

MICROFURAÇÃO EM AÇO INOX, POR LASER Nd:YAG

Roberto de Brito; W. de Rossi; N. D. Vieira Jr.

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares,
Departamento ME - Materiais OptoEletrônicos,
Caixa Postal 11.049, CEP 05.422-970, São Paulo, SP.

Fone 0xx11-3816-9307 / Fax 0xx11-3816-9315

robbrito@usp.br, wderossi@net.ipen.br, nilsondv@net.ipen.br

Resumo – Este artigo descreve o desenvolvimento de dois métodos para furação de chapas de aço inox AISI 304 por Laser Nd:Yag pulsado em *free running*. O primeiro é por pulso único e o segundo por percussão. Contém os dados referentes aos parâmetros ótimos dentro de uma região de contorno definida para tal processo, bem como resultados qualitativos cosméticos obtidos. O ensaio por pulso único é conhecido como *Laser Single Shot* e foi utilizado para determinar a eficiência de extração de metal fundido, podendo também realizar perfuração mais rapidamente por pulsos de energia elevada. Para situar a aplicabilidade [1] do processo de percussão temos a formação de galerias de resfriamento em turbinas para indústria aeronáutica, bicos injetores para combustível e matrizes para injetor de tinta em impressoras. Para materiais avançados, estas aplicações não tem concorrentes diretos entre os processos tradicionais como por freza ou broca, podendo ser comparados aos processos de ataque eletroquímico ou feixe de elétrons quanto a sua confiabilidade, sendo no entanto muito menos produtivos, portanto mais onerosos. Atualmente o Nd:Yag é o Laser de estado sólido [2] mais utilizados no mundo.

Palavras-chave: Laser Nd:Yag, Laser pulsado, Usinagem em inox, Microfuração.

Abstract – This paper presents the development of the methods Laser Single Shot and percussion, for the free running pulsed Nd:Yag laser, making microdrilling holes in AISI 304 stainless steel sheet. It shows the optimum data for the Laser parameters confined within a cluster region configuration, as well as the achieved qualitative cosmetic results. The Laser Single Shot process with Nd:Yag laser is suited to evaluation of the erosion performance of high power laser beam, as well as to perform blind holes. On the other hand, the percussion laser process is suited to drill a broad range of material kinds (100) like metal sheets, ceramics and composites with high reliability and low cost, in order to enhance the quality profile. Since 1970's the turbine planes, fuel pump valves and cups for auto industries, and matrix for ink jet printers too are made including processing by Nd:Yag pulsed laser. Nowadays, the Nd:Yag lasers are the most solid state laser employed worldwide.

Key-words: Nd:Yag laser, Pulsed laser, Stainless steel machining, Microdrilling.

INTRODUÇÃO

Este trabalho é resultado das pesquisas sobre o desempenho quantitativo e qualitativo do processamento de metais de alta refletividade, realizados na CPML. A Central de Processamento de Materiais por Laser é uma iniciativa do Departamento de Materiais OptoEletrônicos do Ipen, com projeto desenvolvido pelo grupo e com tecnologia nacional.

A peça fundamental da CPML é uma fresadora de quatro eixos controlados por CNC, na qual o eixo árvore que seria o quinto, foi substituído por um módulo *Laser* pulsado Nd:Yag, com potência pico 3kW e potência média até 100W.

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo a otimização de parâmetros relacionados ao feixe *Laser* utilizado, no sentido de conseguir estabelecer valores ótimos para realização de microfuração com grau definido de excelência, servindo como referência em trabalhos que serão posteriormente realizados no Instituto, com vistas ao aprofundamento do tema.

