

## **CARACTERIZAÇÃO DO METAL DE SOLDA DO AÇO API 5LX GRAU70 SOLDADO COM LASER PULSADO Nd:YAG**

Vicente Afonso Ventrella, ventrella@dem.feis.unesp.br<sup>1</sup>

José Roberto Berretta, berretta@ipen.br<sup>2</sup>

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNESP Departamento de Engenharia Mecânica, Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil Centro 56, CEP 15385-000, Ilha Solteira – SP, Brasil.

<sup>2</sup>IPEN Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Centro de Lasers e Aplicações, Av. Prof. Lineu Prestes 2.242, Cidade Universitária, CEP 05508-000, São Paulo – SP, Brasil.

**Resumo:** *O laser é uma ferramenta flexível e poderosa com muitas aplicações relevantes na indústria, principalmente na área de soldagem. Seu uso está se difundindo cada vez mais como consequência do desenvolvimento de sistemas laser modernos, com maior confiabilidade e menor custo. Os lasers de hoje fornecem à indústria de soldagem soluções técnicas a muitos problemas, e além de substituírem a soldagem convencional já estabelecida, ainda apresentam maior produtividade. Sua habilidade vem de suas características únicas de versatilidade, confiabilidade, velocidade e automação, tudo com flexibilidade e alta precisão. Além disso, as juntas soldadas por laser apresentam uma zona afetada pelo calor extremamente reduzida e mínima distorção do metal base. O presente trabalho estudou a aplicação de laser pulsado na soldagem do aço API 5L Grau 70, empregado na indústria de petróleo e gás natural, analisando-se a influência dos parâmetros-largura temporal do pulso e profundidade de foco do feixe laser, nas características geométricas do cordão de solda. Todas as soldas foram obtidas com energia do pulso igual a 6,0 Joules, a largura temporal utilizada foi de 4, 6, 8 e 10 ms, e as profundidades de foco utilizada foi de 1,0; 1,5 e 2,0 mm abaixo da superfície da peça. Os resultados mostraram que tanto a microestrutura quanto a geometria do cordão de solda variou mais em relação à largura temporal do que em função da posição do foco do feixe de laser.*

**Palavras-chave:** soldagem laser, Nd:YAG, aço API X70, microestrutura.

### **1. INTRODUÇÃO**

O uso do laser na indústria moderna vem crescendo rapidamente, pois o laser é uma ferramenta poderosa em muitas áreas, como a da soldagem. As propriedades da coerência espacial e a alta radiança da luz laser são as bases de suas vantagens sobre métodos tradicionais de processamento de materiais (Gillner et al.,2005). A coerência espacial permite a focalização da luz em um ponto muito pequeno, fornecendo uma densidade de radiação localizada e extremamente alta. Através do controle da carga térmica fornecida a um dado material, podemos obter praticamente qualquer regime dependente do tempo na área afetada. Isto dá ao laser uma incrível versatilidade em tantas aplicações distintas. Comparando o laser com tecnologias clássicas, o mesmo ainda vem sendo utilizado em lotes de peças pequeno, embora tem se observado um aumento na demanda por produtos de diferentes matérias e geometrias (Íon,2005; Steen,2005; Duley,1999).

Na fabricação de tubos há necessidade de uso de aços de alta resistência mecânica à tração, como por exemplo, os aços da série API 5L – X70 ( limite de escoamento mínimo de 480 MPa ). Especificações internacionais requerem elevadas propriedades de impacto para este aço e, naturalmente, também para as suas juntas soldadas ( o metal de solda deve absorver 56 J a –20 °C e 40 J a –25 °C ). Estas exigências refletem não apenas a necessidade dos aços e das juntas soldadas possuírem uma temperatura de transição a mais baixa possível (característica essencial para usos em regiões frias), mas também um elevado patamar superior de energia de impacto, particularmente em gasodutos cujas elevadas tensões de serviço podem contribuir para a ocorrência de falha no modo dúctil de propagação de trincas (Kirkwood et all, 1996; API, 1995).

