

MICROSOLDAGEM LASER Nd:YAG PULSADO DE LÂMINAS FINAS DA SUPERLIGA DE NÍQUEL HASTELLOY C-276¹

Vicente A. Ventrella²
José Roberto Berretta³
Wagner de Rossi³

Resumo

O presente trabalho estudou a influência da variação da energia do pulso de soldagem, no caso processo de soldagem laser Nd:YAG, nas características do cordão de solda. Utilizou-se energia de pulso de 1,0 Joules a 2,25 Joules, com incremento de 0,25 Joules e largura temporal de 4 ms. O metal base utilizado neste estudo foi o Hastelloy C-276 na forma de lâminas finas com 100 µm de espessura. 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 tração e 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 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; Liga de níquel; Hastelloy C-276.

PULSED Nd: YAG LASER MICROWELDING OF Ni BASED SUPERALLOY HASTELLOY C-276 THIN FOILS

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 characteristics of the weld fillet. The pulse energy was varied from 1.0 J to 2.25 J at an increment of 0.25 J and 4 ms pulse duration. The base metal used for this study was the Hastelloy C-276 foil with 100 µm thickness. The specimens were laser-welded in an argon atmosphere. The welds were analyzed by optical microscopy, tensile shear tests and Vickers 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; Ni alloy; Hastelloy C-276.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Universidade Estadual Paulista-UNESP, Departamento de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, SP, Brasil. 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 desenvolvimento dos materiais metálicos está intimamente associado aos avanços tecnológicos. A necessidade de materiais resistentes ao desgaste, mais tenazes, com maior resistência à corrosão e oxidação, tem sido o impulso para a pesquisa de novos materiais. Originalmente, para esses tipos de aplicações, são utilizados os aços inoxidáveis e aços ligados, porém a exigência de equipamentos com temperaturas de operação cada vez maiores, com maiores potências e mais eficientes, impulsionaram o desenvolvimento das ligas refratárias ou “superligas”. As ligas à base de níquel, como o Hastelloy C-276, têm um papel extremamente importante em várias indústrias, como aeronáutica, automobilística, nuclear, alimentícia, química e petroquímica.

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 radiação 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. 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 com diferentes materiais e geometrias complexas.⁽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 à alta potência do pico de energia envolvido 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 fusão [Φ_b] e velocidade de soldagem [v] determina o modo de soldagem, que pode ser condução ou penetração.⁽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 obteve 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 estudou 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 Hastelloy C-276, com 100 μm de espessura. Foi estudado o efeito da energia do pulso de soldagem nas características estruturais 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 a liga de níquel Hastelloy C-276 na forma de chapas finas com 100 μm de espessura. 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 discontinuidades 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 Hastelloy C-276 (% em peso)

Elementos	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Co	W	Fe
Hastelloy C-276	0,01	15,88	Bal	0,52	0,03	15,64	1,51	3,38	5,35

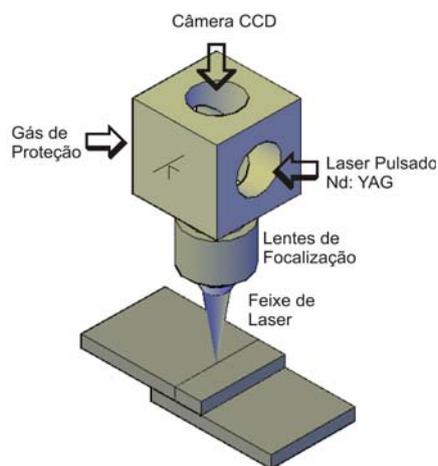


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de soldagem por laser pulsado de Nd:YAG.

Para avaliar a influência da energia do pulso, as lâminas finas com 100 μm de espessura foram posicionadas na condição de junta sobreposta. 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 J a 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 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 químico com reagente: 80 ml de HCl, 4 ml de HNO₃, 1 g CuCl₃ e 20 ml de glicerina. 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 ilustração esquemática da secção transversal da junta com os parâmetros geométricos analisados. As amostras foram mantidas fixas através de um dispositivo o qual proporcionou um bom contato entre as lâminas e com mínima distorção. (Figura 3).

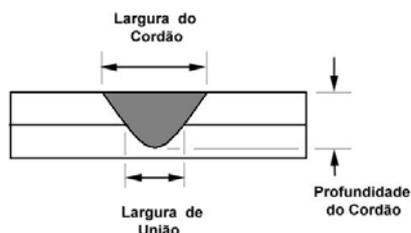


Figure 2. Desenho esquemático da junta soldada.

As propriedades mecânicas das juntas soldadas foram avaliadas através de ensaios de microdureza Vickers e ensaios de tração. As medidas de microdureza foram realizadas na secção transversal da junta soldada, numa direção 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. A Figura 4 mostra uma ilustração esquemática dos corpos de prova para ensaios de tração.

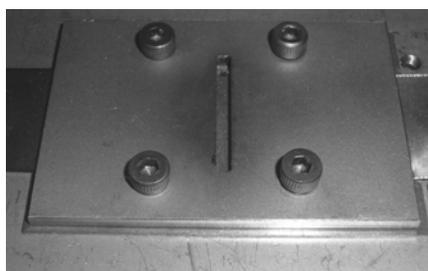


Figura 3. Dispositivo de fixação das amostras de lâmina fina.

