente é o método escolhido quando analisado o custo benefício de todo o processo. Três são as maneiras principais de se obter um furo com laser pulsado: por pulso único; por percussão; e por trepanação. No primeiro caso um único pulso laser retira o material da chapa e deixa um buraco circular com as dimensões do feixe laser focalizado. No segundo caso, uma seqüência de pulsos é necessária para a retirada do material até que toda a sua espessura seja vazada. A trepanação é na verdade um corte circular cujo diâmetro é aquele pretendido para o furo.

Furação por pulso único é utilizada quando a velocidade de processo é o mais importante. Esta velocidade é dada pela relação da energia por pulso e taxa de repetição do equipamento laser, ou seja, da potência média do laser, e pode chegar a dezenas ou mesmo centenas de furos por segundo dependendo da potência do particular laser utilizado. A desvantagem deste método está na conicidade intrínseca do furo obtido, na razão de aspecto (espessura/diâmetro) relativamente pequena (< 5), e ainda em uma certa quantidade de material espirrado e aderido nas bordas da superfície superior do furo.

Na furação por percussão o feixe laser focalizado permanece estacionado sobre a peça enquanto uma seqüência de pulsos retira pouca quantidade de material de cada vez. Uma alta intensidade produzindo alta relação vapor/líquido expelle pouca quantidade de material para longe da superfície do furo deixando pouco ou nenhum respingo; razão de aspecto bastante altas podem ser conseguidas com conicidade relativamente pequenas. Com o uso da nossa CPML, furos de 18

micra foram feitos em lâminas de aço 1020 de 0,5mm de espessura, e furos de 50 micra foram feitos em aço inox AISI 304 de 1,5mm de espessura. A figura 5 mostra uma seqüência de furos feitos por percussão em aço inoxidável de 1,0 mm de espessura onde a intensidade e a largura temporal do pulso laser foram variadas⁴.



figura 5 Furos feitos por percussão em aço inoxidável de 1,0 mm de espessura. A intensidade aumenta da esquerda para a direita, a largura temporal utilizada foi de 0,3 ms, 0,6 ms e 0,9 ms de cima para baixo. Os furos maiores possuem diâmetro de 0,3mm, enquanto que os menores de aproximadamente 0,15 mm.

No caso de furação por trepanação, o feixe laser descreve o movimento de um círculo para cortar a chapa com o diâmetro desejado. Aqui o *kerf* obviamente deve ser levado em conta, e este, deve ter uma dimensão de no máximo três vezes menor que o diâmetro pretendido. As dimensões possíveis com este método são portanto geralmente maiores que aquelas obtidas por percussão, porém, neste caso temos a superfície com uma completa de material espirrado e uma conicidade muito pequena. As dimensões práticas possíveis dependem do modo espacial de oscilação do ressonador laser, da sua potência e do sistema óptico de focalização. No caso da CPML, furos com diâmetro de até 70 μm foram feitos em chapas de aço inoxidável de 0,5 mm de espessura pelo método de trepanação. A figura 6 mostra uma série de furos típicos obtidos por trepanação em aço inoxidável de 1,0mm de espessura. Os diâmetros são de aproximadamente 480 μm o que é muito próximo do que era pretendido.

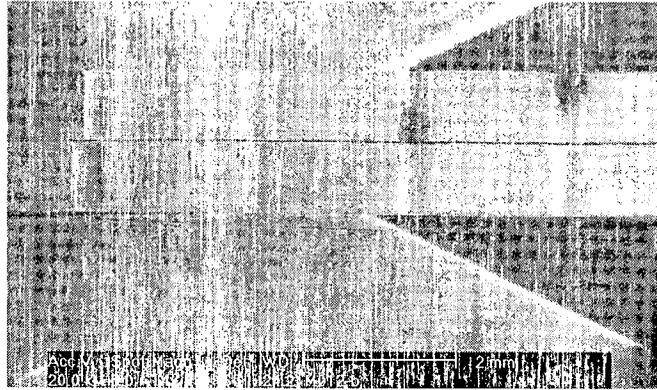


figura 6 Corte transversal de duas lâminas de aço inoxidável de 1,0 mm de espessura, mostrando furos feitos por trepanação.