Os aços API, com características de elevada resistência, aliada a boa soldabilidade, baixo nível de inclusões e boa qualidade superficial, são especificados pela American Petroleum Institute, no caso a API 5L (API Specification, 1995). De acordo com as exigências dos tubos, as qualidades API-5L-A e B são usadas em tubulações de baixa pressão, enquanto que as API-5L-X42, X46, X52, X60 e X70 são utilizadas em tubulações de alta pressão.

O principal guia para a soldagem de tubulações é a norma API 1104 , a qual fornece dados necessários à obtenção de juntas soldadas com boas qualidades. As juntas em tubulações são soldadas no campo e somente do lado externo. Como o tubo é fixo, a soldagem deve ser realizada em todas as posições. O tipo de eletrodo revestido geralmente

utilizado na soldagem de tubulações é o AWS EXX10, pois possui elevada penetração e pode ser utilizado em todas as posições. Nos dias atuais o eletrodo revestido celulósico começa a ser substituído pelo processo automático com arame tubular. Isso vem acontecendo muito lentamente, pois a indústria de soldagem de tubulações é muito conservadora (Kirkwood, 1996; Widgery, 1999).

Até hoje a terminologia dos diversos constituintes presentes em metais de solda dos aços baixa liga, no caso os aços API, não está totalmente padronizada. A terminologia adotada pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW/IIS), baseada fundamentalmente em observações feitas com microscopia ótica e na relação constituinte-tenacidade ainda é a mais utilizada, onde os microconstituintes são definidos como segue (Dolby, 1986).

- a) Ferrita Primária de Contorno de Grão - PF(G)
- b) Ferrita Poligonal Intragranular - PF(I)
- c) Ferrita Acicular - AF
- d) Ferrita com Segunda Fase Alinhada - FS(A)
- e) Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada - FS(NA)
- f) Agregado Ferrita-Carboneto - FC
- g) Martensita - M

Enquanto as vantagens do uso do laser vêm se disseminando rapidamente em vários segmentos da indústria, a soldagem, de aços API para tubulações, tem se mostrado uma indústria conservadora, adaptando-se muito lentamente a novos processos. Parece que esta situação está começando a mudar, visto que a soldagem semi-automática com arames tubular vem substituindo o eletrodo revestido na indústria naval, justamente em função de sua baixa susceptibilidade à falta de fusão.

No presente trabalho foi realizada uma análise sobre o uso do laser de Nd:YAG, no modo pulsado, em soldagem de chapas de aço API X-70, com 1,0 mm de espessura. Foi estudado o efeito da largura temporal do pulso de soldagem e da profundidade de foco do feixe laser, nas características do cordão de solda, buscando a obtenção de um cordão livre de defeitos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho de pesquisa foi realizado utilizando um sistema laser de Nd:YAG na condição pulsado, cujo arranjo experimental é mostrado na Fig. (1).

O metal base utilizado neste estudo foi o aço API 5LX Grau70, na forma de chapas com 1,0 mm de espessura. As amostras foram cortadas na dimensão 25 mm x 75 mm. A composição química do metal base é mostrada na Tab. (1). Os resultados experimentais foram analisados com base na relação entre largura temporal do pulso, profundidade de foco, geometria do cordão de solda, microestrutura e presença de discontinuidades. As amostras foram preparadas e limpas para garantir a mesma condição superficial das chapas e um acabamento homogêneo.

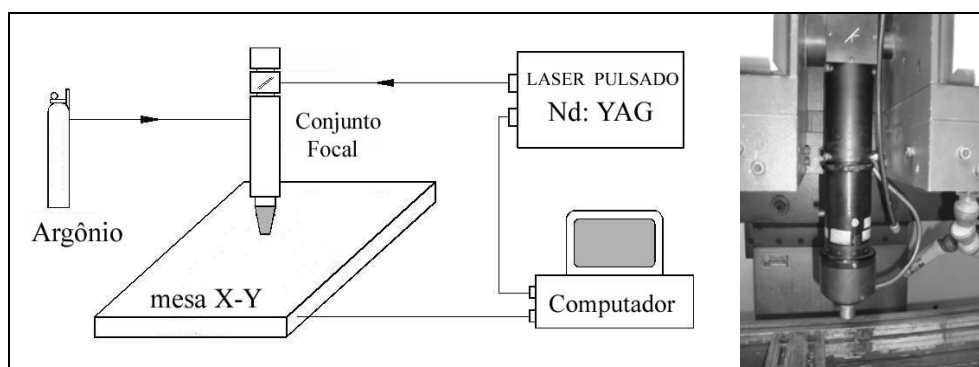


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de soldagem por laser pulsado de Nd:YAG

Tabela 1. Composição química analisada (% em peso) e carbono equivalente (CE) do aço API 5L X-70.

