

# Influência da Energia de Soldagem em Uniões de Lâminas Finas através de Laser Pulsado de Nd:YAG

(Effect of the Heat Input on Pulsed Nd:YAG Laser Welding of Thin Foil)

\*Vicente A. Ventrella<sup>1</sup>, José Roberto Berretta<sup>2</sup>, Wagner de Rossi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista-UNESP, Departamento de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira-SP, Brazil.

ventrella@dem.feis.unesp.br

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN, Centro de Lasers e Aplicações, São Paulo-SP, Brasil.

## Resumo

A soldagem laser vem sendo utilizada como um importante processo de manufatura. Ela pode ser utilizada tanto no modo contínuo quanto no modo pulsado. No processo onde se utiliza laser pulsado é possível realizar soldas de costura em lâminas finas, através da sobreposição dos pulsos. Nesse caso a velocidade de soldagem é definida pela taxa de sobreposição, taxa de repetição e diâmetro do pulso. A soldagem de sobreposição de lâminas finas apresenta problemas típicos como distorção excessiva da junta soldada, falta de contato entre as lâminas a serem soldadas (presença de um gap de ar), perfuração da junta e presença de altos níveis de tensões residuais. O processo de laser pulsado é preferido em relação ao processo por laser contínuo, pois ele possibilita um melhor controle da energia de soldagem. O presente trabalho estudou a influência da energia do pulso, no caso processo de soldagem laser Nd:YAG, na soldagem de lâminas finas (100µm) 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 1,0 a 2,25 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 e ensaios de tração. 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 com boas propriedades mecânicas e livres de descontinuidades. O limite de resistência da junta soldada aumentou no início e depois sofreu um pequeno decréscimo em função do aumento da energia do pulso. O processo mostrou-se muito sensível à presença de gap entre as lâminas.

**Palavras-chave:** soldagem laser; Nd:YAG; aço inoxidável austenítico; AISI 316L.

**Abstract:** Laser beam welding has been used widely as an important manufacturing process. It can be performed using either pulsed or continuous lasers. A pulsed laser can be used to create weld seams in thin foils by means of overlapping pulses. Typical problems in lap joint welding of thin foils for sealing components in corrosive environment applications include excessive distortion, absence of intimate contact between couple, melt drop through and high level of residual stress. Pulsed laser processing is expected to be the method of choice because it allows more precise heat control compared with continuous laser processing. Experimental investigations were carried out using a pulsed neodymium: yttrium aluminum garnet laser welding to examine the influence of the pulse energy in the characteristics of the weld fillet. The pulse energy was varied from 1.0 to 2.25 J at an increment of 0.25 J and 4 ms pulse duration. The base material used for this study was the AISI 316L stainless steel foil with 100µm thickness. The welds were analyzed by optical microscopy, tensile shear tests and micro hardness. The results indicated that pulse energy control is of considerable importance for thin foil weld quality since it can generate good mechanical properties and discontinuities free weld joints. The ultimate tensile strength of the welded joints increased at first and then decreased with the pulse energy increasing. The process showed very sensitive to the gap between couple.

**Key-words:** laser welding; Nd:YAG; austenitic stainless steel; AISI 316L.

## 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

---

(Recebido em 20/01/2010; Texto final em 24/06/2010).

Artigo originalmente publicado no CONSOLDA 2009,

Piracicaba, SP, Outubro de 2009.

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 materiais 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 de 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 [ $d_b$ ] e velocidade de soldagem [ $v$ ] determinam o modo de soldagem, que pode ser condução ou convecção [4,5,6].

