



Tema: Soldagem

## INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA LARGURA TEMPORAL EM SOLDAGEM COM LASER PULSADO Nd:YAG DE AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX UNS S32205\*

Gillian da Silva Crespo<sup>1</sup>  
 Juno Gallego<sup>2</sup>  
 Wagner de Rossi<sup>3</sup>  
 Vicente Afonso Ventrella<sup>4</sup>

### Resumo

O laser é uma ferramenta flexível e poderosa com muitas aplicações relevantes na indústria, principalmente na área de soldagem. 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. O presente trabalho estudou o metal de solda do aço inoxidável duplex UNS S32205 empregado na indústria de petróleo e gás natural, analisando a influência da variação da largura temporal nas características microestruturais do cordão de solda obtido por soldagem com laser pulsado de Nd:YAG. Os resultados mostraram que a dimensão da zona termicamente afetada é extremamente pequena e a microestrutura do metal de solda apresenta menor fração volumétrica de austenita em relação aos processos convencionais.

**Palavras-chave:** Soldagem; Laser pulsado; Nd:YAG; Aço duplex; UNS S32205.

### INFLUENCE OF THE VARIATION IN TEMPORAL WIDTH WITH PULSED Nd :YAG LASER WELDING OF UNS S32205 DUPLEX STAINLESS STEEL

#### Abstract

The laser is a flexible and powerful tool with many relevant applications in industry, especially in the area of welding. Lasers now provide the welding industry technical solutions to many problems, and in addition to replacing conventional welding already established, yet have higher productivity. The present work studied the weld metal of duplex stainless steel UNS S32205 employed in the oil and gas industry by analyzing the influence of varying the temporal width of the microstructural characteristics obtained by laser welding with pulsed Nd : YAG. The results showed that the size of the heat affected zone is extremely small and the microstructure of the weld metal has lower volume fraction of austenite compared to conventional processes.

**Keywords:** Welding; Pulsed laser; Nd:YAG; Duplex steel; UNS S32205.

- <sup>1</sup> Aluno do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira, SP, Brasil.
- <sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia de Materiais, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.
- <sup>3</sup> Pesquisador do Centro de Lasers e Aplicações Industriais (CLA), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, SP, Brasil.
- <sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia de Materiais, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



## 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 [1]. 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 materiais, espessuras e geometrias [2-4].

O setor de Petróleo e Gás Natural está revestindo ou substituindo componentes de aços inoxidáveis austeníticos convencionais (como por exemplo o 316L) por aços inoxidáveis austeníticos com maior teor de Molibdênio (como por exemplo o 317L) ou por aços inoxidáveis duplex e superduplex. Essas operações são baseadas principalmente em resultados de ensaios de corrosão realizados nestes materiais através de laboratórios de pesquisa em todo o mundo. Entretanto, dependendo dos aspectos de fabricação empregados, pode-se alterar as características originais destes materiais, afetando significativamente o desempenho dos mesmos. Nesse contexto, a soldagem tem papel de destaque, pois é o principal método de fabricação empregado.

Os aços duplex possuem duas fases distintas e bem definidas: austenita e ferrita formando, portanto uma microestrutura bifásica, composta por uma matriz ferrítica e ilhas de austenita, com frações volumétricas aproximadamente iguais dessas fases, isto é, 50% de ferrita e 50% de austenita [5- 7]. As propriedades mecânicas desses aços são determinadas predominantemente pela relação austenita/ferrita e pela precipitação de compostos intermetálicos durante o processamento, associados aos elementos como Nb, Cr, Mo, Si, W e Cu, que reduz drasticamente os valores da ductilidade e a resistência ao impacto. Dentre os intermetálicos, as fases de Laves destaca-se como uma fase que produz acentuada fragilidade aos aços, principalmente quando o Nb está presente, pois este catalisa sua formação [8].

Enquanto as vantagens do uso do laser vêm se disseminando rapidamente em vários segmentos da indústria, a soldagem de aços DUPLEX, 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 sólidos e tubulares pode ser substituída por soldagem a laser.