Elem.	C	Mn	P	S	V	Nb	Al	CE
Teor %	0,117	1,49	0,018	0,006	0,020	0,017	0,014	0,37

Para avaliar a influência da largura temporal do pulso e da posição do foco do feixe laser nas características do cordão de solda, as soldas foram realizadas na condição “bead on plate”. As soldagens foram realizadas com feixe de diâmetro de 0,2 mm, ângulo de 90°, taxa de repetição de 9 Hz e velocidade de soldagem de 150 mm/min.. A energia do

pulso ( $E_p$ ) foi fixa em 6,0 J, com largura temporal ( $L_t$ ) de 4, 6, 8 10 ms. A profundidade de foco analisada foi de 1,0; 1,5 e 2,0 mm abaixo da superfície da peça, resultando em fluência de  $8,6.10^3 \text{ J.cm}^{-2}$ ,  $13,6.10^3 \text{ J.cm}^{-2}$  e  $24,0.10^3 \text{ J.cm}^{-2}$ , respectivamente. As amostras foram soldadas em uma atmosfera de gás argônio utilizando-se um fluxo de 12 l/min. Após a soldagem as amostras foram cortadas e preparadas para análise metalográfica da secção transversal do cordão de solda, através de lixamento e polimento das amostras. A revelação da estrutura do cordão foi através de ataque com reagente Nital 2%. As medidas do cordão de solda foram realizadas através de um microscópio ótico e um software de análise de imagem. A Figura (2) mostra uma vista superior e uma secção transversal do cordão de solda com os parâmetros geométricos analisados.

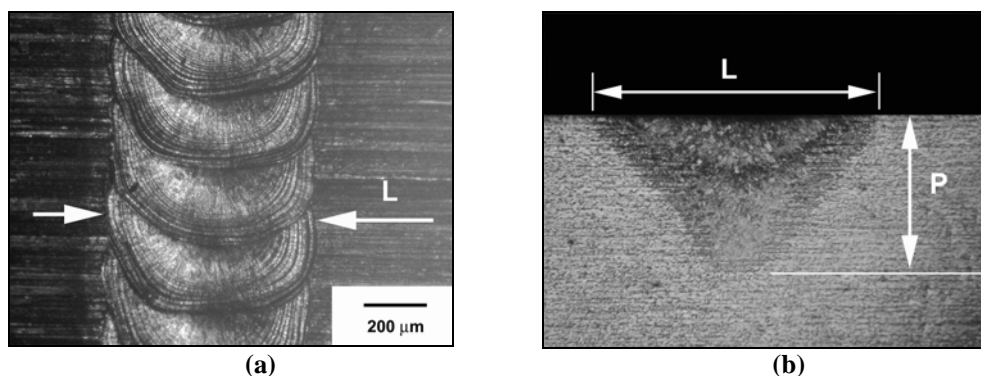


Figura 2. Vista superior (a) e secção transversal (b) do cordão de solda obtido por laser pulsado de Nd:YAG. L=largura do cordão, P=profundidade do cordão.

### 3. RESULTADOS

A geometria do cordão de solda está diretamente relacionada com os parâmetros envolvidos no processo de soldagem a laser pulsado, tais como a largura temporal ( $L_t$ ) e a posição do foco ( $f$ ) do feixe laser em relação à superfície do metal base. A Figura (3) mostra a variação da largura do cordão de solda em função da largura temporal para três posições de foco do feixe laser, isto é, à 2; 1,5 e 1 mm abaixo da superfície do metal base. Observa-se através da Fig.(3) que com o aumento da largura temporal de 4 ms para 6 ms gerou um aumento da largura do cordão de solda e, posterior estabilização entre 6ms e 8ms. Aumentando-se novamente a largura temporal de 8ms para 10ms a largura do cordão sofreu uma redução significativa. Em relação à profundidade do cordão, Fig.(4), observou-se que a redução da largura temporal do feixe gerou um aumento significativo na profundidade do cordão de solda. Essas variações na dimensão do cordão de solda podem ser bem entendidas através das macrografias mostrada na Fig.(5), Fig.(6) e Fig.(7).