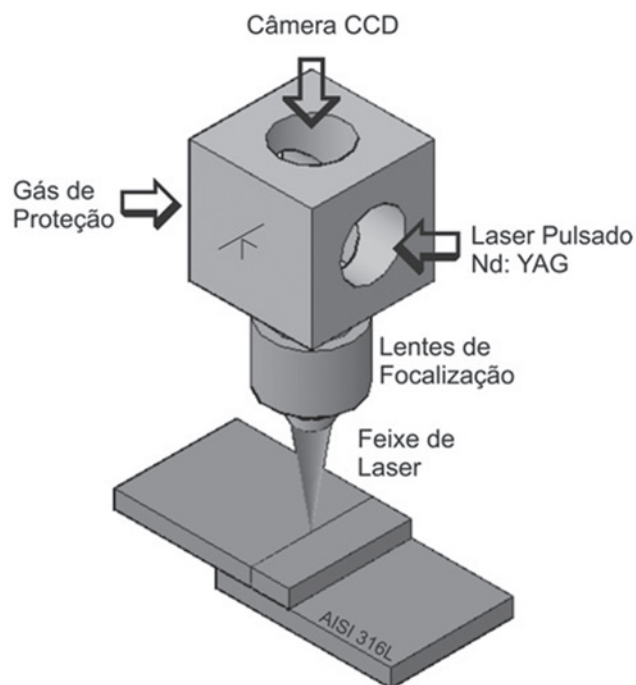
Tem sido observado na literatura pesquisas com soldagem laser de Nd:YAG nos modos contínuo, pulsado, com chapas dissimilares e chapas revestidas. Kim D.J. et al. [7] utilizando um laser pulsado de Nd:YAG obteve bons resultados na soldagem do Inconel 600, utilizado em componentes tubulares de usinas nucleares. Berretta, J.R. et al. [8] utilizando um laser pulsado de Nd:YAG estudou a soldagem de juntas dissimilares de aço inoxidável austenítico AISI 304 e aço inoxidável martensítico AISI 420. Ping, D. e Molian, P. [9] utilizou um sistema laser pulsado de Nd:YAG com largura temporal de nanossegundos para soldar laminas finas com 60  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  de espessura. Foi estudado o efeito da energia do pulso de soldagem nas características microestruturais e mecânicas da junta soldada, buscando a obtenção de uma junta com boas propriedades mecânicas e livres 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  $\mu\text{m}$  de espessura. As amostras foram cortadas na dimensão 20mm x 44.5mm. 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 discontinuidades e propriedades mecânicas. 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 do aço AISI 316L (% em peso)**

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

Para avaliar a influência da energia do pulso, as lâminas foram posicionadas na condição de junta sobreposta. Elas foram soldadas com feixe de diâmetro de 0,2 mm e ângulo de 90°. A energia do pulso ( $E_p$ ) variou de 1.0 to 2.25 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 (Figura 2) 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. Não foi necessária uma proteção de argônio na raiz da solda. Após a soldagem as amostras foram cortadas e preparadas para os ensaios de tração (Figura 3). Posteriormente, foi realizada uma preparação 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 óptico e um software de análise de imagem. A Figura 4 mostra uma ilustração esquemática da secção transversal da junta com os parâmetros geométricos a serem analisados.

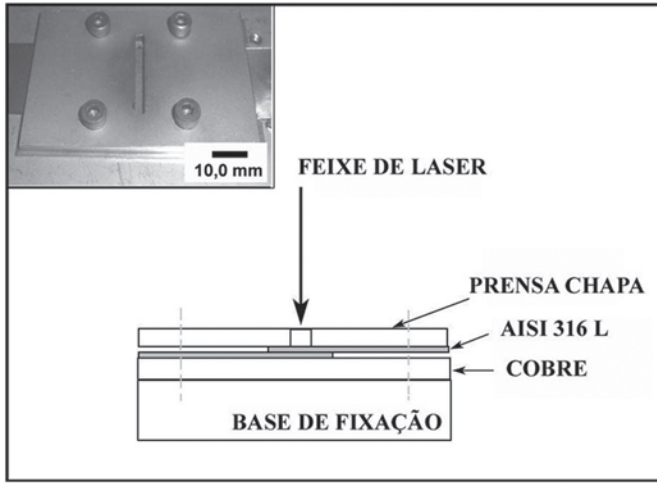


Figura 2. Esquema do dispositivo de fixação das amostras de lâmina fina.

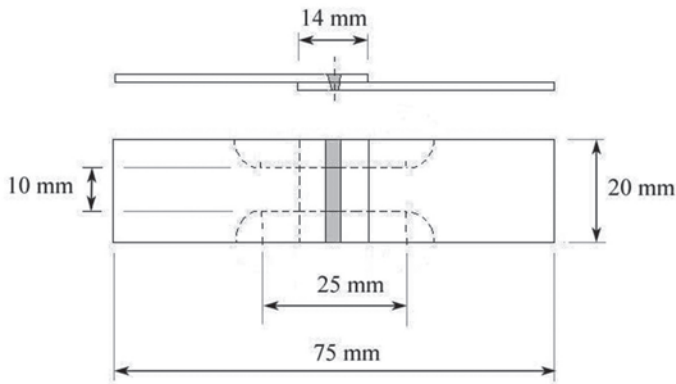


Figura 3. Configuração da junta para extração dos corpos de prova.