A definição destes graus de excelência é um requisito intrínseco de cada processo e de sua destinação. Existem itens relacionados com a precisão dimensional, ovalização e conicidade; itens cosméticos dados pelas relações de excelência com acabamento cosmético, ocorrência de respingos e material ressolidificado na borda, rugosidade, além de itens facilmente quantificáveis como a capacidade de perfazer um furo com certa intensidade do feixe para a uma dada bitola de chapa, ou mesmo a necessidade de filtro para uma furo extremamente fino. Buscamos enfatizar aqui a importância da variação da largura de pulso sobre o tipo de processo e sobre a espessura de chapa mais conveniente. Outra forma de estabelecer critérios de escolha da intensidade para cada processo bem como o seu reflexo no resultado cosmético final.

METODOLOGIA

Neste trabalho, estudamos a irradiação *Laser* no comprimento de onda $1,064\mu\text{m}$, controlada para pulsos com energia variando desde 100mJ até 4,0J enquanto que a largura de pulso estudada ficou entre 0,20 e 1,40ms. Foram utilizadas chapas com espessura de 0,20 até 2,00mm. Como gás de proteção superficial de assistência foi utilizado oxigênio a uma pressão de 6bar. A distância focal da lente é 100mm e a distância entre o bico e a superfície de trabalho ficou em 0,6mm. Trabalhamos com feixe cujo foco tem diâmetro $300\mu\text{m}$.

O parâmetro fundamental do estudo foi a intensidade do feixe, dada pela densidade de potência contida no mesmo, por uma relação entre a potência do feixe e a área iluminada no ponto de trabalho. A figura 1 apresenta o gráfico obtido da intensidade do feixe *versus* energia unitária obtida no ponto de trabalho.

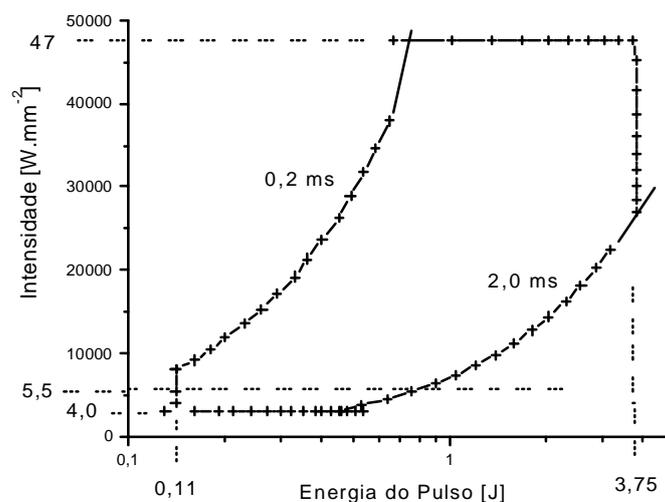


Figura 1 – Condições de contorno relacionando energia e intensidade.

Para decompor o valor aritmético da potência pico P_p do feixe, usamos a equação (1), supondo um pulso plano, com valor de potência constante.

$$P_p = \frac{E}{\tau_p} \quad (1)$$

onde E é a energia unitária
 τ_p é a largura temporal do pulso

A potência do feixe pode ser obtida pela sua relação com a energia unitária. Por “energia unitária” queremos dizer a “energia contida num único pulso” *Laser*. Como mencionado acima, a intensidade I é a relação da potência pico por unidade de área, assim equacionada

$$I = \frac{P_p}{S} \quad (2)$$

onde P_p é a potência pico do feixe
 S é a seção ou área iluminada pelo feixe

Substituindo a equação (1) na equação (2) temos que

$$I = \frac{E}{S \cdot \tau_p} \quad (3)$$

A variação do diâmetro do feixe, recurso que filtra componentes de ordem superior do modo TEM do feixe, se deu por conta da inserção de uma íris com orifício central, dentro do ressonador, que ao obstruir o feixe na borda mantém aproximadamente invariante a intensidade do mesmo. Detalhe importante é que ao restringir as componentes de ordem superior, seu brilho é intensificado, mas não de maneira significativa. Tomando como referência um feixe bombeado em *free running* com diâmetro do bastão 6,3mm e dado que a área iluminada (no ponto focal) é proporcional ao quadrado do raio, temos que a potência e a energia contida em cada pulso varia com a área iluminada. Apresentamos na equação (4) uma relação de potência do feixe como função do raio.