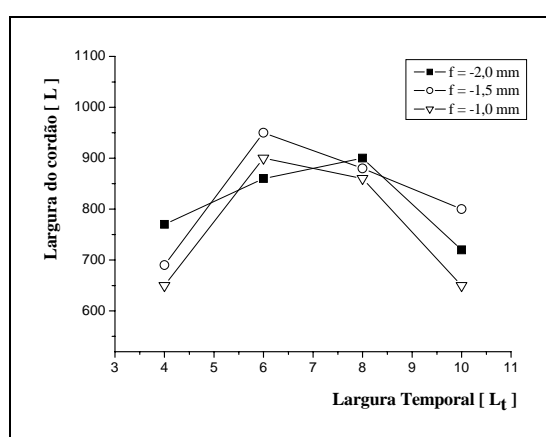


Figura 3. Variação da Largura do cordão de solda (L) em função da Largura temporal ( $L_t$ ) do feixe laser para distância focal de -2,0; -1,5 e -1,0 mm.

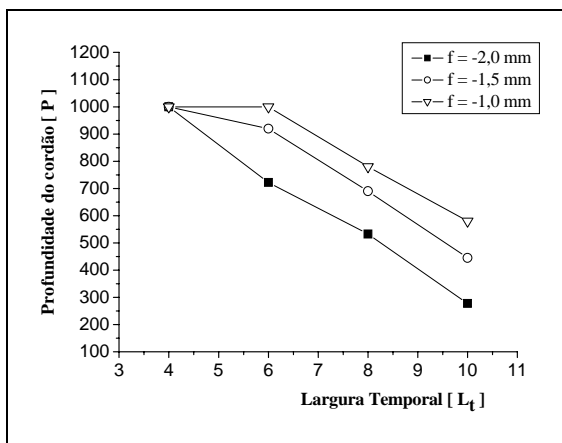


Figura 4. Variação da Profundidade do cordão de solda (P) em função da Largura temporal (Lt) do feixe laser para distância focal de -2,0; -1,5 e -1,0 mm.

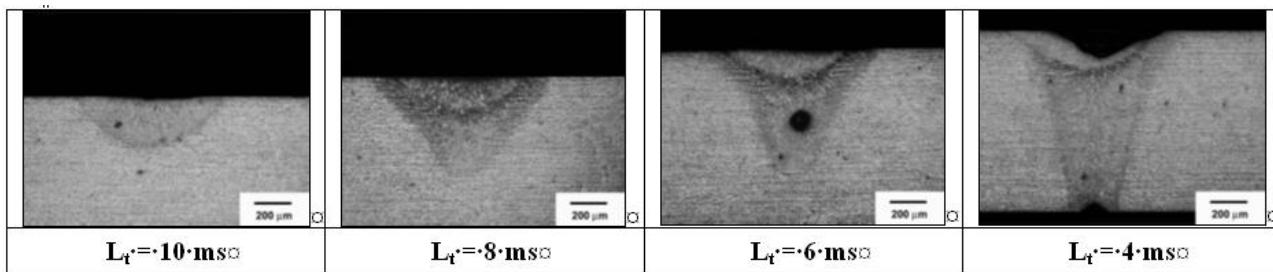


Figura 5. Influência da largura temporal na geometria do cordão. Foco 2,0mm abaixo da superfície. Fluência  $8,6 \cdot 10^3 \text{ J.cm}^2$

