



MICROFURAÇÃO A LASER EM CHAPA DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Wagner de Rossi¹, Roberto de Brito², José Roberto Berretta³, Ivan Alves de Almeida⁴, Nilson Dias Vieira Jr.⁵

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP, Departamento de Materiais Optoeletrônicos

(1) wderossi@net.ipen.br, (2) robbrito@usp.br, (3) berretta@net.ipen.br, (4) ialmeida@net.ipen.br, (5) nilsondv@net.ipen.br - São Paulo, SP, Brasil.

Resumo. O uso de uma Central de Processamento de Materiais a Laser – CPML, construída inteiramente no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, permitiu o desenvolvimento de um método de microfuração via laser para os métodos de pulso único, percussão e trepanação. Neste estudo, foram utilizadas chapas planas de aço inoxidável 304 com espessuras de 0,1 a 2,0 mm, e nelas foram determinados os intervalos de diâmetros mais convenientes para os três métodos. As variáveis de controle, para cada espessura, foram a largura temporal t_p do pulso laser (entre 0,2 e 1,4 ms), a sua energia e intensidade (entre 10 e 40 kW.mm⁻²). Os resultados cosméticos, como função da influência das variáveis de controle, foram os parâmetros relacionados com a capacidade de extração de material, com o diâmetro dos furos, com a sua conicidade, com a sua rugosidade interna, e com a quantidade de respingos na borda de entrada. Furos menores que 20 μ m de diâmetro e furos com razão de aspecto maior que 10 foram obtidos.

Palavras-chave: usinagem a laser, furação, laser de estado sólido.

1. INTRODUÇÃO

Quando um pulso muito curto de luz laser é focalizado em um ponto muito pequeno, qualquer material é vaporizado e/ou fundido quase que instantaneamente. As pressões resultantes dos gases e vapores formados expulsam o material vaporizado e fundido, produzindo um furo no material. As densidades de potência usadas são da ordem de 10^7 a 10^8 W/cm² e o tempo de operação de 10^{-3} a 10^{-5} s. O diâmetro do furo é controlado pela variação da potência do laser e pelo grau de focalização da lente. O máximo diâmetro é limitado pela energia por pulso, enquanto que o comprimento de onda, a óptica de focalização, a qualidade do feixe e o material em si determinam o diâmetro mínimo.

Normalmente, a furação a laser envolve um mecanismo no qual o material é removido tanto na forma de líquido quanto na forma de vapor, sendo que a razão entre eles depende do nível da densidade de potência. Quanto maior for a intensidade, maior será a quantidade de material no estado de vapor. No caso extremo, quando laser chaveado (pulsos de nanosegundo) é usado, a razão líquido-vapor é muito pequena, e uma transformação direta sólido-vapor acontece em quase todo o volume afetado. Contudo, a maioria dos processos a

laser, utilizam pulsos de duração mais longa, onde a razão líquido-vapor é bastante alta. Este método de furação é mais eficiente e a elevação de temperatura quase instantânea somada à pequena quantidade de material que chega à temperatura de vaporização, causam uma expulsão quase que completa do material líquido do furo. Isto é provocado porque a alta pressão gerada quando da expansão do vapor na parte central da área afetada é muito maior que as forças de adesão entre a fase líquida e a parede sólida. O material líquido que não é expelido, é removido por vaporização direta ou permanece como uma fina e tênue película (menos que 50 μm) aderida à parede lateral do furo e é normalmente chamada de material refundido.

A natureza explosiva da expulsão do material fundido causa uma certa conicidade na entrada do furo com uma incontável, mas reprodutiva, variação no diâmetro de furo a furo de $\pm 10\%$. O melhor procedimento para o controle da qualidade de um furo é a indução da sublimação direta do material base por meio do uso de intensidades muito altas (10^8 W/cm^2). Isto leva a um processo de ablação com quantidade reduzida de material fundido resultando em um contorno melhor do furo. A figura 1 mostra esquematicamente uma seção transversal típica de um furo feito a laser.

