



DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM LASER PULSADO Nd:YAG PARA LÂMINAS DE 100 μm DE ESPESSURA DE AISI 316L¹

Vicente A. Ventrella²
José Roberto Berretta³
Wagner de Rossi³

Resumo

O presente trabalho estudou a influência da energia do pulso de soldagem, no caso processo laser de Nd:YAG operando no modo pulsado, na soldagem de lâminas finas com 100 μm de espessura de aço inoxidável austenítico AISI 316L, utilizado no revestimento de sensores que trabalham em ambiente corrosivo da indústria sucroalcooleira. Utilizou-se energia de pulso de 1,5 Joules a 3,0 Joules, com incremento de 0,25 Joules e largura temporal de 4 ms. As soldas foram realizadas com proteção gasosa de argônio. Foram realizadas análises macrográficas das juntas soldadas, através de secções transversais das mesmas e ensaios de microdureza Vickers. Os resultados obtidos mostraram que o controle da energia do pulso, em processo de soldagem por laser de lâminas finas é de fundamental importância para a geração de juntas soldadas livres de descontinuidades. Os parâmetros geométricos da junta soldada, tais como largura do cordão, largura de união e profundidade, aumentaram em função do aumento da energia do pulso. O processo mostrou-se muito sensível à formação de porosidade e à presença de gap entre as lâminas.

Palavras-chave: Soldagem laser; Nd:YAG; Aço inoxidável austenítico; AISI 316L.

PULSED Nd: YAG LASER WELDING DEVELOPMENT FOR AISI 316L WITH 100 μm THICKNESS

Abstract

Experimental investigations were carried out using a pulsed neodymium: yttrium aluminum garnet laser welding to examine the influence of the pulse energy in the AISI 316L thin foil welding with 100 μm thickness, employed to cover sensors that work in corrosive environment of the sugar and alcohol industry. The pulse energy was varied from 1,5 to 3,0 J at an increment of 0.25 J and 4 ms pulse duration. The specimens were laser-welded in an argon atmosphere. The welds were analyzed by macroscopic observations using optical microscopy and micro hardness. The results indicated that pulse energy control, in laser welding of thin foils, is of considerable importance for weld quality since it can generate discontinuities free weld joints. The geometric parameters of the welded joints like bead width, connection width and bead depth increased with the pulse energy increasing. The process showed very sensitive to porosity formation and gap between couple.

Key-words: Laser welding; Nd:YAG; Austenitic stainless steel; AISI 316L.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Universidade Estadual Paulista-UNESP, Departamento de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira-SP, Brazil. ventrella@dem.feis.unesp.br

³ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN, Centro de Lasers e Aplicações, São Paulo-SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O laser é uma ferramenta flexível e poderosa com muitas aplicações relevantes na indústria. 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 soluções técnicas a muitos problemas na área do processamento de materiais, e além de substituírem muitas tecnologias já estabelecidas, ainda apresentam maior produtividade. Sua habilidade vem de suas características únicas de versatilidade, confiabilidade, velocidade e automação, tudo com flexibilidade e alta precisão. 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. 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.⁽¹⁾

Os componentes industriais estão sendo confeccionados menores a cada dia com a finalidade de reduzir energia e espaço, criando assim um aumento na demanda por processos de microsoldagem. Dessa forma, a soldagem laser vem se mostrando o processo ideal, pois ela resulta em um controle mais preciso da fonte de calor se comparado aos processos de soldagem a arco elétrico e plasma.^(2,3)