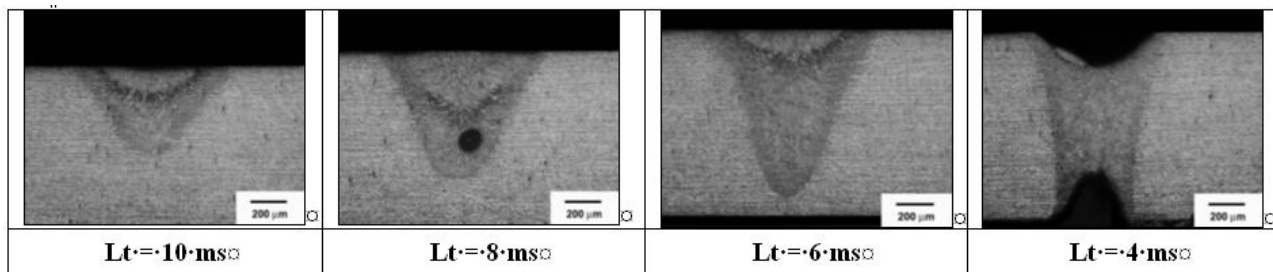


Figura 6. Influência da largura temporal na geometria do cordão. Foco 1,5mm abaixo da superfície. Fluência  $13,6 \cdot 10^3 \text{ J.cm}^2$

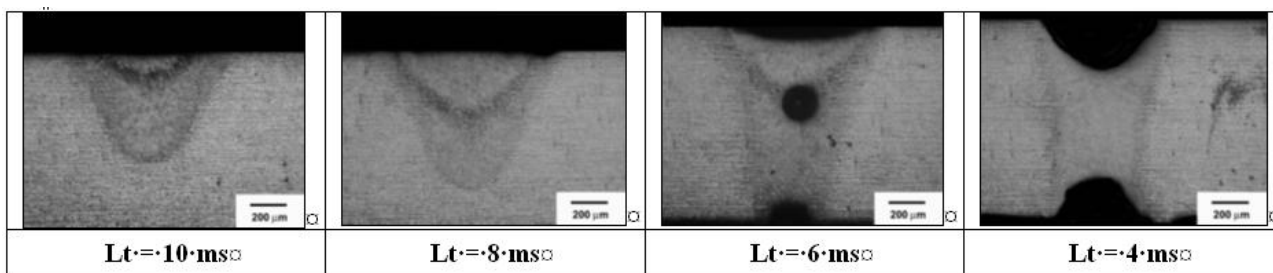
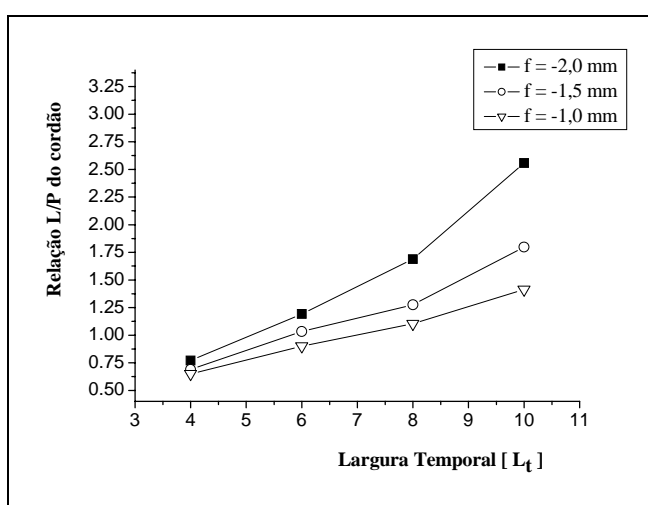


Figura 7. Influência da largura temporal na geometria do cordão. Foco 1,0mm abaixo da superfície. Fluência  $24,0 \cdot 10^3 \text{ J.cm}^2$

As macrografias da Fig.(5) mostram que a solda obtida com largura temporal de 10ms foi realizada no modo de condução, enquanto que as soldas realizadas com largura temporal de 8, 6 e 4ms foram realizadas no modo key hole. Fica evidente que, para uma energia de pulso constante, a redução da largura temporal do feixe altera o modo de soldagem de condução para key hole, alterando completamente a geometria do cordão de solda. Além disso, ocorreu o aparecimento de vazios e grande perda de material líquido do metal de solda.