As propriedades mecânicas das juntas soldadas foram avaliadas através de ensaios de microdureza Vickers (HV10) e

ensaios de tração. As medidas de microdureza foram realizadas 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. As amostras para os ensaios de tração tiveram a sua largura reduzida para 10,00 mm afim de que uma menor carga fosse necessária para rompê-las.

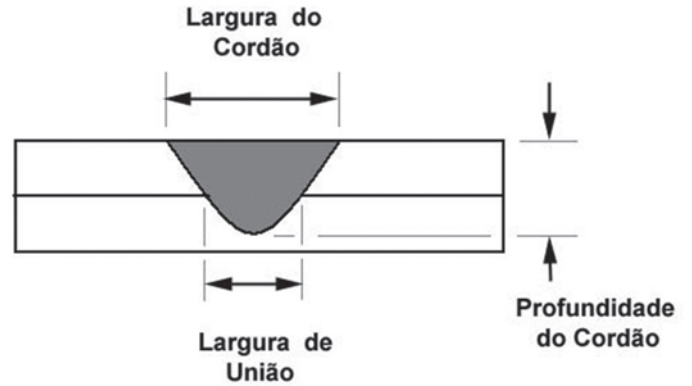


Figura 4. Ilustração esquemática da secção transversal da junta [mm].

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 5a mostra uma junta sobreposta de lâmina fina (100  $\mu\text{m}$ ) de aço AISI 316L soldada com  $E_p = 1.5 \text{ J}$  e laser pulsado de Nd:YAG. As Figuras. 5b e 5c mostram a junta preparada para o ensaio de tração. É evidente no detalhe da Figura 5b a ausência de qualquer defeito na superfície do cordão de solda e adjacências. Do ponto de vista de análise visual, as melhores condições de soldagem foram obtidas com amostras soldadas com energia do pulso de 1,5 a 1,75 Joules. 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

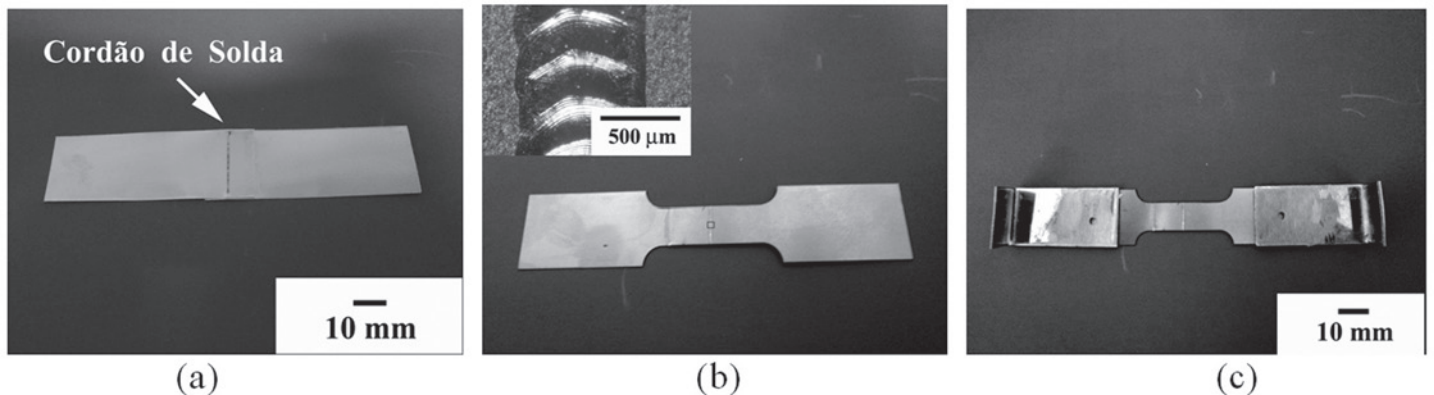


Figura 5. Amostra soldada (a), cortada (b) e preparada para ensaio de tração (c).

problema crítico em soldagem laser, o qual resulta em junta de baixa qualidade. Todas as amostras foram soldadas no modo de condução.