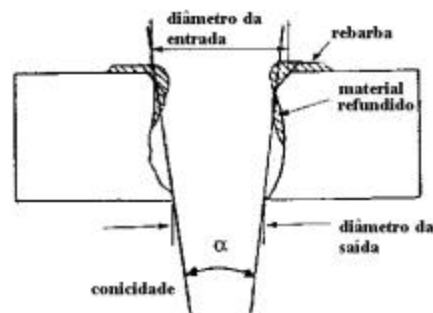


Figura 1- Seção transversal típica de um furo feito a laser

A qualidade de um furo feito a laser é função de interações complexas entre um grande número de variáveis. Estas variáveis dependem de características do material (tipo, espessura e refletividade), do laser (comprimento de onda, energia e largura temporal t_p do pulso, estrutura do modo e taxa de repetição), do gás de assistência (tipo de gás, pressão e desenho do bico) e dependem também do sistema particular de focalização, onde os parâmetros mais importantes são o comprimento focal e a posição do foco.

As influências dos parâmetros do laser sobre a qualidade do furo são (Bolin, 1983):

- *Energia do pulso*: A combinação entre energia do pulso, a largura temporal e o diâmetro do foco deve ser suficiente para se atingir o limiar de vaporização. Acima deste nível, um aumento da energia do pulso leva a um aumento da penetração e uma maior profundidade pode ser atingida. Contudo a formação de irregularidades na borda superior é mais evidente com pulsos de energia maior.

- *Largura temporal*: Este parâmetro também está conectado ao mecanismo de remoção de material. Uma vez que o diâmetro esteja fixado, a energia e a largura temporal determinam a intensidade do feixe laser sobre o material. Como um aumento na energia do pulso leva a uma degradação da qualidade do furo, uma diminuição na sua largura temporal também leva a um aumento da intensidade acima do limiar de vaporização, melhorando a qualidade do furo. Assim, a escolha entre maior energia ou menor largura temporal se torna um compromisso entre eficiência e qualidade. Pulsos mais curtos produzem furos de melhor qualidade, mas com menor eficiência, necessitando-se de mais pulsos para a perfuração.

- *Número de Pulsos*: O número de pulsos usados para perfurar um material pode ter uma influência decisiva em sua qualidade. Por exemplo, para furos com razão de aspecto alta, o

melhor resultado é obtido com energia de pulso reduzida e com um acréscimo do número de pulsos necessários para perfurar o material. Por outro lado, furos com baixa razão de aspecto, feitos com apenas um pulso, geralmente exibem uma menor conicidade.

- Comprimento focal da lente: Quanto mais curto for o comprimento focal da lente menor será o diâmetro do furo. Como a profundidade do foco é diretamente proporcional ao comprimento focal, a espessura do material processado fica limitada por este comprimento focal da lente. Para aumentar a profundidade de penetração com a mesma lente, é necessário aumentar a qualidade do feixe, ou seja, diminuir o valor do fator de qualidade M^2 . Um feixe com M^2 menor pode ser focalizado em um diâmetro menor ao longo de uma profundidade maior.

A furação a laser pode ser feita de três maneiras diferentes (Tiffani, 1985):

- 1- *Pulso único* – Um único pulso laser é utilizado para a perfuração do material. O intervalo de diâmetros obtidos varia entre 20 e 250 μm e a razão de aspecto varia entre 2:1 e 6:1. A qualidade do furo e a eficiência do processo depende quase que exclusivamente das características do feixe e, portanto, freqüentemente um laser com modo fundamental é utilizado para este tipo de furação.
- 2- *Percussão* – Este modo de furação utiliza uma série de pulsos laser incidindo em uma mesma área. O diâmetro e a profundidade obtidos dependem da energia e do número de pulsos. Furação por multi-pulsos resulta em furos com qualidade melhorada, quando comparada ao modo de pulso único, além de fornecer a possibilidade de obtenção de furos mais profundos com maior razão de aspecto.
- 3- *Trepanação* – Aqui, o furo é produzido de acordo com um contorno pré-programado, e o feixe laser se movimenta em relação à peça seguindo o contorno de uma circunferência. O processo é o mesmo de um corte a laser, necessitando de uma alta taxa de repetição, um bom controle do modo espacial do feixe laser e um jato de gás de assistência para a remoção do material fundido. Este método oferece três importantes vantagens sobre o modo de percussão (Morato, de Rossi, Wetter, 1999): maior precisão e repetibilidade no diâmetro, maior linearidade das paredes e camada mais fina de material refundido sobre as paredes laterais.

2. OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho foram os de determinar os intervalos ótimos de intensidade do feixe laser para furação por percussão e por trepanação, bem como de se estabelecer os intervalos de diâmetros possíveis com estes processos, relacionando-se os parâmetros do feixe laser com os aspectos cosméticos dos furos obtidos.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA LASER

O trabalho foi realizado utilizando-se uma central de processamento de materiais a laser chamada de “CPML”, a qual é constituída por uma fresadora CNC com um laser acoplado em seu eixo árvore. Neste sistema, o feixe laser é direcionado verticalmente para baixo e focalizado sobre uma superfície plana a qual se movimenta no plano horizontal (x,y). Portanto o movimento vertical (z) é somente utilizado para ajuste de altura da peça e do ponto de focalização do feixe laser. Um sistema CAD-CAM possibilita a execução de qualquer movimento no plano x,y bem como o controle dos parâmetros de processo como velocidade, atuação do gás de processo e parâmetros do laser. Atuando em conjunto com o feixe laser, um jato de gás colinear ao feixe é incidido sobre o ponto focal a uma pressão controlada de até 20 bar. Tal gás serve para a retirada do material fundido da zona de atuação do feixe e para a proteção da lente de focalização. Gases inertes de proteção como N_2 ou Ar, ou reativos, como O_2 podem ser utilizados.

Para a visualização da região afetada, uma câmara CCD foi acoplada colinearmente ao feixe laser, com um sistema óptico de aumento de aproximadamente 60 vezes. Isto permitiu a inspeção tanto do aspecto cosmético do corte como também de medidas dimensionais, sem a retirada da peça.

As lentes de focalização disponíveis são dubletos de alta qualidade óptica, com aberrações controladas e minimizadas, de comprimentos focais de 50 mm e 100 mm. A primeira fornece um diâmetro do ponto focal de aproximadamente 70 μm , enquanto que a segunda fornece um diâmetro de aproximadamente 150 μm . Como a profundidade do campo focal é inversamente proporcional à distância focal da lente, um comprimento focal f de 50 mm é somente utilizado para espessuras menores que 0,5 mm.

O laser utilizado foi desenvolvido pelo grupo de lasers do IPEN, e é de estado sólido de Nd:YAG (*tríum aluminum garnete*), com comprimento de onda de 1,06 μm . É do tipo pulsado, com taxa de repetição controlada, desde pulso único até 500 Hz; energia por pulso de até aproximadamente 10 J e largura temporal variável desde 0,2 ms até 20 ms. A potência média máxima é de 100 W, o que restringe o número de combinações entre taxa de repetição e energia por pulso. A potência pico máxima de saída é limitada a 3 kW, o que também restringe o intervalo de energia em função da largura temporal. O feixe próximo ao espelho de saída apresenta um diâmetro de aproximadamente 6 mm, com perfil multimodo de distribuição de intensidade. A inserção de íris intracavidade reduz o número de modos oscilantes, e uma íris de 1,2 mm de diâmetro pode levar à oscilação do modo fundamental com perfil gaussiano de distribuição de intensidade.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho, uma série de ensaios de furação foram executados tanto pelo método de percussão quanto pelo de trepanação.

Furação por Percussão

Uma característica marcante desse processo de furação é a presença de uma certa conicidade. A adequação dos parâmetros do laser pode diminuir esta conicidade, mas ela sempre estará presente no processo de percussão. Isto acontece devido à natureza explosiva do início do processo, onde uma grande quantidade de material é ejetado para fora da região de atuação do laser. Isto provoca o aparecimento de uma cratera na parte de entrada do furo, que tem um diâmetro consideravelmente maior que o diâmetro do feixe laser. Como é impossível eliminar este fenômeno, o que se faz é minimizar o seu efeito, tornando esta cratera de entrada menor e menos profunda possível. Assim, um furo por percussão pode apresentar uma alta conicidade até cerca de 20% da profundidade total do furo, mas torna-se razoavelmente paralelo para o restante do material. Além disso, como a extração acontece principalmente com material fundido, há um acúmulo de respingos e/ou material refundido na borda de entrada. A figura 2 mostra uma série de furos feitos por percussão, em chapas de aço inox AISI 304 de 2 mm de espessura.