O processo de soldagem por laser pulsado de Nd:YAG é caracterizado por um aquecimento periódico da poça de solda através de um pico de energia do feixe de laser incidente que conduz a fusão e solidificação da poça. A velocidade de soldagem é definida pelo fator de sobreposição, da taxa de repetição do pulso e do diâmetro focal do feixe. Entretanto, devido a alta potência do pico de energia envolvida na soldagem por laser pulsado, o tempo de solidificação é bem menor do que os processos de soldagem com laser contínuo e processos convencionais de soldagem. A combinação dos parâmetros de processo tais como energia do pulso [E_p], duração do pulso [t_p], taxa de repetição [R_r], diâmetro da poça de solda [Φ_b] e velocidade de soldagem [v] determinam o modo de soldagem, que pode ser condução ou convecção.⁽⁴⁻⁶⁾

Tem sido observado na literatura pesquisas com soldagem laser de Nd:YAG nos modos contínuo, pulsado, com chapas dissimilares e chapas revestidas. Kim, Kim e Chung,⁽⁷⁾ utilizando um laser pulsado de Nd:YAG obtiveram bons resultados na soldagem do Inconel 600, utilizado em componentes tubulares de usinas nucleares. Berretta et al.⁽⁸⁾ utilizando um laser pulsado de Nd:YAG estudaram a soldagem de juntas dissimilares de aço inoxidável austenítico AISI 304 e aço inoxidável martensítico AISI 420. Ping e Molian⁽⁹⁾ utilizaram um sistema laser pulsado de Nd:YAG com largura temporal de nanosegundos para soldar laminas finas com 60 μm de aço inoxidável austenítico AISI 304.

No presente trabalho foi realizada uma análise sobre o uso do laser de Nd:YAG, no modo pulsado, em soldagem de laminas finas de aço inoxidável austenítico AISI 316L, com 100 μm de espessura, sobre base espessa do mesmo material. Foi estudado o efeito da energia do pulso de soldagem nas características macro e microestruturais, e mecânicas das juntas soldadas, buscando a obtenção de uma junta 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 Figura 1. O metal base utilizado neste estudo foi o aço inoxidável austenítico AISI 316L na forma de chapas finas com 100 μm de espessura e base espessa de 3,0 mm. As amostras foram cortadas na dimensão 20 mm x 50 mm. A composição química do metal base é mostrada na Tabela 1. Os resultados experimentais foram analisados com base na relação entre energia do pulso e geometria do cordão de solda, presença de descontinuidades e propriedades mecânicas. As amostras foram preparadas e limpas com acetona para garantir a mesma condição superficial das chapas e um acabamento homogêneo.

Tabela 1. Composição química do aço AISI 316L (wt %)

Elementos	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Mo
AISI 316L *	0,03	17,28	13,0	0,80	0,75	0,045	0,003	2,3
AISI 316L **	0,03	17,49	12,76	0,70	0,68	0,055	0,003	2,1

* lâmina fina ** base espessa

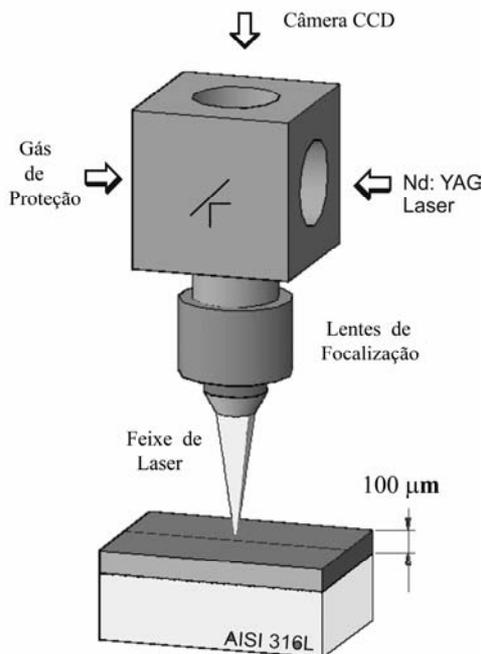


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de soldagem por laser pulsado de Nd:YAG.