$$P_{(R)} = \left(\frac{R}{W_0} \right)^2 \cdot P_{(\infty)} \quad (4)$$

onde $P_{(R)}$ é a potência parcial como função do raio do feixe constrito
 R é o raio do filtro (ou do feixe filtrado)
 W_0 é o raio do feixe *free running*
 $P_{(\infty)}$ é a potência do feixe amplificado em *free running*

A equação acima utiliza a dimensão W_0 que é a dimensão do raio do feixe dentro do bastão que o amplifica, adequada ao raciocínio utilizado.

I. Pulso único. Foi realizado um processo utilizando pulso único (LSS - *laser single shot*) para determinar a eficiência de extração de metal fundido e para constatar a relação da energia singular com a profundidade da raiz de um furo cego, também denominado cratera, sobre chapa de espessura 2mm. A grade de parâmetros com diâmetro iluminado de 300 μ m foi especificada numa excursão de intensidades entre 10,5 e 25kW.mm⁻² colocados na primeira coluna da tabela 1 para cada um dos valores de largura de pulso 0,2 até 1,8ms apresentados na primeira linha, nas células intermediárias temos a energia para cada pulso contida no feixe focado num diâmetro 300 μ m. O campo amostral foi de quatro crateras para cada grupo de parâmetros. Para os valores de energia **E** assinalados com **X** não houve apreciação satisfatória dos resultados.

Tabela 1 – Grade de parâmetros para o processo LSS.

E	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
10,5	X	0,30	0,44	0,59	X	0,89	1,04	1,18	X
14,4	X	0,41	0,62	0,82	X	1,24	1,43	X	X
19,2	0,27	0,54	X	10,9	1,36	X	1,90	2,18	2,49
24,9	0,35	0,70	X	1,41	1,76	X	2,46	2,82	3,17

Tendo este procedimento, com parâmetros variantes a intensidade **I** e a duração temporal τ_p , demonstrando resultados bastante significativos, pela análise do comportamento variante da profundidade com relação à energia do pulso, buscamos aprofundar as análises apenas para as intensidades de 19 e 25kW.mm⁻², por meio de outra série de experimentos, desta vez tendo como campo amostral dezesseis leituras para cada grupo de parâmetros, e seguindo as larguras de pulso conforme a tabela 1.

II. Percussão. Um processo de percussão, realizado em chapas de espessura 1mm e 200 μ m, permitiu estudar o efeito da variação da potência de bombeamento, sobre o comportamento de dois parâmetros com valores fixos, largura de pulso e diâmetro do feixe, e determinando tal influência na qualidade cosimétrica [3] dos itens conicidade e diâmetro médio. A conicidade é um fenômeno intrínseco na furação por laser envolvendo fusão pelo fato de que, a expulsão de vapor metálico indo de encontro ao feixe provoca espalhamento [4] diminuindo a sua eficiência com o avanço da profundidade, bem como o depósito de metal fundido [5] na parede lateral do furo. Isto torna o raio na entrada do furo maior que na saída. A conicidade e o diâmetro foram estudados de forma estatística para um feixe de diâmetro 300 μ m.

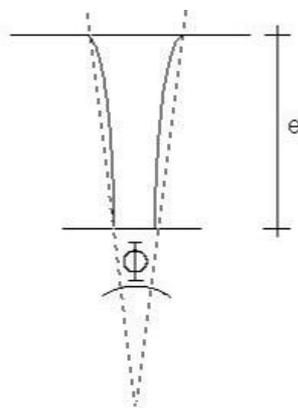


Figura 2 – Método para cálculo da conicidade.