No presente trabalho foi realizada uma análise sobre o uso do laser de Nd:YAG, no modo pulsado, em soldagem de chapas de aço inoxidável duplex UNS S32205, com 3,0 mm de espessura. Foi estudado o efeito da variação da largura temporal do pulso de soldagem e da posição do foco do feixe de laser nas características do cordão de solda, buscando a obtenção de um cordão livre de descontinuidades.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho de pesquisa foi realizado utilizando um sistema laser de Nd:YAG na condição pulsado. O metal base utilizado neste estudo foi o aço inoxidável UNS

---

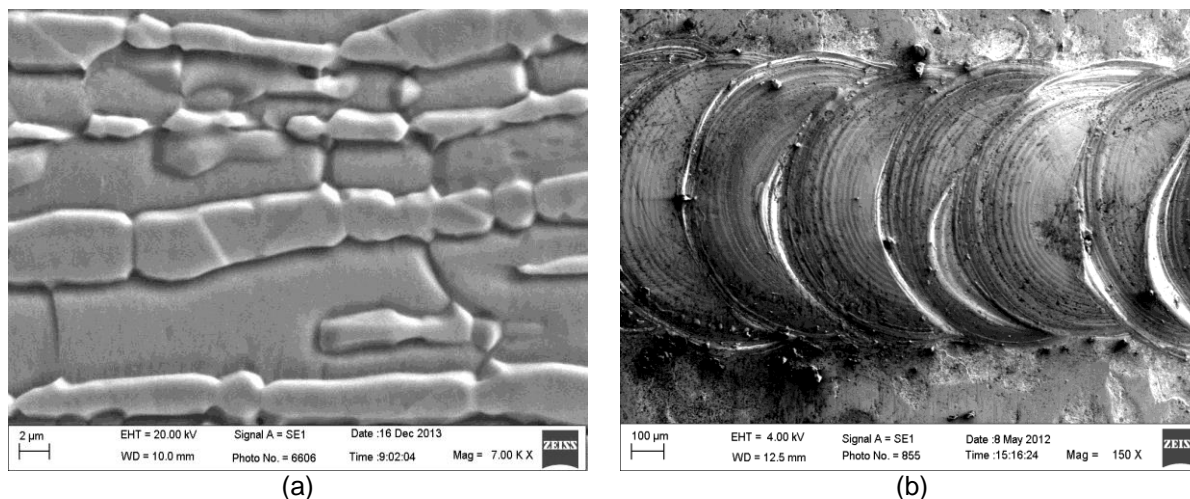
\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*

S32205, na forma de chapas com 3,0 mm de espessura. As amostras foram cortadas na dimensão 25 mm x 75 mm. A composição química do metal base é mostrada na Tabela 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 descontinuidades. As amostras foram preparadas e limpas para garantir a mesma condição superficial das chapas e um acabamento homogêneo.

**Tabela 1.** Composição química analisada do metal utilizado nas soldagens por laser (%peso)

Material	C	Cr	Ni	Mo	Co	Mn	P	S
UNS S32205	0,017	22,52	5,73	3,18	0,10	1,54	1,50	0,001

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 e 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  $24,0 \cdot 10^3$  J/cm<sup>2</sup>,  $13,6 \cdot 10^3$  J/cm<sup>2</sup> e  $8,6 \cdot 10^3$  J/cm<sup>2</sup>, respectivamente. As amostras foram soldadas em uma atmosfera de gás argônio utilizando-se um fluxo de 15 l/min. Após a soldagem as amostras foram cortadas e preparadas para análise metalográfica da seção transversal do cordão de solda, através de lixamento e polimento das amostras. A revelação da estrutura do cordão foi através de ataque com reagente de Behara modificado. As medidas do cordão de solda foram realizadas através de um microscópio ótico e um software de análise de imagem. A Figura 1 mostra uma micrografia do metal base e uma vista superior do cordão de solda pulsado, imagens obtidas através de MEV.



**Figura 1.** Metal base (a) e vista superior do cordão de solda obtido por laser pulsado de Nd:YAG.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 sintetiza os parâmetros obtidos no decorrer dos ensaios de soldagem por laser Nd:YAG pulsado. A Figura 2 apresenta macrografias típicas dos cordões obtidos, cuja geometria variou pelo efeito da variação da largura temporal e do foco.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