Para avaliar a influência da energia do pulso, as lâminas finas, com 100 μm de espessura, foram posicionadas na condição de junta sobreposta com a base espessa, conforme Figura 2. Elas foram soldadas com feixe de diâmetro de 0,2 mm e ângulo de 90°. A energia do pulso (E_p) variou de 1,5 J to 3,0 J, com um incremento de 0.25 J e largura temporal (t_p) de 4 ms. As amostras foram mantidas fixas através de um dispositivo o qual proporcionou um bom contato entre as lâminas e com mínima distorção.

As amostras foram soldadas em uma atmosfera de gás argônio utilizando-se um fluxo de 10 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 eletroquímico (2.2 V, 20s) em solução de ácido nítrico 50%. As medidas

do cordão de solda foram realizadas através de um microscópio ótico e um software de análise de imagem. A Figura 3 mostra uma ilustração esquemática da secção transversal da junta com os parâmetros geométricos a serem analisados.

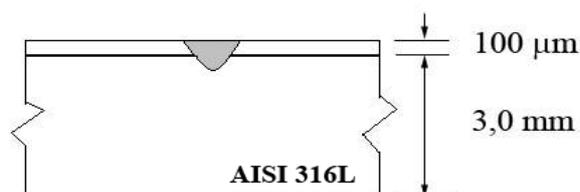


Figure 2. Desenho esquemático da junta soldada.

As propriedades mecânicas das juntas soldadas foram avaliadas através de ensaios de microdureza Vickers (HV10). As medidas de microdureza foram realizadas na base espessa, na secção transversal da junta soldada, numa direcção paralela à superfície da chapa, próximo à linha de conexão. Procurou-se correlacionar a microdureza com possíveis efeitos de heterogeneidades microestruturais, tanto no metal base quanto no metal de solda.

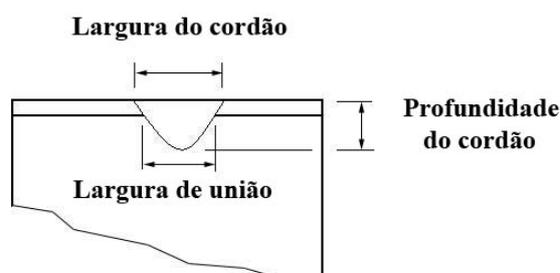


Figure 3. Ilustração esquemática da secção transversal da junta [mm].

3 RESULTADOS

A Figura 4 mostra uma junta sobreposta de lâmina fina (100 μm) de aço AISI 316L soldada sobre uma base espessa de 3,0 mm, utilizando-se $E_p = 2,0$ J e laser pulsado de Nd:YAG. É evidente no detalhe macrográfico a ausência de qualquer defeito na região do cordão de solda e adjacências. Do ponto de vista de análise visual, as melhores condições de soldagem foram obtidas com a amostra soldada com energia do pulso de 2,0 Joules. Nessa condição todos os cordões de solda mostraram claramente características de soldagem laser pulsado. Não foram observadas trincas nas condições de soldagem analisadas, isso ocorreu devido à boa resistência à trinca do metal base e a escolha correta dos parâmetros de soldagem utilizados. Nenhuma outra descontinuidade foi observada na zona de fusão do cordão de solda, mostrando a eficiência do gás de proteção na formação de oxidação, porosidades e formação de vazios, um problema crítico em soldagem laser, o qual resulta em junta de baixa qualidade. Essas amostras foram soldadas no modo de condução.

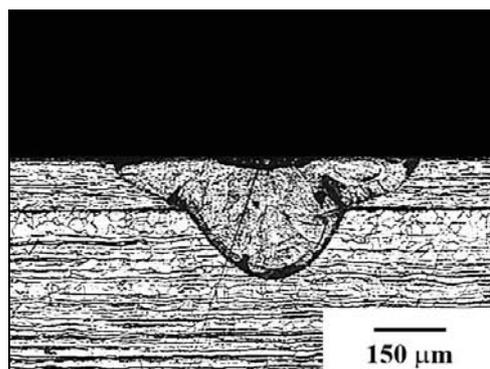


Figura 4. Secção transversal da amostra soldada com 2,0 J.