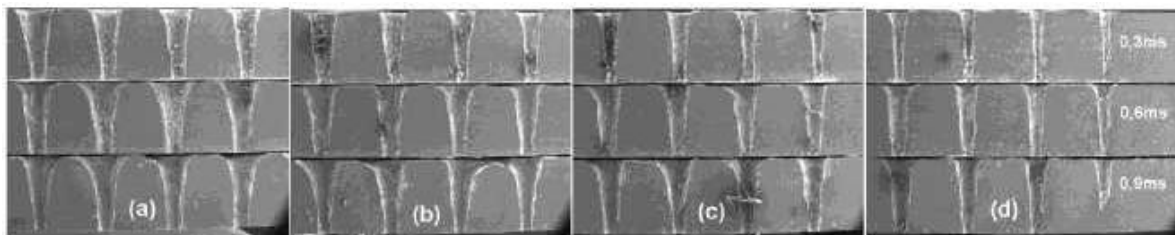


Figura 2 – Furos feitos por percussão, com intensidade do feixe laser diminuindo de “d” para “a”, e largura temporal de 0,3ms, 0,6ms e 0,9ms de cima para baixo respectivamente.

Os resultados mostrados na figura 2 foram obtidos com lente de comprimento focal $f=100\text{mm}$, com a posição do foco coincidente com a superfície da amostra. Três séries foram executadas, com largura temporal do pulso de 0,3 ms, 0,6 ms e 0,9 ms. Para cada largura temporal, foram executados furos com intensidade variável, onde somente a energia do feixe foi modificada. Os resultados mostram uma certa conicidade e um diâmetro crescente com o aumento da intensidade do feixe laser. O gráfico da figura 3 mostra claramente estes efeitos.

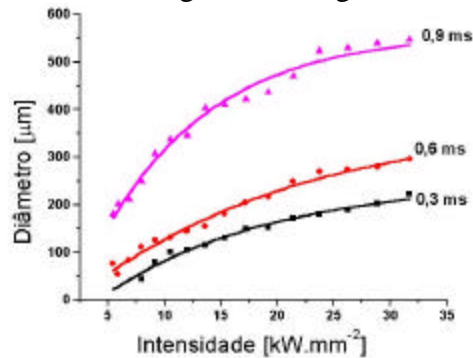


Figura 3 –Diâmetro do furo obtido em função da intensidade do feixe laser.

O fato do diâmetro do furo sempre aumentar com a intensidade do feixe deve-se, em parte, ao aumento do diâmetro e da divergência do feixe com o aumento da potência pico de bombeamento. Isto deve-se ao fato de que quanto maior for o bombeamento no elemento laser, maior será o número de modos oscilantes na cavidade ressonante. Assim, para restringir este aumento do número de modos, foi inserida dentro da cavidade laser uma íris de 4,0mm de diâmetro, que diminuiu a eficiência do sistema, mas levou a um melhor resultado de furação. O gráfico da figura 4 mostra os resultados obtidos desta maneira. Vemos claramente que, excetuando-se a entrada do furo (que tem baixa profundidade), a conicidade tende a ser muito pequena e o diâmetro do furo tende a um valor constante para intensidades acima de 45 Kw.mm^{-2} .

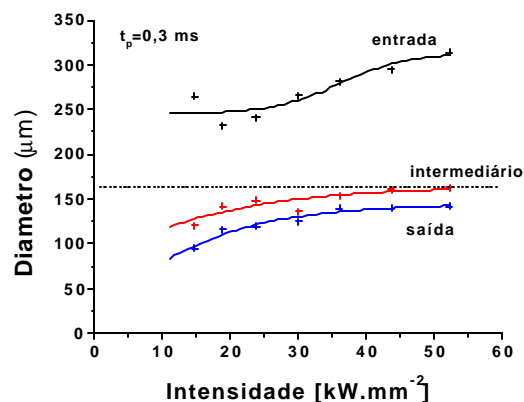


Figura 4 –Variação da conicidade do furo em função da intensidade do feixe laser.