Rugosidade

A rugosidade na superfície de corte no caso de um laser pulsado pode ser significativamente diferente daquela observada quando do corte feito por um laser contínuo, especialmente de CO₂. Neste caso, a superfície apresenta-se com estrias inclinadas homogêneas e freqüentemente contínuas, que vêm desde a superfície de entrada até a superfície de saída do feixe laser. No caso de um laser pulsado de neodímio, estas estrias dão lugar a uma rugosidade menos homogênea, mais pontiaguda, também inclinada em função da velocidade, mas muitas vezes de profundidade relativamente pequena. A tabela 2 mostra um exemplo típico de medidas de rugosidade obtidas em aço inoxidável AISI 304 de 1,5 mm de espessura, cortado com atmosfera de N₂ a uma pressão de 120 psi.

t _p (ms)	F (Hz)	E (J)	V (mm/min)	Foco (mm)	Ra (μm) entrada	Ra (μm) saída
0.8	37	157	250	0	10.24	6.17
0.8	37	157	250	-0.5	6.70	8.58
0.8	37	157	250	-1	4.51	5.04
0.8	36	157	250	-1.5	3.47	3.77
0.8	37	157	250	-1.75	2.75	2.88

Tabela 2 Rugosidade da superfície de corte em função da posição do ponto focal. Ra entrada: rugosidade média medida próximo à superfície de entrada do feixe laser; Ra saída rugosidade média medida próximo à superfície de saída do feixe laser.

t_p é a largura temporal do pulso laser;

F é a taxa de repetição do laser;

E é a energia por pulso;

V é a velocidade de corte;

Foco é a distância do ponto focal em relação à superfície da chapa. Valores negativos significam foco dentro da peça.

A tabela 2 é resultado de um estudo que envolveu o corte de chapas onde se buscou a otimização da rugosidade através da variação da posição do ponto focal em relação à superfície da chapa. Neste caso obteve-se um corte praticamente sem oxidação da superfície, com

rugosidade homogênea desde a superfície superior até a inferior a qual manteve-se inferior a 3 µm. No caso de corte com o uso de O₂ como gás de assistência, a rugosidade é ainda menor, mantendo-se próxima ou mesmo abaixo de 1 µm para a superfície de entrada.

Conclusões

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que o laser pulsado de Nd:YAG é uma alternativa útil para o processamento de materiais a laser onde os tradicionais lasers de CO₂ são ineficientes ou mesmo incapazes de atuar. Estes são os casos onde se necessita de pequena zona afetada pelo calor, de alta precisão dimensional, de distância entre cortes muito pequenas, de controle da dimensão do *kerf*, de furação de precisão, etc. O laser desenvolvido pelo IPEN e montado na Central de Processamento de Materiais a Laser "CPML" mostrou ser bastante útil, versátil, de precisão e de alta confiabilidade.

Agradecimentos

Agradecemos especialmente ao apoio financeiro da FINEP e do CNPq através do Instituto Fábrica do Milênio.

Currículo resumido dos autores:

Wagner de Rossi

Bacharel em Física pelo Instituto de Física da USP em 1978; Mestre em Ciências pelo Instituto de Física da USP em 1982; Doutor em Ciências na área de Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-USP em 1995. Pesquisador do Centro de Lasers e Aplicações pelo IPEN desde 1982, atuando na área de Lasers e suas aplicações, atualmente ocupa o cargo de Tecnologista Sênior e é responsável pelo Laboratório de Lasers e pelo Laboratório da Central de Processamento de Materiais a Laser. Consultor na área de aplicações industriais de lasers Publicou mais de 20 artigos indexados na área, apresentou 93 trabalhos em congressos nacionais e internacionais. Coordenou diversos projetos de desenvolvimento de lasers de estado sólido e suas aplicações nas áreas de processamento de materiais e odontológicas. Especialidades: sistemas de lasers de estado sólido; usinagem a laser; furação a laser; soldagem a laser.

José Roberto Berretta

Formado em engenharia mecânica pela FEI em 1986, fez mestrado em ciências no IPEN/USP, entre 1990 e 1995, no tema processo de endurecimento de materiais via laser. Atualmente faz doutorado em ciências no IPEN/USP, início em 2001, no tema soldagem laser de materiais dissimilares. Atua no Centro de Lasers e Aplicações do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares ligado à equipe de desenvolvimento e aplicações de lasers, na qual é o engenheiro mecânico responsável pelo desenvolvimento de projetos, manufatura e testes, de protótipos de lasers e de equipamentos para a infra-estrutura de produção de lasers, como: forno especial para produção de cristais com ação laser e politriz para lapidação e polimento destes cristais. Responsável, também por uma oficina mecânica, onde são manufaturados os protótipos. No desenvolvimento de equipamentos, contribuiu na construção de diversos lasers de estado sólido. O último desenvolvimento foi uma Central de Processamento de Materiais via Laser, que constitui em uma máquina CNC de quatro eixos com um laser versátil como ferramenta, onde podem ser feitas operações de furação, corte, marcação solda e tratamento térmico de superfície. Na área de aplicações de laser, investiga alguns processos, tais como: corte, furação, solda e tratamento térmico. Pela participação nos programas Redes Cooperativas de Pesquisas (RECOPE) e Instituto