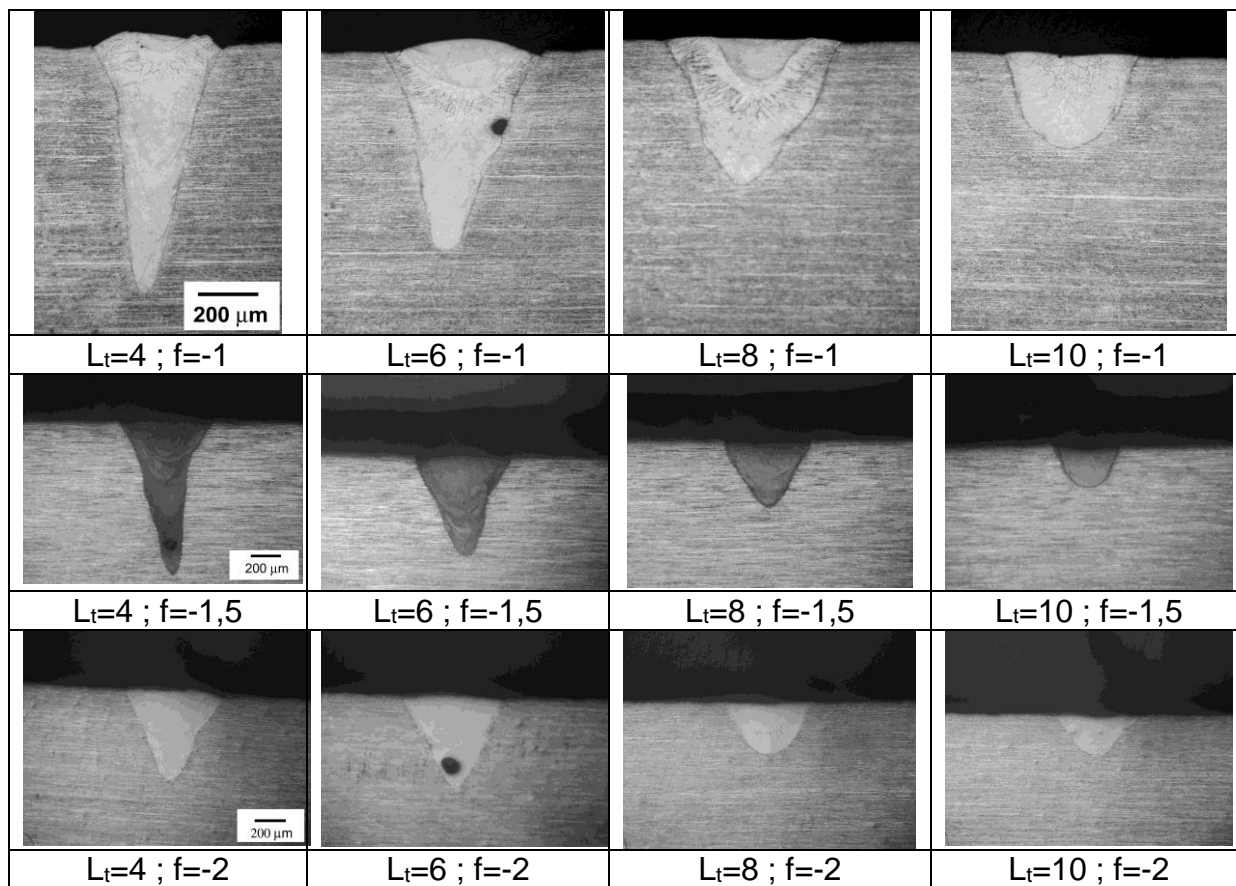
Variações na zona afetada pelo calor (ZAC) não foram observadas no metal base. O efeito mais significativo pode ser atribuído tanto à variação da largura temporal quanto da variação da profundidade de foco. Estas podem ser as principais razões para a variação da geometria do cordão de solda observadas na Figura 2, considerando que a espessura da chapa e a difusividade térmica são as mesmas em todos os ensaios realizados.

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 1; 1,5 e 2 mm abaixo da superfície do metal base. Observa-se através da Figura 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, Figura 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 Figura 2.

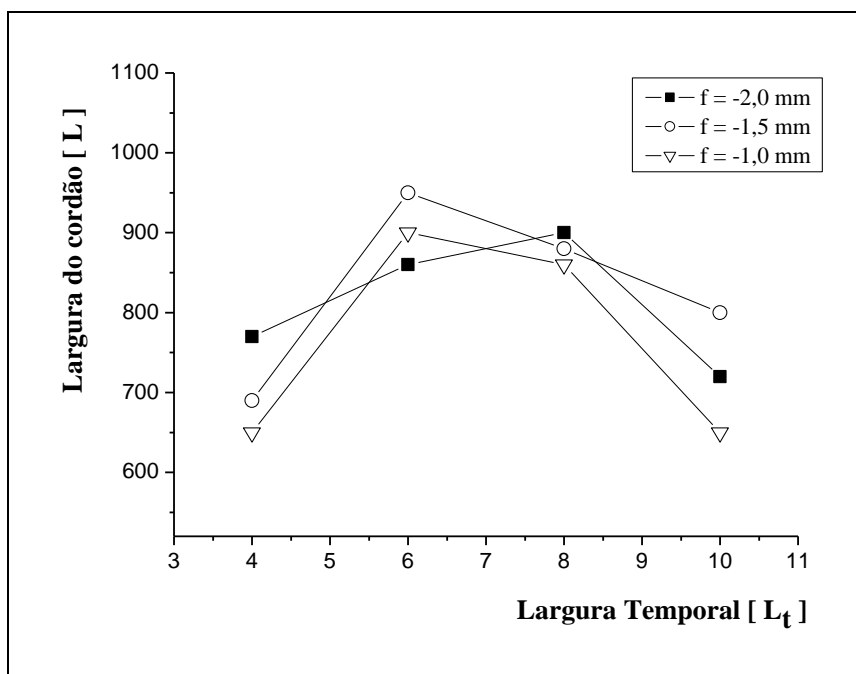
**Tabela 2.** Parâmetros de soldagem aplicados