De acordo com a ilustração da figura 2, sendo e a espessura da chapa e Φ o ângulo de conicidade, a mesma pode ser calculada por meio da equação (5).

$$\Phi = 2 \operatorname{atg} \left(\frac{R_e - R_s}{e} \right) \quad (5)$$

onde R_e é o raio do furo na entrada
 R_s é o raio do furo na saída

Durante a execução do processo, antes que haja perfuração, parte do metal fundido expelido se deposita na borda na forma de material ressolidificado próximo à entrada do furo e mais distante na forma de respingos, que foram estudados apenas de forma ilustrativa.

Foi concebida uma malha de furação conforme os valores de intensidade anotados na tabela 2, para larguras de pulso 0,3ms / 0,6ms / 0,9ms tendo na primeira coluna os valores de largura temporal de pulso e na linha superior a intensidade, que permitiram um levantamento a respeito de um provável conjunto ótimo de parâmetros a serem recomendados para se proceder a perfuração de chapas de aço inox, levando em consideração as características intrínsecas do *Laser* Nd:Yag, a configuração do equipamento utilizado e também as propriedades do aço inox AISI 304.

Tabela 2 – Grade de intensidades para o processo com percussão.

I	5,43	5,85	6,85	7,96	9,18	10,5	11,9	13,6
-----	------	------	------	------	------	------	------	------

I	15,3	17,2	19,2	21,4	23,7	26,2	28,9	31,7
-----	------	------	------	------	------	------	------	------

O grupo de parâmetros para largura de pulso 0,3ms para as três intensidades menores não foram suficientes para perfurar a chapa de espessura 1mm. Como os resultados apresentados fossem altamente significativos, e tendo em vista o conteúdo bibliográfico, passamos às considerações de ordem analítica feitas em seguida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como pode ser observado na figura 1, a CPML nesta configuração tem capacidade para até $47\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, mas como os experimentos com LSS têm pulsos de duração elevada, isto implica em energia elevada, o que acumularia *stress* aos elementos do trem ótico. Para prevenir algum incidente foi tomada a precaução de limitar a intensidade do feixe ao máximo de $25\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, já que os resultados nesta faixa de trabalho se demonstraram bastante satisfatórios. Com os valores da tabela 1, os ensaios com LSS formaram um mapa de profundidades médias registradas que são apresentadas no gráfico da figura 3.

Do gráfico da figura 3 vemos que com o aumento da intensidade sempre ocorreu um aumento da profundidade dos furos. Por esta observação deduzimos que não foi atingida a intensidade crítica, a partir da qual começa haver uma diminuição da eficiência de extração de material. A esta intensidade corresponde à região térmica onde a ênfase pela extração líquida declina incrementando a extração vaporizada. A inclinação das curvas para diferentes intensidades, denota uma certa saturação na região de $25\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, sendo portanto um indício de que a intensidade crítica está próxima deste valor.

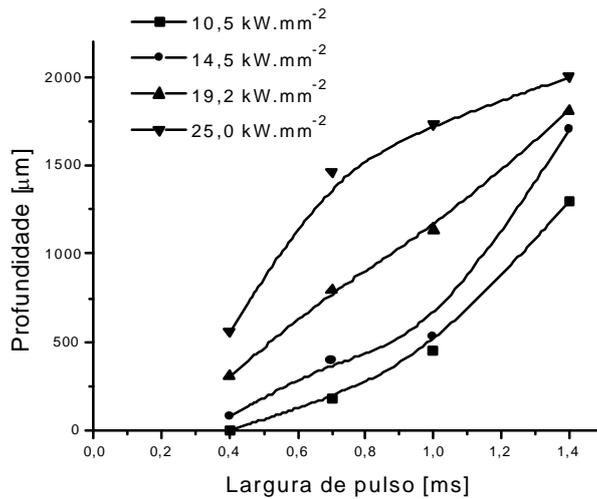


Figura 3 – Gráfico das medições no experimento preliminar.