As Fig.(6) e Fig.(7), amostras soldadas com foco nas posições -1,5 e -1,0 mm, apresentaram macrografias com comportamento semelhante ao da Fig.(5), isto é, a redução da largura temporal aumentou a penetração devido a um key hole mais intenso. Nessas amostras, mesmo com uma largura temporal de 10ms, as soldas foram todas realizadas na condição de key hole, isto é, para uma energia de pulso de 6,0 Joules e o foco próximo da superfície favoreceu o aparecimento do key hole. Dessa forma, podemos dizer que o aparecimento do key hole, para pulsos com energia constante, está relacionado à redução da largura temporal e ao aumento da fluência. Resultado semelhante foi observado por Quan et al (2008), onde o key hole severo gerou a formação de vazios na zona de fusão e grande perda de material devido a respingos e vaporização de elementos químicos, os quais também favorecem ao aparecimento de poros.

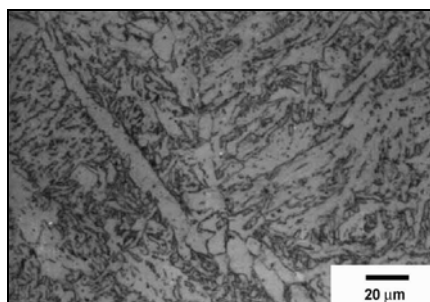
A Figura (8) mostra a dependência da razão de aspecto do cordão em relação à variação da largura temporal do feixe laser e a posição do foco do mesmo. Observa-se que o aumento da largura temporal do feixe favorece um aumento da relação largura/profundidade do cordão. Isso pode ser explicado em função da redução da intensidade do key hole com o aumento da largura temporal, chegando até mesmo ao modo de soldagem por condução.



**Figura 8. Variação da relação L/P do cordão de solda em função da Largura temporal ( $L_t$ ) do feixe laser para distância focal de -2,0; -1,5 e -1,0 mm.**

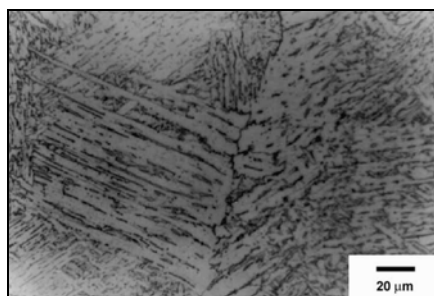
Em relação às análises microestruturais, observou-se que não houve grandes alterações na fração volumétrica dos constituintes microestruturais do cordão de solda em relação à variação da profundidade do foco do feixe laser. Por outro lado, em relação à variação da largura temporal do feixe, observou-se que à medida que se aumenta a largura temporal do feixe, constituintes microestruturais de baixa temperatura de transformação são favorecidos, como por exemplo as Ferritas de Segunda Fase Alinhada-FS(A).

A Figura (9) mostra a micrografia do cordão de solda da amostra soldada com largura temporal de 4ms e foco do feixe laser a 2,0 mm abaixo da superfície da peça. Essa amostra apresentou um key hole bem acentuado, com perda de material líquido da zona fundida e conseqüentemente baixa taxa de resfriamento, isso favoreceu o aparecimento dos microconstituintes do tipo Ferrita Primária de Contorno de Grão-PF(G), Ferrita Primária Poligonal Intragranular-PF(I) e Ferrita Acicular-AF.



**Figura 9. Micrografia do cordão de solda obtido por laser pulsado Nd:YAG, com  $L_t = 4$ ms e  $f = -2,0$  mm.**

A Figura (10) mostra a micrografia do cordão de solda da amostra soldada com largura temporal de 10ms e foco do feixe laser a 2,0 mm abaixo da superfície da peça. Essa amostra foi soldada no modo de condução, e conseqüentemente apresentou alta taxa de resfriamento, isso favoreceu o aparecimento dos microconstituintes de baixa temperatura de transformação, como a Ferrita com Segunda Fase Alinhada-FS(A).