A Figura 5 mostra macrografias da secção transversal das juntas sobrepostas soldadas com laser pulsado com energias (E_p) de 1,5 a 3,0J. Observa-se na Figura 5a (amostra soldada com energia de 1,5 Joules), que o metal de solda fundido não penetrou na base inferior e não apresentou concavidade superficial, típica de processos autógenos. Este fato ocorreu devido à baixa energia de soldagem. Observa-se também nessa macrografia a presença de um gap entre a lâmina e a base espessa, fato que pode ter contribuído com a falta de penetração. A presença de um gap, na linha de conexão, entre a lâmina e a base espessa pode atuar também como um concentrador de tensão nessa região, o que pode reduzir a resistência mecânica da junta. Kawarito, Kito e Katayama,⁽¹⁰⁾ observaram que quanto maior o gap entre os elementos a ser soldado, maior será a concavidade na superfície do cordão de solda, desde que o metal líquido tenha tempo suficiente para preencher a região do gap, fato que não ocorreu com essa amostra. Analisando-se as amostras com energia de pulso de 1,75 Joules a 2,5 Joules observou-se que essas amostras apresentaram uma linha de conexão, isto é, uma região com metal fundido entre a lâmina superior e a base espessa, caracterizando-se portanto a união entre as mesmas, conforme mostra as macrografias das Figuras 5b, 5c e 5d (amostras soldadas com 2,0 Joules; 2,25 Joules e 2,5 Joules). Observa-se também nessas macrografias que essas amostras não apresentam concavidade na superfície do cordão de solda e nem a presença de porosidade ou vazios. As profundidades dos cordões de solda observadas foram 240 μm , 389 μm e 600 μm , respectivamente. Nessas condições as amostras apresentaram uma boa penetração do metal líquido na base inferior e bom contato entre as mesmas, garantindo uma condição ideal para a soldagem por costura de lâmina fina e base espessa sobrepostas. Nas Figuras 5d, 5e e 5f (amostras soldada com energia de 2,5 Joules; 2,75 Joules e 3,0 Joules) observa-se uma grande penetração do cordão de solda, isto é, uma alta relação penetração / largura do metal de solda, mostrando que a partir dessa energia as amostras foram soldadas na condição por key-hole. A penetração aumentou proporcionalmente com o aumento da energia do pulso, entretanto observou-se uma deformação da lâmina fina superior devido ao maior aporte de calor na junta, chegando em alguns casos à perfuração.

A relação entre a energia do pulso de soldagem e a geometria do cordão de solda está representada na Figura 6. A largura do cordão aumentou de 570 μm to 910 μm quando a energia do pulso aumentou de 1,5 Joules para 3,0 Joules. Isto indica que quando o feixe interage com o metal base da lâmina superior, criando uma poça líquida, o calor do metal líquido é transferido por condução para o metal base inferior, caracterizando a soldagem laser por condução. Quanto maior a energia do feixe maior a profundidade do metal fundido, resultando em um cordão mais estreito,

caracterizando a soldagem no modo key-hole, conforme observado nas Figuras 5d, 5e e 5f.

A falta de fusão entre os elementos da junta sobreposta foi observada somente na soldagem com energia de pulso de 1,5 Joules. Essa descontinuidade pode ser resolvida através do aumento da energia do pulso e da melhoria do contato entre as lâminas, entretanto as amostras soldadas com energia superior a 2,5 Joules sofreram perfuração do cordão de solda e apresentaram vazios. Não foi observado trinca em nenhuma das amostras, sugerindo que as trincas de soldagem não são sensíveis à variação da energia do pulso, mas sim em relação ao Cr_{eq}/Ni_{eq} .