<i>amostra</i>	Larg. Temp.[ms]	Foco [mm]	Fluência [ $10^3 \cdot J \cdot cm^{-2}$ ]	Potência Pico [kW]	Intensidade [ $10^5 \cdot W \cdot cm^{-2}$ ]
1	4	-1	24	1,5	60,0
2	6	-1	24	1,0	40,0
3	8	-1	24	0,75	30,0
4	10	-1	24	0,6	24,0
5	4	-1,5	13,6	1,5	34,1
6	6	-1,5	13,6	1,0	22,7
7	8	-1,5	13,6	0,75	17,1
8	10	-1,5	13,6	0,6	13,6
9	4	-2	8,6	1,5	21,4
10	6	-2	8,6	1,0	14,3
11	8	-2	8,6	0,75	10,7
12	10	-2	8,6	0,6	8,6

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

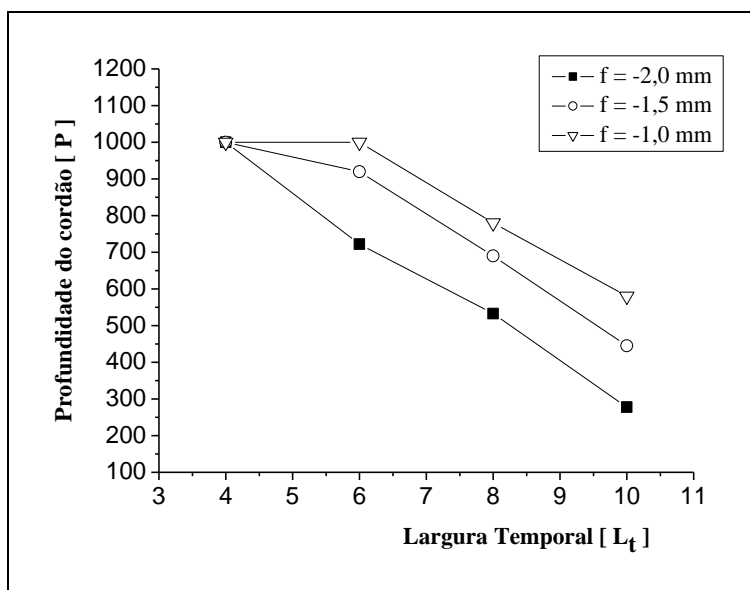


**Figura 2.** Macrografias da seção transversal dos cordões de solda laser obtidos com diferentes larguras temporais e profundidades de foco. MO.



**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.

\* Contribuição técnica ao 69<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14<sup>o</sup> ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



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

As macrografias da Figura 2 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. Resultado semelhante foi observado por Quan et al [9], 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. Ver Figura 5.

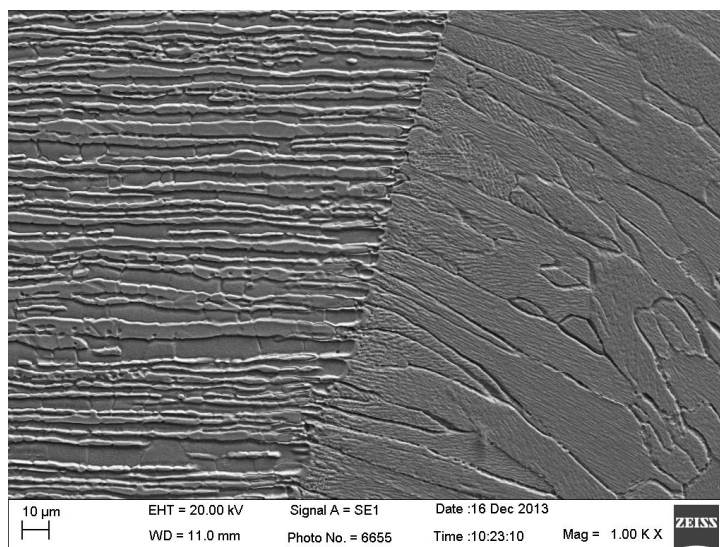


**Figura 5.** Micrografia do metal de solda com a presença de vazio. MO.

Em relação às análises microestruturais, observou-se que não houve grandes alterações na fração volumétrica das fases ferrita e austenita 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 favorece-se a presença de austenita na matriz ferrítica. No caso