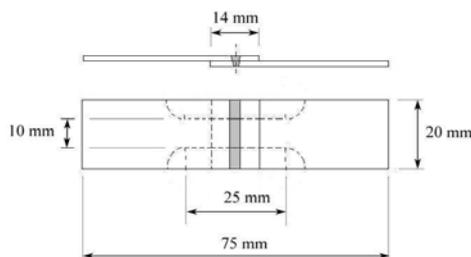


Figura 4. Configuração da junta para extração dos corpos de prova.

3 RESULTADOS

A Figura 5a mostra uma junta sobreposta de lâmina fina (100 μ m) de Hastelloy C-276 soldado com energia de pulso $E_p = 1,5$ J e laser pulsado de Nd:YAG. É evidente no detalhe macrográfico (Figura 5b) 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 amostras soldadas com

energia do pulso de 1,5 Joules e 1,75 Joules. Nessas condições 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 no metal 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. Todas as amostras foram soldadas no modo de condução.

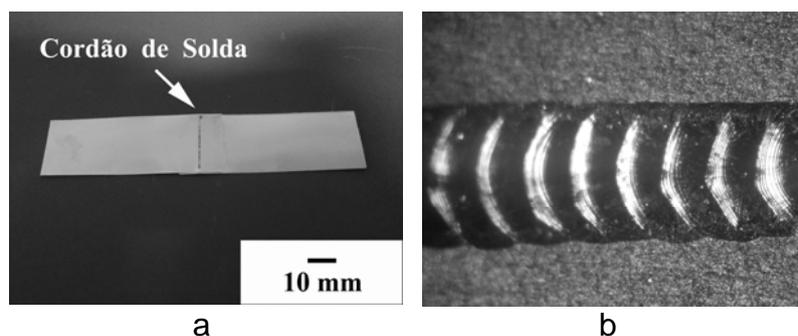


Figura 5. Junta sobreposta soldada com energia de 1,5 Joules (a) e detalhe do cordão de solda (b).

A Figura 6 mostra macrografias da secção 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 Joules 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, 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 essas amostras. Analisando-se as amostras com energia de pulso de 1,5 Joules 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 (Figuras 6c e 6d). Observa-se também nessas macrografias que essas amostras apresentam pouca concavidade na superfície do cordão de solda e nenhum excesso de material na região da raiz. As profundidades dos cordões de solda observadas foi penetração total. Nessas condições as amostras apresentaram máxima penetração do metal de solda na lâmina inferior e bom contato entre as mesmas (Figura 6d), 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 Joules 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 e Yu⁽¹¹⁾ e Manonmani, Murugan e Buvanasekaran⁽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 (Figura 6f).

A relação entre a energia do pulso de soldagem e a largura do cordão de solda está representada na Figura 7. A largura do cordão aumentou de 511 μm para 778 μm quando a energia do pulso aumentou de 1,0 Joules 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 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 (Figura 6e).

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 2,0 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 a composição do metal base.

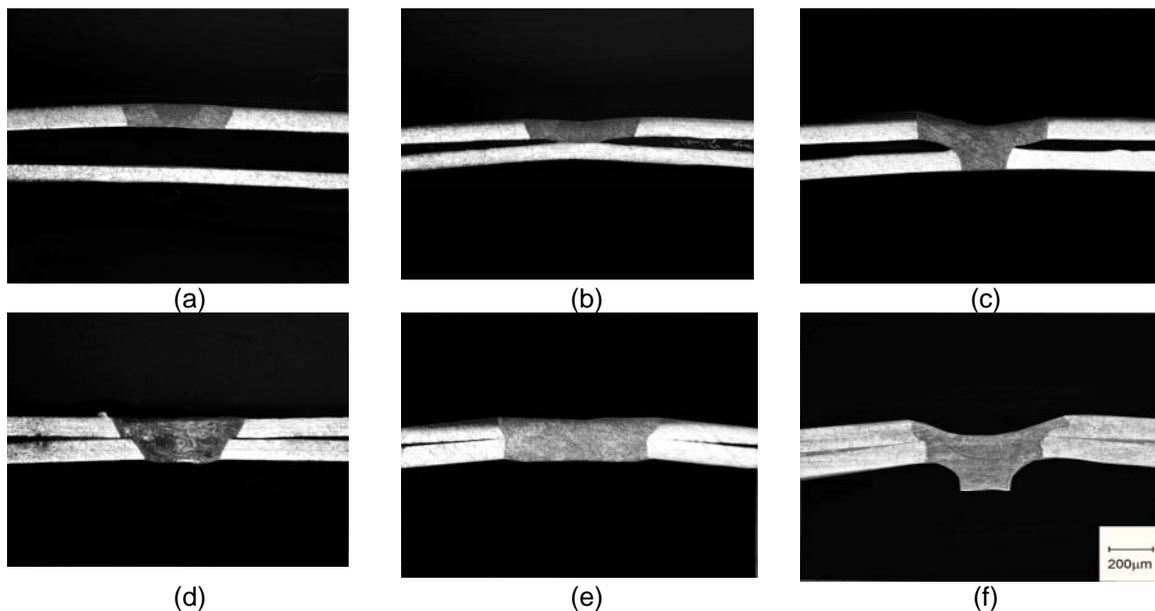


Figura 6. Secção transversal das juntas soldadas com laser pulsado de Nd:YAG com diferentes energias de pulso (E_p). a) 1,0 J , b) 1,25 J , c) 1,5 J , d) 1,75 J , e) 2,0 J e f) 2,25 J.