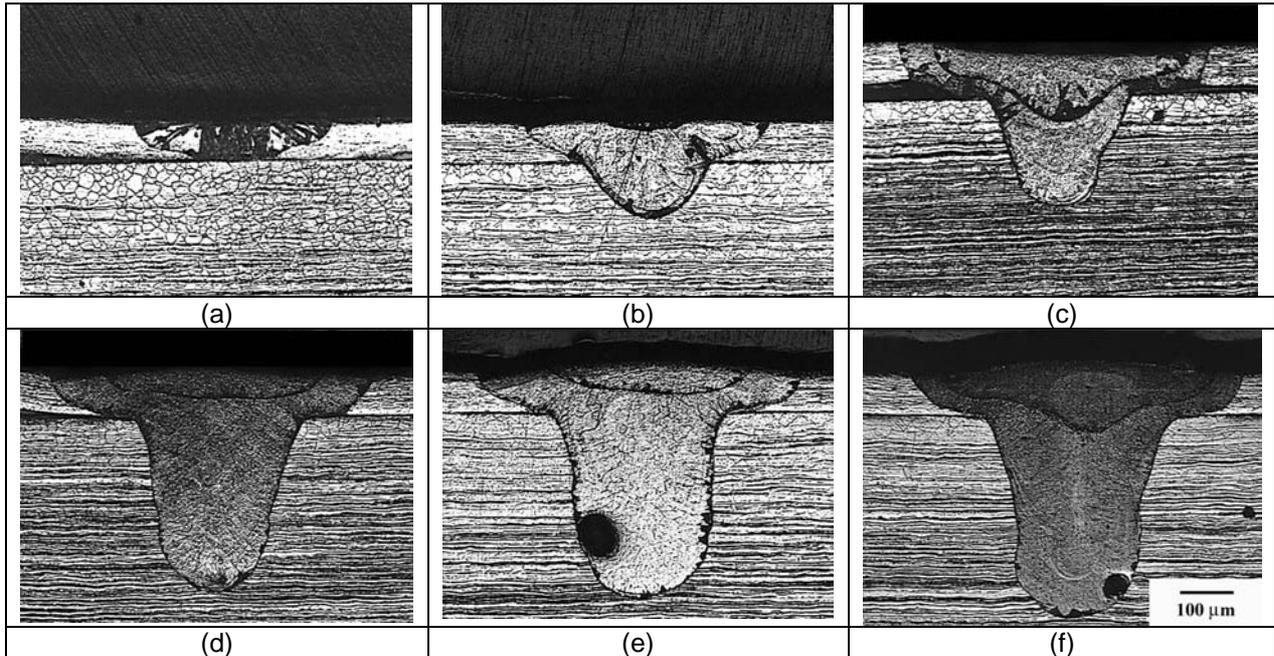


Figura 5. Seção transversal das juntas soldadas com laser pulsado de Nd:YAG com diferentes energias de pulso (E_p). a) 1,5 J, b) 2,0 J, c) 2,25 J, d) 2,5 J, e) 2,75 J, f) 3,0 J.

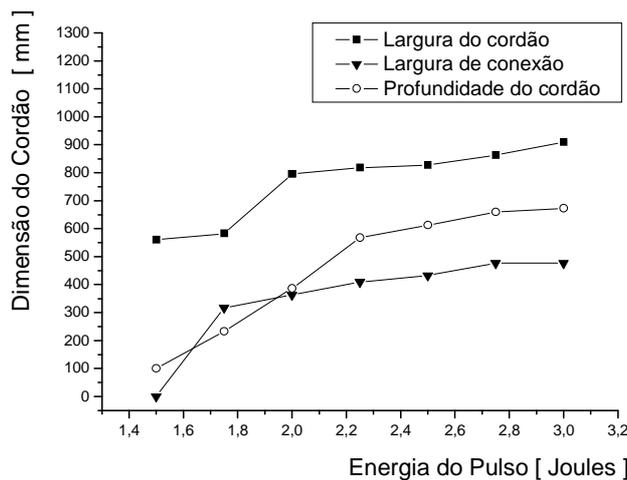


Figura 6. Relação entre a energia do pulso [E_p] e a geometria do cordão.