O diâmetro do feixe foi posteriormente restringido por meio da inserção de uma íris de 1,4 mm de diâmetro dentro do ressonador laser. Desta maneira, observou-se a emissão laser do modo fundamental somado a mais um modo não determinado. A energia, neste caso, é demasiadamente reduzida e a capacidade de extração de material não possibilita a furação de

material espesso. Assim, utilizando uma lâmina de aço inoxidável 304 de 0,1 mm de espessura e uma lente de comprimento focal $f=50\text{mm}$, obtivemos uma série de furos com diâmetros que variaram de acordo com a posição do foco do feixe laser em relação à superfície da amostra. O gráfico da figura 5 mostra os resultados, onde se vê que, para a posição do foco sobre a amostra, um diâmetro de $34\ \mu\text{m}$ foi obtido.

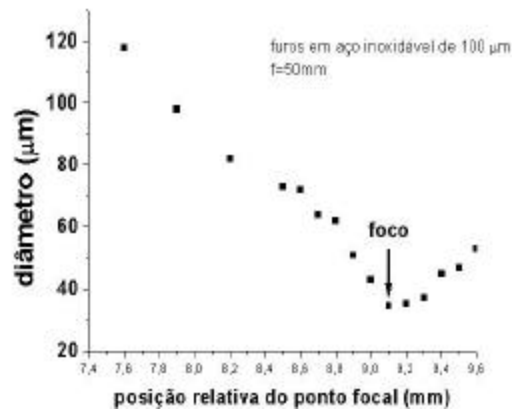


Figura 5 –Variação do diâmetro de furo obtido em função da posição focal.

A diminuição do diâmetro da íris para 1,2 mm possibilitou a oscilação do modo fundamental do laser, e com este feixe foi obtido um furo de $18\ \mu\text{m}$ em uma lâmina de aço 1020 de 0,5 mm de espessura. A figura 6 mostra a entrada e a saída do furo, onde a entrada apresenta um diâmetro de $32\ \mu\text{m}$, porém com baixa profundidade.

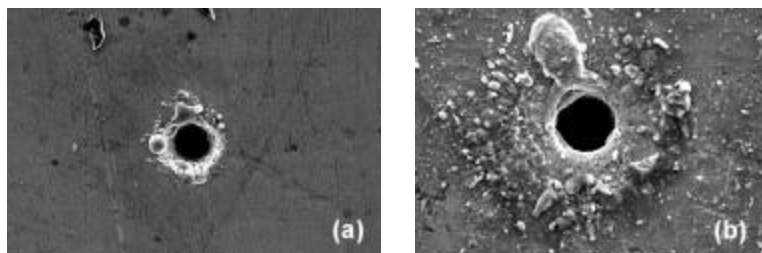


Figura 6 – Entrada (a) e saída (b) de furo feito com feixe laser no modo fundamental (em escalas diferentes).

Furação por trepanação

Para diminuir a conicidade do furo e o material refundido na sua borda de entrada, uma série de experimentos foi realizada com o método de trepanação. Neste caso, o *piercing* (furo que inicia o processo) foi obtido por percussão para, em seguida, o feixe desenvolver uma excursão circular, como no caso de um corte. Uma série de experimentos foram feitos para se verificar a influência do *piercing* na borda do furo, e os resultados mostraram que não houve influência apreciável neste sentido. Obviamente, para que o diâmetro do feixe ficasse menor que o diâmetro do furo desejado, foi necessária a introdução de íris intracavidade. A figura 7 mostra um corte transversal de duas lâminas de aço inoxidável de 1 mm de espessura e a borda de entrada de um destes furos. É notável aqui a diminuição da conicidade e a ausência de respingos e material refundido na borda de entrada.

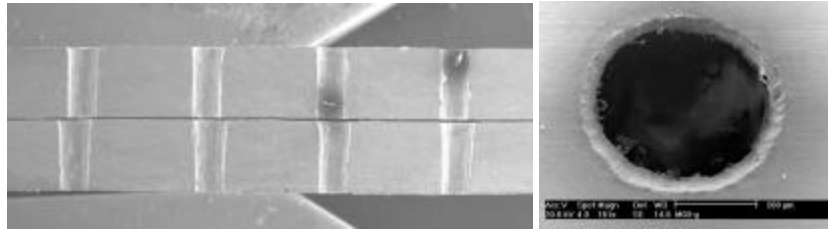


Figura 7 - Corte transversal de duas lâminas de aço inoxidável de 1 mm, mostrando furos feitos por trepanação e o aspecto da borda de entrada de um destes furos.