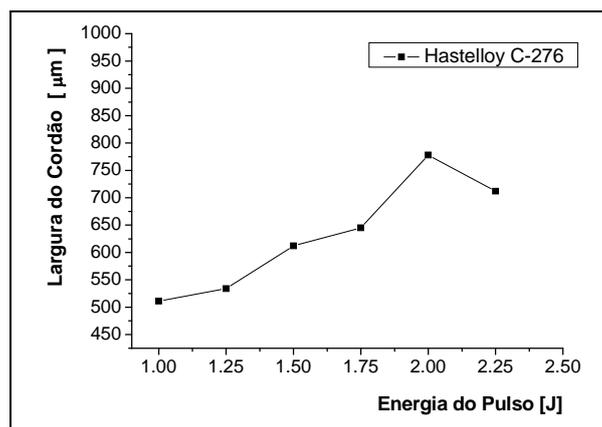


Figura 7. Relação entre a energia do pulso [E_p] e a largura do cordão.

A análise da zona afetada pelo calor (ZAC) das amostras mostrou que a extensão 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 lâmina inferior. 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.

Os perfis de microdureza da zona afetada pelo calor, do metal base e da zona de solda, em função da energia do pulso não sofreu alteração significativa entre as medidas, apenas a microdureza do metal de solda foi ligeiramente superior às demais. A microdureza da ZAC foi sempre menor que as demais. Esses resultados foram registrados para todas as amostras. Isso era esperado pois as propriedades mecânicas em geral são baseadas em suas microestruturas.⁽¹³⁾

Os valores de microdureza Vickers diminuíram discretamente 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. Os valores médios da microdureza Vickers obtidos para o metal base, ZAC e metal de solda, foram 252, 245 e 262, respectivamente.

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 a energia do pulso é mostrada na Figura 8. A amostra submetida a energia do pulso menor do que 1,25 Joules não foi unida, 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 2,0 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 perfurações do cordão de solda. O valor máximo para os ensaios de tração foi obtido na condição de 1,5 Joules, resultando em 82% do limite de resistência do metal base.

Os resultados dos ensaios de tração das juntas soldadas em função da energia do pulso podem 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 descontinuidades 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⁾

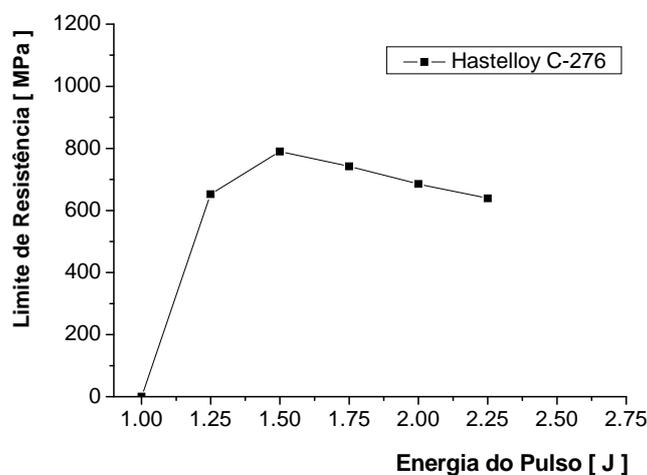


Figura 8. Relação entre a energia do pulso e o limite de resistência da junta soldada.

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 metal de solda.

Liao e Yu⁽¹¹⁾ e Manonmani, Murugan e Buvanasekaran⁽¹²⁾ observaram que na soldagem 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 2,25 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. Este tipo de microestrutura é resultado de altas taxas de resfriamento, típicas de processos de soldagem laser.

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 1,5 Joules, onde a poça de solda uniu as lâminas com mínima concavidade na superfície do cordão de solda e uma linha de conexão próxima a dimensão da espessura da chapa. 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. Além disso, nessa condição obteve-se o maior valor para o limite de resistência da junta soldada, isto é, 780 MPa, correspondendo a 82% do valor referente ao metal base.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente trabalho demonstraram que é possível soldar lâminas finas com 100 μm de espessura, da liga de níquel Hastelloy C-276, usando um sistema de laser pulsado de Nd:YAG. A melhor junta soldada foi escolhida em função de apresentar alta resistência mecânica, boa penetração e livre de discontinuidades. Isso foi observado na amostra soldada com uma energia de pulso de 1,5 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 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 MS, ZAC e MB. 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 1,5 Joules apresentou o maior valor de limite de resistência. Em todas as amostras a ruptura ocorreu na linha de fusão da lâmina superior.



Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro 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 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 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.
- 14 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.