A análise da zona afetada pelo calor (ZAC) das amostras mostrou que a dimensão da ZAC aumenta em função do aumento da energia do pulso. Foi observado em todas as amostras que a ZAC da lâmina superior é maior do que a ZAC da base espessa. Este fenômeno é fortemente dependente da diferença de massa entre os elementos a serem soldados e da presença de gap entre as lâminas, pois o gap atua

como uma barreira dificultando a transferência de calor entre as mesmas. Se o gap for excessivo todo calor pode ser absorvido pela lâmina superior resultando em uma perfuração da mesma.

A Figura 7 mostra microestruturas típicas da junta soldada do aço inoxidável austenítico 316L. A Figura 7a mostra a estrutura de solidificação da linha de fusão da lâmina superior, onde pode ser visto o metal base não fundido agindo como substrato para a nucleação dos grãos colunares da zona de fusão, caracterizando o crescimento epitaxial. Nesse caso os grãos são perpendiculares à linha de fusão. A Figura 7b mostra a microestrutura da ZAC onde pode ser visto o efeito do gradiente térmico nessa região.

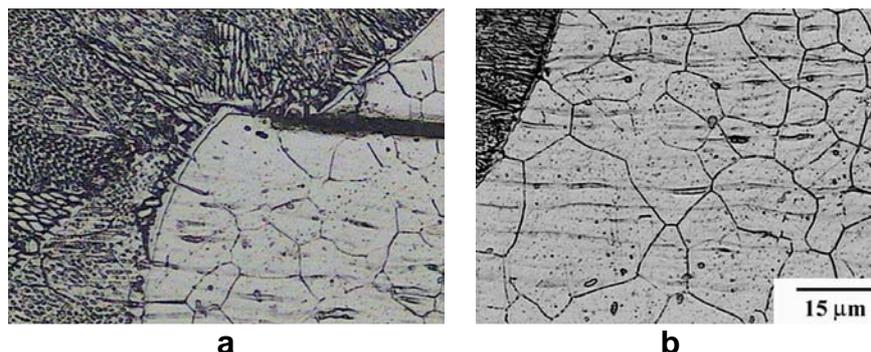


Figura 7. Microestrutura típica da zona de fusão (a) e da ZAC (b) do aço AISI 316L. (amostra soldada com 2.0 Joules).

Os perfis de microdureza da zona afetada pelo calor, do metal base e da zona de solda, em função da energia do pulso é mostrado na Figura 8. Não foi observada alteração significativa entre as medidas, apenas a microdureza da ZAC foi ligeiramente superior às demais. A microdureza do metal base foi sempre maior que as demais. Esses resultados foram registrados para todas as amostras. Isso era esperado pois as propriedades mecânicas dos aços em geral são baseadas em suas microestruturas.⁽¹¹⁾

Como pode ser observado na Figura 8, os valores de microdureza (HV10) diminuíram quando a energia do pulso variou de 1.0 Joule para 2.25 Joules. Durante a solidificação da zona de fusão, o material geralmente perde a sua resistência original. Os perfis de microdureza das juntas soldadas com baixa energia mostraram um aumento da dureza na zona de fusão devido a uma microestrutura fina induzida pelo resfriamento rápido.