Na segunda parte, a depuração conseguida por meio do campo amostral para as intensidades 19,2 e 25kW.mm⁻² apresentaram leituras de profundidade média que formam o gráfico da figura 4. Ficou então evidente que a inflexão das curvas da figura 3 segue a proporcionalidade da eficiência do feixe *Laser*, deslocando o degrau com a intensidade.

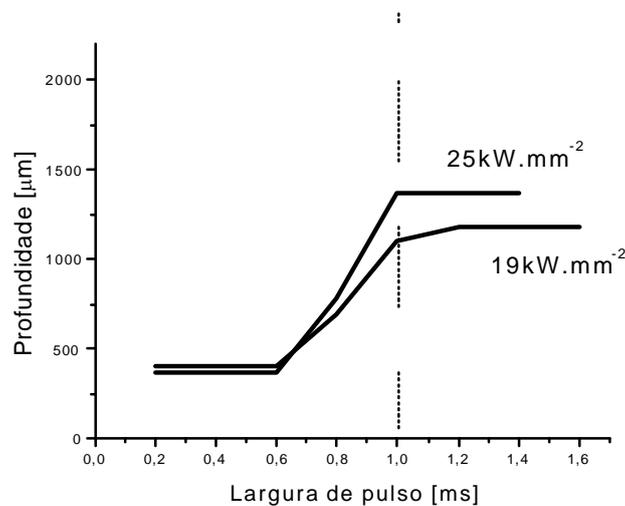


Figura 4 – Gráfico das medições na fase de depuração.

Ficou por este método demonstrada a validade dos pressupostos, apontando para um incremento acentuado na eficiência, quando há uma mudança no padrão de extração predominantemente vaporizada para extração predominantemente líquida. Isto ocorre num limiar de duração temporal do pulso na região de 1,0ms [6]. Acontece que para pulsos mais curtos este limiar é caracterizado mais facilmente pois é possível extrair a mesma quantidade de material com menor energia [7] trabalhando com pulsos mais curtos, o equivalente para pulsos de maior densidade de potência conforme pode ser constatado quando se aumenta o campo amostral para dezesseis crateras para cada grupo de parâmetros.

A figura 5 apresenta uma micrografia obtida da cratera seccionada por desbaste lateral em politriz. A profundidade é de 1760 μm , o diâmetro de 320 μm , a intensidade 19kW.mm⁻², energia em torno de 1J por pulso de largura temporal 1,4ms. Nela podemos observar a rugosidade na parede, a orientação irregular da cratera formando um perfil sinuoso, e apresentando um rechupe na raiz. Este rechupe é ocasionado pelo elevado gradiente de temperatura que provoca um efeito punção na região iluminada, acompanhado de forças de retração nas suas imediações pelo avanço da onda de calor e das ondas de choque [8] [9] [10]. Como uma das características do processamento por *Laser* é a reduzida HAZ (*heat affected zone* - região afetada pelo calor) a imediata condução de calor favorecida pelo elevado coeficiente de difusividade térmica dos metais provoca um resfriamento brusco, pelo qual as forças de retração dão surgimento a falhas estruturais que aparecem na forma de trincas para pulsos de energia elevada.

Assim vemos que para a faixa de parâmetros oferecidos pela CPML, o método de pulso único não é adequado para a obtenção de furos com bom acabamento. Entretanto, é amplamente conhecido que o LSS oferece precários coeficientes de confiabilidade estatística para investigação.



Figura 5 – Micrografia da seção da cratera feita por LSS.

Por este motivo, a qualidade cosmiética produzida pelo feixe *Laser* tem a preferência do processamento por percussão, no qual um número elevado de pulsos de baixa energia extrai a mesma mesma quantidade de material de forma bem mais dócil.

Uma vez que a ênfase do trabalho foi aprimorar os aspectos qualitativos da furação por *Laser*, pudemos verificar uma drástica mudança no perfil dos furos seccionados por desbaste lateral que apresentamos na micrografia da figura 6.