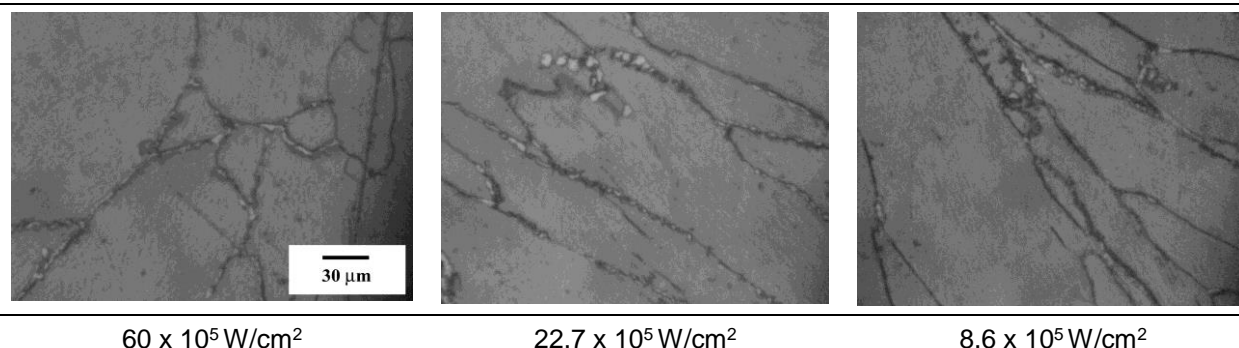
\* Contribuição técnica ao 69<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14<sup>o</sup> ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

da soldagem laser o metal de solda manteve-se praticamente ferrítico, conforme observado na Figura 6. Em relação à zona afetada pelo calor pode-se dizer que ela praticamente inexistente.



**Figura 6.** Micrografia da zona de ligação entre o metal de solda e o metal base. MEV.

A Figura 7 mostra micrografias do cordão de solda das amostras soldada com diferentes intensidades do feixe laser. Essas amostras apresentaram poucas alterações na fração volumétrica das fases ferrita e austenita do cordão de solda em relação à variação da largura temporal do feixe laser.



**Figura 7.** Micrografias do metal de solda obtidas com diferentes intensidades do feixe laser. MO.

#### 4 CONCLUSÃO

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 a máxima penetração devido ao key hole profundo.

A perda de material fundido aumentou com a redução da largura temporal e com o aumento da fluência.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



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.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro da CAPES e do CNPq.

## REFERÊNCIAS

- 1 Gilner A, Holtkamp J, Hartmann C, Olowinsky A, Gedicke J, Klages K, Bosse L, Bayer A. Laser applications in microtechnology. Journal of Materials Processing Technology. 2005;167 :494-498.
- 2 Ion JC. Laser Processing of Engineering Materials, UK: Ed. Elsevier; 2005.
- 3 Steen WM. Laser Material Processing. USA : Springer; 2005.
- 4 Duley WW. Laser Welding. USA : Ed. John Wiley&Sons; 1999.
- 5 Ku JS, Ho NJ, Tjong SC. Properties of electron beam welded SAF 2205 duplex stainless steel. Journal of Materials Processing Technology. 1997;63:770-775.
- 6 Zambon A, Bonollo F. Rapid solidification in laser welding of stainless. Steels, Materials Science and Engineering A. 1994;178:203-207.
- 7 Mathupandi V, Srinivasan PB, Shankar SK, Sundaresan S. Effect of nickel and nitrogen addition on the microstructure and mechanical properties of power beam processed duplex stainless steel (UNS 31805) weld metals. Materials Letters. 2005;59:2305-09.
- 8 Pekkarinen J, Kujanpaa V. The effects of laser welding parameters on the microstructure of ferritic and duplex stainless steels welds. Physics Procedia. 2010;5:517-523.
- 9 Quan YJ, Chen ZH, Gong XS, Yu ZH. Effects of heat input on microstructure and properties of laser welded magnesium alloy AZ31. Materials Characterization. 2008;59:1491-97.

---

\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*