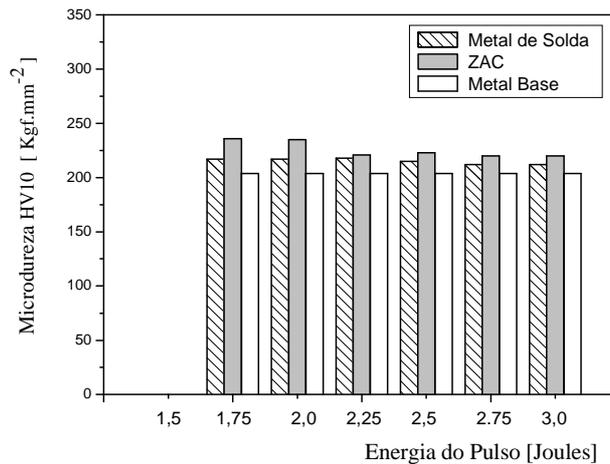


Figura 8. Perfil de microdureza Vickers do metal base, ZAC e metal de solda do aço AISI 316L em função da energia do pulso.

4 DISCUSSÃO

As análises macrográficas de todas as amostras demonstraram que a morfologia do metal de solda é simétrica em relação à direção do feixe laser. Esta simetria na superfície e na raiz do cordão de solda foi observada independentemente da energia do pulso de soldagem, sugerindo um movimento estável do metal líquido na poça de soldagem, entretanto quanto maior a energia do pulso maior a penetração do cordão de solda e a condição de soldagem passa do modo de condução para key-hole.

Liao e Yu,⁽¹²⁾ e Manonmani, Murugan e Buvanasekaran⁽¹³⁾ observaram que na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, com laser pulsado de Nd:YAG e sempre com o mesmo ângulo de incidência do feixe, os parâmetros geométricos do cordão aumentam com o aumento da energia do pulso. A mesma tendência foi registrada no presente trabalho até energia de pulso de 3,0 Joules. Com energias maiores do que 2,5 Joules observou-se grandes deformações da lâmina superior e o aparecimento de vazios e perfuração das lâminas.

Esses resultados macroestruturais indicaram que as características do metal de solda são sensíveis à variação da energia do pulso. Para se obter um perfil de solda aceitável deve-se ter um perfeito contato entre as lâminas a serem soldadas, pois a presença de um gap na região da junta restringe a transferência de calor entre os elementos, resultando na falta de fusão ou na perfuração da lâmina superior.

As macrografias do metal de solda obtidas com microscopia ótica mostraram uma microestrutura com grãos finos e basicamente celular-dendrítica. Este tipo de microestrutura é resultado de altas taxas de resfriamento, típicas de processos de soldagem laser. A formação de uma dada morfologia solidificação é determinada pela razão G/R (G = gradiente de temperatura, R = Taxa de crescimento) durante a solidificação. As estruturas com crescimento celular formam-se preferencialmente às estruturas dendríticas se G/R for alto.^(14,15)

Comparando-se a soldagem de lâminas finas com a soldagem de lâminas espessas, pode-se concluir que os grãos se tornam mais grosseiros à medida que a espessura do metal base diminui. Isso mostra que à medida que o volume de material do metal base diminui, o tempo de resfriamento aumenta e a aparência da ZAC torna-se mais grosseira. Isso indica que na soldagem de lâminas finas o controle da extensão da ZAC é de fundamental importância para a qualidade da junta soldada.



Resumindo, a melhor condição de solda foi obtida com a energia de 2,0 Joules, onde a poça de solda uniu a lâmina fina superior e a base espessa com mínima concavidade na superfície do cordão de solda e uma relação entre a linha de conexão e a profundidade do cordão próxima de 1. Não foram observadas mordeduras, porosidades, vazios e nenhuma evidência de trinca. Isso é atribuído à rápida velocidade de solidificação típica dos processos de soldagem a laser pulsado de Nd:YAG.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente trabalho demonstraram que é possível realizar soldas de revestimento utilizando-se lâminas finas 100 μm de espessura, de aço inoxidável austenítico AISI 316L, sobre uma base espessa, através de um sistema de laser pulsado de Nd:YAG. A melhor junta soldada foi escolhida em função de apresentar uma penetração total livre de descontinuidades. Isso foi observado na amostra soldada com uma energia de pulso de 2,0 Joules, uma taxa de repetição de 39 Hz e uma largura temporal de 4 ms. Isso confirma uma das grandes vantagens da soldagem com laser pulsado, em relação a processos convencionais, que é união com mínimo aporte térmico. O trabalho também mostrou que o processo é muito sensível à presença de gap entre as lâminas da junta, porque o gap dificulta a transferência de calor entre as mesmas. Além disso, foi observada a presença de vazios no metal de solda nas condições obtidas com energia de pulso acima de 2,5 Joules.