A Figura 6 mostra macrografias da seção transversal das juntas sobrepostas soldadas com laser pulsado com diferentes energias ( $E_p$ ). Observa-se nas Figuras 6a e 6b (amostras soldadas com energia de 1,0 e 1,25 Joules, respectivamente), que o metal de solda fundido não penetrou na lâmina inferior e não apresentou concavidade superficial, típica de processos autógenos. Este fato ocorreu devido à baixa energia de soldagem. Observa-se também nessas macrografias a presença de um gap entre as lâminas, fato que pode ter contribuído com a falta de penetração. A presença de um gap, na linha de conexão, entre as lâminas pode atuar também como um concentrador de tensão nessa região, o que pode reduzir a resistência mecânica da junta. Kawarito et al. [10] observou que quanto maior o gap entre os elementos a ser soldados, 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 as amostras 6a e 6b. Analisando-se as amostras com energia de pulso de 1,5 e 1,75 Joules observou-se que essas amostras apresentaram uma linha de conexão, isto é, uma região com metal fundido entre elas, caracterizando-se portanto a união entre as lâminas, conforme mostra as macrografias das Figuras. 6c e 6d. Observa-se também nessas macrografias que essas amostras não apresentam concavidade na superfície do cordão de solda e nem excesso de material na região da raiz. As profundidades dos cordões de solda observadas foram 133 e 200  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Nessas condições as amostras apresentaram uma penetração do metal líquido na lâmina inferior e bom contato entre as mesmas, garantindo uma condição ideal para a soldagem por costura de lâminas finas sobrepostas. Nas Figuras 6e e 6f (amostras soldadas com energia de 2,0 e 2,25 Joules, respectivamente) observa-se um aumento na concavidade da superfície do cordão e da penetração do mesmo. A concavidade e penetração aumentaram proporcionalmente com o aumento da energia do pulso, entretanto observou-se uma deformação das lâminas soldadas devido ao maior aporte de calor na junta.

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 concavidade da superfície do cordão de solda.

Liao, Y. e Yu, M. [11] e Manonmani, K. et al. [12] 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 2,0 Joules. Com energias maiores do que 2,0 Joules observou-se uma concavidade excessiva da superfície do cordão, resultando num excesso de metal líquido na raiz do mesmo. Dessa forma, diminuiu-se a transferência de calor por condução resultando num cordão de

solda ligeiramente mais estreito, conforme visto na Figura 6f.

A relação entre a energia do pulso de soldagem e a geometria do cordão de solda está representada na Figura 7. A largura do cordão aumentou de 480 to 750  $\mu\text{m}$  quando a energia do pulso aumentou de 1,0 para 2,0 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 da lâmina inferior, caracterizando a soldagem laser por condução. Quanto maior a energia do feixe maior a largura do cordão, entretanto quando a energia do pulso é muito elevada o metal líquido passa através da raiz da junta e, uma menor massa líquida transfere calor para o metal base, resultando em um cordão mais estreito, conforme observado na Figura 6f.

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.

A falta de fusão entre os elementos da junta sobreposta foi observada somente nas soldagens com energia de pulso menor do que 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 2,25 Joules sofreram perfuração do cordão de solda. 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  $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$ .

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 extensão da ZAC da lâmina superior é maior do que a da lâmina inferior, conforme observado nas Figuras 8a e 8b. Este fenômeno é fortemente dependente 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 8 mostra macrografias da ZAC das lâminas superior e inferior da junta soldada com energia de pulso de 2,25 Joules. Como pode ser observado, os grãos da ZAC são grosseiros e a largura da ZAC registrada foi de 50 e 25  $\mu\text{m}$ , nas lâminas superior e inferior, respectivamente. Este fato, observado em lâminas finas, parece contradizer com ZAC estreita, característica dos processos de soldagem laser. A largura da ZAC das lâminas superior e inferior são diretamente proporcionais a variação da energia do pulso, entretanto com energia de pulso muito elevada ocorre um excesso de material fundido na raiz da junta, fato que diminui a extensão da ZAC no restante do metal de solda.