Para executar o processo de excursão circular foram construídos programas numéricos para circunferências de diâmetros de 300 µm, 450 µm e 570 µm. A figura 8 mostra os gráficos das medições feitas em duas séries de furos com estes diâmetros, nos quais pode-se visualizar a conicidade intrínseca.

As amostras medidas na figura 8a foram construídas com intensidade de 12 kW.mm⁻², largura temporal de pulso de 0,4 ms e feixe com diâmetro de 190 µm. Fica evidente que por conta da baixa potência do feixe, o diâmetro esperado não foi conseguido uma vez que a extração ficou comprometida. Para evidenciar esta proposta, construiu-se outra série de furos nas mesmas condições, modificando-se apenas a intensidade do feixe, como mostra o gráfico da figura 8b. Com o aumento significativo da intensidade do feixe, mantendo as demais condições, observa-se que o diâmetro usinado foi o mesmo que o programado. A conicidade dada pela diferença entre os diâmetros de entrada e de saída tem ângulo de, no máximo, 4° na parede interna.

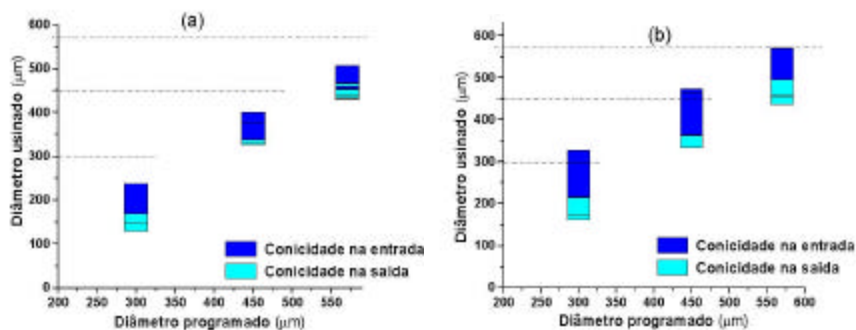


Figura 8 - Furos trepanados com intensidade 12 kW.mm⁻² (a) e com 50 kW.mm⁻² (b).

4. CONCLUSÕES

Os métodos de percussão e trepanação foram estudados e caracterizados para a “CPML” do IPEN. Foi possível a obtenção de furos com boa qualidade cosmética, baixa conicidade, razão de aspecto de até 1:27, e com dimensões controladas de até 18 µm.

REFERÊNCIAS

- Bolin;S. R.,1983, Nd:YAG laser applications survey. In Laser Materials Processing. M. Bass ed. North-Holland Publishing Company, pp. 409-437.
- Morato, S. P., de Rossi, W., Wetter, N. U., 1999, High Level Publication on Industrial Applications of Lasers, ed. UNIDO, Trieste, Italy.

Tiffany W. B., 1985, Drilling, marking and other applications for industrial Nd:YAG lasers. Applications of High Power Lasers, SPIE v. 527, pp. 28-36.

LASER DRILLING OF AISI 304 STAINLESS STEEL SHEET

Abstract. *A prototype of a Laser Material Processing Center – CPML was developed at IPEN. The use of this machine allowed us the development of a laser drilling strategy using single shot, percussion and trepanning methods. Sheets of stainless steel AISI 304 with 0.1 to 2.0 mm of thickness were used and the range of diameters more suitable to each method were obtained. The process variables to each thickness were the temporal width of the laser pulse (from 0,2 to 1,4 ms), its energy and its intensity (from 10 to 40 kW.mm⁻²). Cosmetic hole quality, as function of these parameters, were related to the capacity of material extraction, to hole diameter, to its taper and wall quality, and to surface debris. Hole diameter less than 20 mm and length-diameter ratio > 10 has been currently drilled*

Keywords: *laser machining, laser drilling, solid state laser.*