A geometria do cordão de solda observada no presente trabalho mostrou que ela depende não somente da energia do pulso, mas também da presença de gap entre as lâminas. A largura do cordão de solda, a largura de união e a profundidade do cordão aumentaram à medida que a energia do pulso aumentou.

O perfil de microdureza mostrou-se praticamente uniforme entre o metal de solda, zona afetada pelo calor e metal de base. Foi observado um ligeiro acréscimo da microdureza do metal de solda e da zona afetada pelo calor em relação ao metal base. Isso foi decorrente do refino da microestrutura da zona de fusão, induzida pelo resfriamento rápido.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro da *FUNDUNESP* – Fundação para o Desenvolvimento da UNESP e do *CNPq* - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

- 1 GILLNER, A., HOLTKAMP, J., HARTMANN, C., OLOWINSKY, A., GEDICKE, J., KLAGES, K., BOSSE, L., BAYER, A., Laser applications in microtechnology. Journal of Materials Processing Technology 167, p.494-498, 2005.
- 2 ABE, N., FUNADA, Y., IMANADA, T., TSUKAMOTO, M., Microwelding of thin stainless steel foil with a direct diode laser. Transaction of JWRI, 34, p.19-23, 2005.
- 3 TOLINSKI, M., Lasers seal the deal in medical. Manufacturing Engineering, 140, 5, p.14-20, 2008.
- 4 ION, J.C., Laser Processing of Engineering Materials, UK, Ed. Elsevier, 2005.
- 5 DULEY, W.W., Laser Welding, USA, Ed. John Wiley & Sons, 1999.
- 6 STEEN, W.M., 2005, Laser Material Processing, USA, Springer, 2005.

- 7 KIM, D.J.; KIM, C.J. AND CHUNG, C.M. , Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 14, p.51-56, 2001.
- 8 BERRETTA, J.R.; ROSSI, W.; NEVES, M.D.M.; ALMEIDA, I.A. AND JUNIOR, N.D.V., Pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels. *Optics and Lasers in Engineering*, 45, p. 960-966, 2007.
- 9 PING, D. AND MOLIAN,P., Q-switch Nd:YAG laser welding of AISI stainless steel foils. *Materials Science & Engineering A*, 486, p.680-685, 2008.
- 10 KAWARITO, Y., KITO, M. AND KATAYAMA, S., In-process monitoring and adaptive control for gap in micro butt welding with pulsed YAG laser. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.40, p.183-190, 2007.
- 11 QUAN,Y.J., CHEN,Z.H., GONG,X.S., YU,Z.H., Effects of heat input on microstructure and tensile properties of laser welded magnesium alloy AZ31. *Materials Characterization*, 59, p.1491-1497, 2008.
- 12 LIAO, Y. AND YU, M. Effects of laser beam energy and incident angle on the pulse laser welding of stainless steel thin sheet. *Journal of Materials Processing Technology* 190, p.102-108, 2007.
- 13 MANONMANI, K., MURUGAN,N. AND BUVANASEKARAN,G. Effects of process parameters on the bead geometry of laser beam butt welded stainless steel sheets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, p.1125-1133, 2007.
- 14 MOLIAN, P.A. Solidification behaviour of laser welded stainless steel. *Journal of Materials Science Letters*, 4, p. 281-283, 1985.
- 15 ABDEL, M.B., Effect of laser parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels. *Materials Letters* 32, p.155-163, 1997.