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 de solidificação é determinada pela razão  $G/R$  ( $G$  = gradiente de temperatura,  $R$  = Taxa de crescimento) durante a

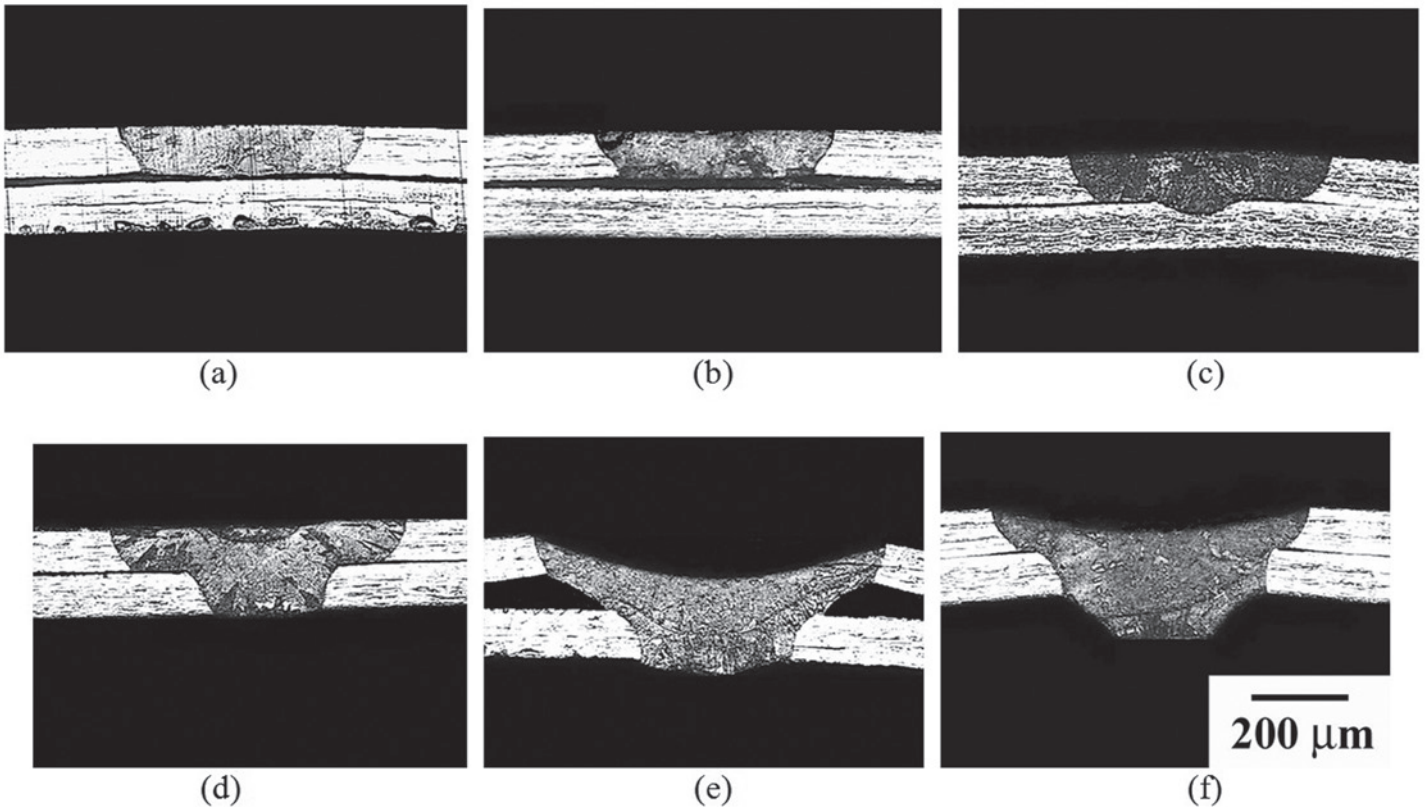


Figura 6. Seção transversal das juntas soldadas com laser pulsado de Nd:YAG com diferentes energias de pulso ( $E_p$ ). a) 1,0 J, b) 1,25 J, c) 1,50 J, d) 1,75 J, e) 2,0 J e f) 2,25 J.

solidificação. As estruturas com crescimento celular formam-se preferencialmente às estruturas dendríticas se  $G/R$  for alto [13].