Figura 6 – Micrografia da seção de um furo obtido por percussão.

Podemos notar no perfil apresentado que a seção é isenta de rugosidade, não apresenta trincas, a orientação tem melhor definição no sentido perpendicular à superfície e apresenta respingos na borda de entrada num raio de aproximadamente $600\mu\text{m}$.

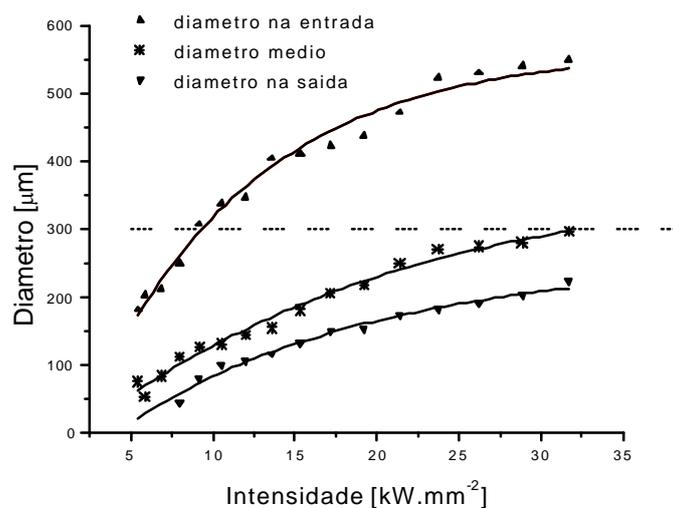


Figura 7 – Gráfico das medições do diâmetro médio.

O diâmetro medido é de $140\mu\text{m}$, e foi obtido para um feixe com diâmetro $300\mu\text{m}$, a uma intensidade $13,6\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, energia 290mJ por pulso com duração temporal $300\mu\text{s}$.

Com relação ao diâmetro médio podemos afirmar que na medida em que a intensidade do feixe aumenta, sua medida se aproxima do diâmetro do feixe demonstrando que aumenta também a eficiência conforme pode ser observado na figura 7.

Estas curvas foram levantadas por medições realizadas das amostras construídas por percussão para intensidade variando de $5,43$ até $31,7\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ para largura temporal $0,3\text{ms}$.

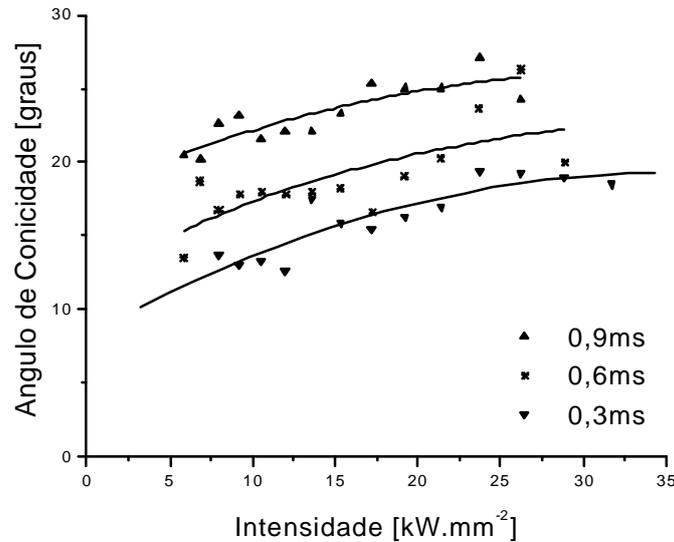


Figura 8 – Gráfico das medições da conicidade.

Uma série de medições revelou pelo uso da equação (5), uma diminuição progressiva da conicidade verificada pela diminuição da largura de pulso. Outra constatação pode ser feita pela linha tracejada indicando o diâmetro do feixe. O gráfico da figura 8 mostra uma evolução qualitativa do processo.