Fabrica do Milênio (IFM) do Ministério de Ciência e Tecnologia, atendeu entre outras consultas do Instituto do Coração para soldagem de platina-irídio e soldagem de titânio, da Industrias Villares para desenvolvimento de um padrão de microtrinca em arame de aço mola, para aferição de equipamento de controle de qualidade, da CSN e Ferrolene no desenvolvimento de melhorias no processo de solda a laser de Tailor Blanks para as industrias automotivas, da Equatorial e INPE no desenvolvimento de solda entre materiais dissimilares para protótipo de propulsores de satélite.

Nilson Dias Vieira Junior,

Brasileiro, nascido em 13 de novembro de 1953, graduado em física em 1975; Mestre em Ciências (física nuclear em 1979), PHD em Ciências (física de estado sólido na área de lasers e espectroscopia óptica) pelo Instituto de Física da USP em 1986. Cientista visitante nos Laboratórios Bell, Holmdel, no grupo de Optoeletronica, com o Dr. Linn F. Mollenauer, no período de 1981 a 1984. Responsável pelo Laboratório de Filmes Finos do IPEN de 1979 a 1984. Responsável técnico pelo desenvolvimento do primeiro laser de estado sólido de centro de cor do Brasil, inteiramente desenvolvido no IPEN. Chefe da Divisão de Óptica Aplicada do IPEN de 1987 a 2000; fundador e chefe do Centro de Lasers e Aplicações também do IPEN. Responsável por diversos projetos na área de desenvolvimento e caracterização de novas fontes laser e suas aplicações. Um dos principais pesquisadores de diversos fóruns científicos, em particular do CEPID (Centros para Pesquisa, Inovação e Disseminação). Orientador de 8 teses de doutorado e de 12 dissertações de mestrado. Autor de 58 publicações com mais de 300 citações. Mais de 100 trabalhos apresentados em congressos nacionais e internacionais. Recebeu o Diploma de Honra da Comissão Nacional de Energia Nuclear em setembro de 1992 e o prêmio de distinção no mesmo ano. Árbitro de diversas agências de fomento e jornais brasileiros e internacionais. Membro do Conselho Superior da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo período de 2000 a 2006. Possui nível 1-C no CNPq.

Spero Penha Morato

Físico pela USP com mestrado também em física pela USP e doutorado pela University of Utah, USA em física da matéria condensada, desenvolveu sua carreira no IPEN na área de cristais para lasers e em lasers de estado sólido. Formou 22 pesquisadores mestres e doutores nestas áreas e publicou por volta de 60 artigos internacionais indexados como resultado dos trabalhos desenvolvidos pela equipe. Estes trabalhos resultaram em vários prêmios, 3 patentes nacionais, um prêmio Governador do Estado de São Paulo e em mais de 200 citações internacionais pelo WEB of Science. Galgou vários postos de gerência no IPEN tendo sido seu Superintendente de 1990 a 1995. Após este trabalho no IPEN, foi convidado pela ONU como consultor internacional para promover treinamento de engenheiros, técnicos e empresários em aplicações industriais de lasers em vários países. Em 1998 fundou a LaserTools Tecnologia Ltda que, inicialmente incubada no CIETEC/IPEN, hoje conta com uma instalação industrial e com 5 lasers de Nd:YAG, atuando como uma "job shop" em vários segmentos do mercado particularmente dos setores metal-mecânico, e eletro-eletrônico, ferramentarias e de instrumentação médico odontológica. Além da direção e gerenciamento da LaserTools, Dr Spero desenvolve métodos e procedimentos avançados de utilização industrial de lasers de Nd:YAG, orientando trabalhos de mestrado e doutorado.

¹ B. S. Yilbas; "Effects of process parameters on the kerf width during the laser cutting process", Proc. Instr. Mech. Engrs. Vol. 215 part B, pp. 1357-1367 (2001).

² Espalhamento por pluma.

³ E. Emura, J. F. Landgraf, W de Rossi, J. R. Berretta, "The influence of cutting technique on the magnetic properties of electrical steels". Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 254-255 pp 358-360 (2003).

⁴ W. de Rossi, R. Brito, J. R. Berretta, I. A. Almeida, N. D. Vieira Jr., "Microfuração a laser em chapa de aço inoxidável AISI 304", Anais do Primeiro Congresso Brasileiro da Engenharia de Fabricação, pg 1-8 (abril de 2001).