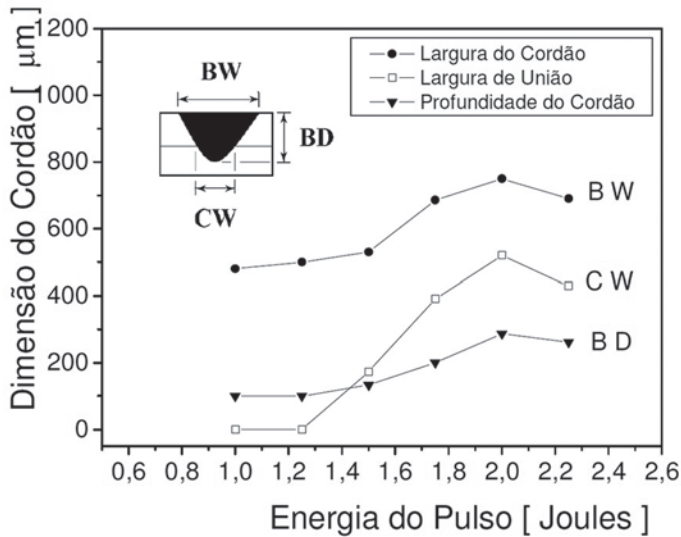
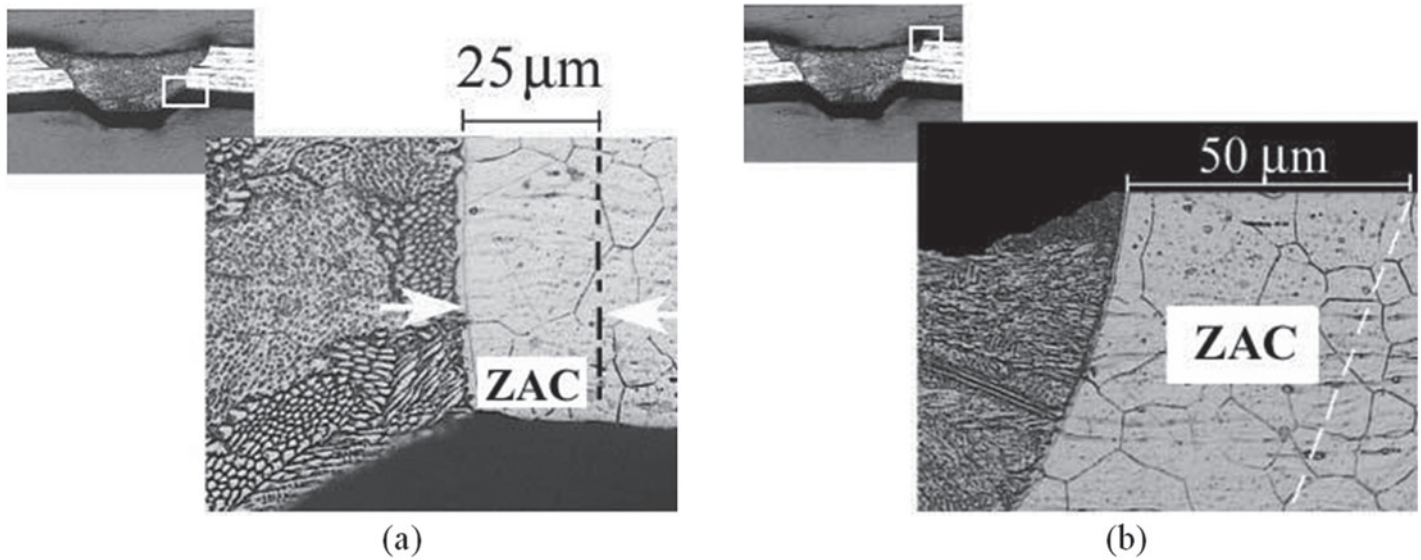


Figura 7. Relação entre a energia do pulso [ $E_p$ ] e a geometria do cordão.