**Figura 10. Micrografia do cordão de solda obtido por laser pulsado Nd:YAG, com  $L_t = 10\text{ms}$  e  $f = -2,0\text{ mm}$ .**

#### 4. CONCLUSÕES

- A diminuição da largura temporal, mantendo-se a densidade de energia, alterou o modo de soldagem de condução para o modo key hole.
- A focalização do feixe, no intervalo de 1,0mm, mantendo-se constante os demais parâmetros, influenciou pouco na geometria do cordão de solda.
- O aumento da fluência, sem o aumento da energia favoreceu muito pouco a profundidade de penetração.
- A largura temporal de 4 ms gerou uma penetração total devido ao key hole profundo.
- A perda de material fundido aumentou com a redução da largura temporal e com o aumento da fluência.
- A microestrutura do metal de solda variou mais em relação à largura temporal do que em relação à posição do foco do feixe laser.
- A melhor condição de soldagem foi obtida com largura temporal de 6 ms e foco na posição -1,5mm.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

#### 6. REFERÊNCIAS

- American Petroleum Institute, 1995, Specification for Line Pipe 5L. – API , Washington, 25p.
- American Welding Society, 1992, Welding Handbook, vol. 4 , 8 ed., Miami, USA, 621 p.
- Dolby,R.E., 1986, “Guidelines for classification of ferritic steel weld metal microstructural constituents using the light microscope”, Welding in the World, v.24, n.7/8, pp. 144-148.
- DULEY, W.W., 1999, “Laser Welding”, Ed.John Wiley&Sons, USA, 251p.
- Gillner, A., Holtkamp, J., Hartmann, C., Olowinsky, A., Gedicke, J., Klages, K., Bosse, L., Bayer, A., 2005, Laser applications in microtechnology, Journal of Materials Processing Technology 167, pp.494-498.
- ION, J.C., 2005, “Laser Processing of Engineering Materials”, Ed. Elsevier, UK, 556p.
- Kirkwood, P.R.; Tait, W.P., 1996, “Developments in welding consumables for the seam welding of high strength X70 line pipe”, Paper 33 IIW, pp. 299-306.
- Quan, Y.J.; Chen, Z.H.; Gong, X.S.; Yu, Z.H., 2008, “Effects of heat input on microstructure and pproperties of laser welded magnesium alloy AZ31”, aterials Characterization, v.59, pp. 1491-1497.
- STEEN, W.M., 2005, “Laser Material Processing”, Springer, USA, 408 p.
- Widgery, D., 1999, “Linepipe welding beyond 2000 “, Svetsaren, vol. 54 , pp. 8 – 10.

#### 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído nesse trabalho.

## METAL CHARACTERIZATION OF API 5LX GRADE 70 BY PULSED Nd:YAG LASER

Vicente Afonso Ventrella, ventrella@dem.feis.unesp.br<sup>1</sup>

José Roberto Berretta, berretta@ipen.br<sup>2</sup>

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNESP Departamento de Engenharia Mecânica, Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil Centro 56, CEP 15385-000, Ilha Solteira – SP, Brasil.

<sup>2</sup>IPEN Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Centro de Lasers e Aplicações, Av. Prof. Lineu Prestes 2.242, Cidade Universitária, CEP 05508-000, São Paulo – SP, Brasil.

**Abstract:** *Laser is a flexible and powerful tool with many relevant applications in industry, mainly in the welding area. Its use is spreading more and more as a result of the development of modern laser systems with greater reliability and lower cost. Modern lasers provide industry welding technical solutions to many problems, and in addition to replacing the conventional welding already established, yet have higher productivity. Its ability comes from their unique versatility, reliability, speed and automation, all with high precision and flexibility. In addition, laser-welded joints have a heat affected zone extremely small and minimal distortion of the base metal. The present work studied the application of the pulsed laser welding of API 5L Grade 70, used in the oil and natural gas, analyzing the influence of pulse-width, depth of focus of the laser beam and the geometrical characteristics of the weld bead. All welds were obtained with pulse energy of 6.0 Joules, the temporal width used was 4, 6, 8 and 10 ms, and the depth of focus used was 1.0, 1.5 and 2.0 mm below the surface of the base metal. The results showed that both the microstructure and the geometry of the weld varied more with the pulse-width than with the focus position of the laser beam.*

**Keywords:** *laser welding, Nd:YAG, API X70 steel, microstructure.*

### 1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.