CONCLUSÕES

Foram necessários aprimoramentos das técnicas de ajuste do feixe que excederiam o espaço destinado para uma discussão neste texto, mas que resumidamente foram a filtragem espacial, o estabelecimento de janelas de tempo de exposição por meio de variáveis estocásticas (variáveis cujos comportamentos não podem ser determinados por meio de cálculos ou de estudos teóricos das propriedades físicas do material) além da avaliação do rendimento do módulo em termos de energia bombeada *versus* energia entregue no ponto de trabalho. Estes ensaios foram de grande utilidade embora sua discussão pertença a outro domínio, requerendo tratamento adequado.

Com relação ao processo propriamente dito, pudemos verificar que para ensaio com LSS facilmente uma chapa de espessura 1mm pode ser perfurada para larguras de pulso acima de 1ms. No caso de furo cego a incerteza estatística desaconselha tal processo para chapas menores que 2mm. Além disso, resíduos depositados nas bordas de entrada são uma constante para LSS.

Utilizando percussão é possível controlar um dado número aproximada de pulsos, ou em outras palavras o tempo de exposição do feixe sobre o processo. Observamos que existe um número de pulsos mínimo que pode variar de 100 a 300, para que se consiga perfuração e que também deve ser observado um número máximo para além do qual o calor acumulado na poça líquida acaba por permitir excesso de ressolidificado nas bordas de entrada e de saída podendo ocasionar obstrução do furo.

Foi possível verificar que dadas as condições de trabalho apresentadas é recomendável fazer perfuração com excelentes resultados em chapas de espessura até 1mm.

Resumindo, nos processos utilizando *Laser*, é possível provocar uma melhoria notável com mínima demanda por investimentos, bastando apenas um estudo das características do módulo, e manipulando a intensidade e a largura de pulso do feixe.

REFERÊNCIAS

- [¹]TIFFANY, WILLIAM B.; Drilling, Marking and other Applications for Industrial Nd:Yag Lasers; Spie-Applications of High Power Lasers, 1985.
- [²]SILFVAST, WILLIAM T.; Laser Fundamentals; Cambridge University Press; 1996.
- [³] YILBAS, BEKIR S.; Parametric Study to Improve Laser Hole Drilling Process; Journal of Materials Processing Technology, 1997.
- [⁴]LAUBANE, C.; BALDIS, H.A.; BAUER, B.S.; SCHIFANO, E.; COHEN, B.I.; Spatial and Temporal Coexistence of Stimulated Scattering Processes under Crossed-Laser-Beam Irradiation; Physical Review Letters, v.82, n.18, pp.3613-3616; 3 may 1999.
- [⁵] YEO, C.Y.; TAM, S.C.; JANA, S. & LAU, MICHAEL W.S.; A Technical Review of the Laser Drilling of Aerospace Materials; Journal of Materials Processing Technology, 1994.
- [⁶] BASU, S. & DEBROY, T.; Liquid Metal Expulsion During Laser Irradiation; American Institute of Physics, 1992.
- [⁷]BOSTANJOGLO, G.; SARADY, I.; BECK, Th. & WEBER, H.; Processing of Ni-based Aero Engine Components with Repetitively Q-switched Nd:Yag-Lasers; Spie, 1996.
- [⁸]PROKHOROV, A.M.; KONOV, V.I.; URSU, I.; MIHAILESCU, I.N.; Laser Heating of Metals; IOP Publishing Ltd., 1990.
- [⁹]MURRAY, TODD W. & WAGNER, JAMES W.; Laser generation of Acoustic waves in the ablative regime; Journal Applied Physics, 85, n.4, p.2031-2040; 1999.
- [¹⁰]PEYRE, P.; BERTHE, L.; SCHERPEREEL, X.; FABBRO, R. & BARTNICKI, E.; Experimental Study of Laser-driven shock waves in stainless steel; Journal Applied Physics, v.84, n.11, p.5985-5992; 1998.