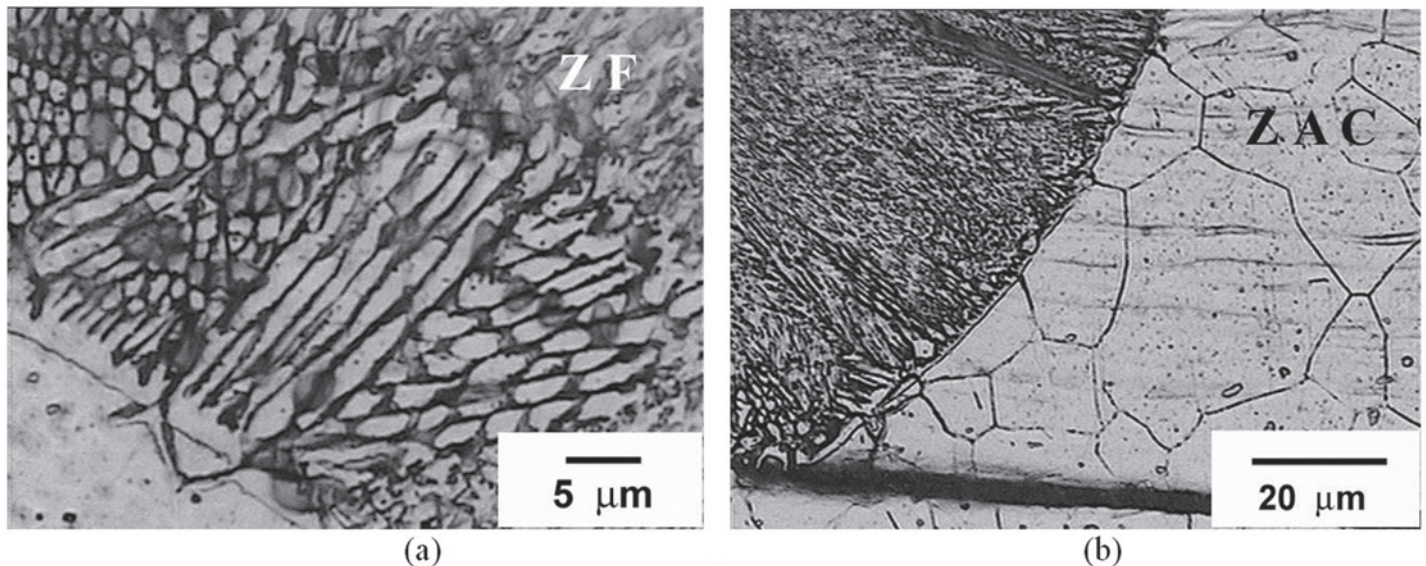
A Figura 9 mostra microestruturas típicas da junta soldada do aço inoxidável austenítico 316L. A Figura 9a mostra a estrutura de solidificação da linha de fusão da lâmina superior, onde pode

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 9b mostra a microestrutura da ZAC onde pode ser visto o efeito do gradiente térmico nessa região. 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.

Todas as amostras romperam em uma região da ZAC próxima ao metal de solda da lâmina superior. Isso era esperado pois sabe-se que as propriedades de dureza e resistência à tração estão relacionadas. O limite de resistência à tração seguiu uma tendência crescente, com o aumento da energia do pulso, e decrescente no final. A relação entre limite de resistência à tração e energia do pulso é mostrada na Figura 10. As amostras submetidas a energia do pulso menor do que 1,5 Joules não foram unidas, pois a energia do pulso era extremamente baixa e, a poça líquida não teve tempo suficiente para fundir a lâmina inferior. Por outro lado, quando a energia do pulso foi superior a 1,75 Joules ocorreu uma concavidade excessiva da superfície do cordão e um excesso de material fundido na raiz da junta soldada. Energia de pulso superior a 2,25 Joules resultou em



**Figura 8. Zona afetada pelo calor na lâmina superior (a) e na lâmina inferior (b) da junta. (amostra soldada com 2,25 Joules).**



**Figura 9. Microestrutura típica da zona de fusão (a) e da ZAC (b) do aço AISI 316L. (amostra soldada com 1,75 Joules).**

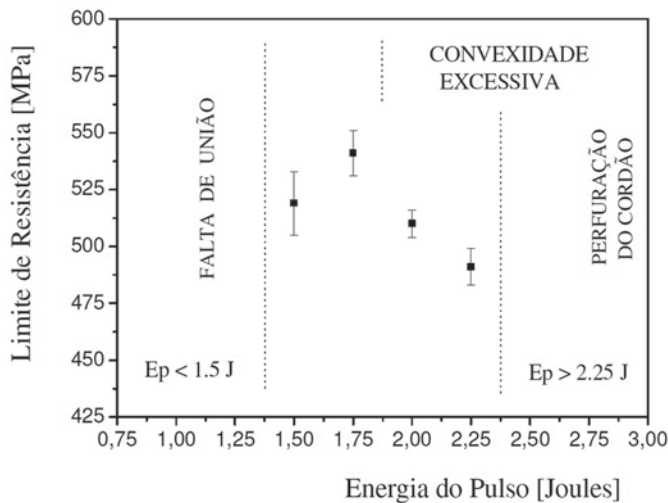
perfurações do cordão de solda. O valor máximo para os ensaios de tração foi obtido na condição de 1,75 Joules, resultando em 95% do limite de resistência do metal base.

Os resultados dos ensaios de tração das juntas soldadas em função da energia do pulso pode ser explicados através de análise macro e microestrutural. Aumentando-se a energia do pulso, os grãos no metal de solda e na zona afetada pelo calor tornam-se grosseiros. A extensão da ZAC também aumenta e as discontinuidades tornam-se mais severas. Alguns precipitados podem estar presentes intergranularmente e ao longo do próprio contorno de grão. Essas mudanças microestruturais contribuem para um enfraquecimento da junta soldada, reduzindo suas propriedades mecânicas, conforme observado na literatura [14].

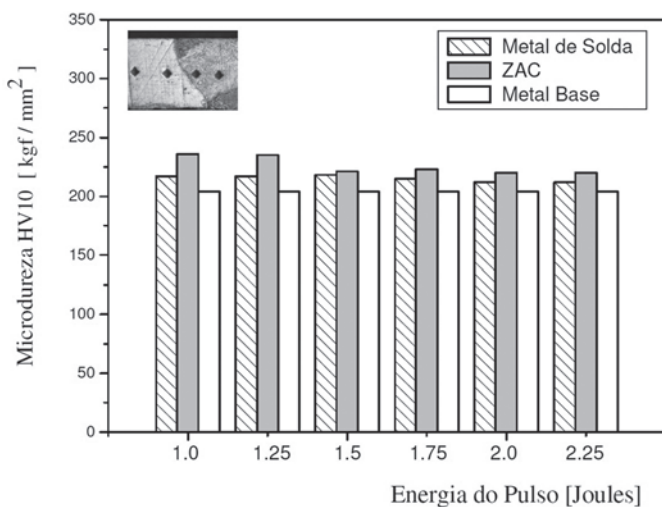
Os perfis de microdureza da zona afetada pelo calor, do metal base e da zona de fusão, em função da energia do

pulso é mostrado na Figura 11. 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 menor 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 [15].

Como pode ser observado na Figura 11, 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 10. Relação entre a energia do pulso e o limite de resistência da junta soldada.**



**Figura 11 Perfil de microdureza Vickers do metal base, ZAC e metal de solda do aço AISI 316L em função da energia do pulso.**

Resumindo, a melhor condição de solda foi obtida com a energia de 1,75 Joules, onde a poça de solda uniu as duas lâminas com mínima concavidade na superfície do cordão de solda e máxima penetração. O limite de resistência da junta soldada atingiu 541 MPa. Não foram observadas mordeduras, porosidades e nenhuma evidência de trinca. Isso é atribuído à rápida velocidade de solidificação típica dos processos de soldagem a laser.

#### 4. Conclusões

Os resultados obtidos no presente trabalho demonstraram que através do controle da energia de soldagem é possível soldar lâminas finas com 100  $\mu\text{m}$  de espessura, de aço inoxidável austenítico AISI 316L, usando um sistema de laser pulsado de Nd:YAG. A melhor junta soldada foi escolhida em função de apresentar uma penetração total livre de discontinuidades

e com boas propriedades mecânicas. Isso foi observado na amostra soldada com uma energia de pulso de 1,75 Joules, uma taxa de repetição de 39 Hz e uma largura temporal de 4ms. 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.

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 e, no final tiveram uma tendência de diminuir devido a um excesso de material fundido na raiz da solda.

O limite de resistência da junta soldada aumentou no início e depois decaiu à medida que a energia do pulso aumentava. A amostra soldada com 1,75 Joules apresentou o maior valor de limite de resistência. Em todas as amostras a ruptura ocorreu na linha de fusão da lâmina superior.

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 e, pela presença de inclusões na zona afetada pelo calor.

#### 5. 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.

#### 6. Referências Bibliográficas

- [1] CAO, X., JHAZI, M., IMMARIGEON, J. P., WALLACE, W., A review of laser welding techniques for magnesium alloys, Journal of Materials Processing Technology 171, p.188-204, 2006.
- [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] DULEY, W.W., "Laser Welding", Ed. John Wiley & Sons, USA, 1999. 251p.
- [5] STEEN, W.M., 2005, "Laser Material Processing", Springer, USA, 2005. 408 p.
- [6] ION, J.C., "Laser Processing of Engineering Materials", Ed. Elsevier, UK, 2005. 556p.
- [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 (2007) 960-966.
- [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] 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.
- [12] 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.
- [13] MOLIAN, P.A. Solidification behaviour of laser welded stainless steel, *Journal of Materials Science Letters*, 4, p. 281-283, 1985.
- [14] 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.
- [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.