

SOLDAGEM A LASER DE LIGAS DE TITÂNIO

Douglas Ramos da Silva.

Centro de Lasers e Aplicações – Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares
Av. Prof. Dr. Lineu Prestes, 2242
Cidade Universitária, São Paulo - SP
drsilva@ipen.br

Wagner de Rossi, José Roberto Berreta, Nilson Dias Vieira Jr.

Centro de Lasers e Aplicações – Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares
Av. Prof. Dr. Lineu Prestes, 2242
Cidade Universitária, São Paulo - SP
wdrossi@ipen.br

Milton Sérgio Fernandes Lima

Instituto de Estudos Avançados/CTA
Rod. Tamoios km 5,5
São José dos Campos - SP
msflima@gmail.com

Resumo. *Este trabalho tem como objetivo a análise do efeito da atmosfera de proteção, velocidade de soldagem e largura do pulso na solda a laser da liga Ti6Al4V, utilizando um laser pulsado de Nd:YAG (1,06µm) observando a microestrutura, o formato da solda formada e a dureza do material. Foi verificado a formação de compostos de titânio e suas conseqüências, como a formação de fissuras e aumento da zona afetada pelo calor, além da influência da velocidade de soldagem na quantidade de material perdido no processo.*

Palavras-chave: *soldagem a laser, Ti6Al4V, atmosfera de proteção, velocidade de soldagem*

1. INTRODUÇÃO

O titânio e suas ligas têm sido usados em diversas aplicações como a aeroespacial, médica e petroquímica. Sua excelente relação entre resistência mecânica e peso, a alta resistência à corrosão, biocompatibilidade e resistência mecânica em altas temperaturas são motivos pelos quais substitui o alumínio em aplicações onde há temperaturas superiores a 180°C, e fazem com que seja um material muito utilizado.

A liga Ti6Al4V, uma liga do tipo $\alpha+\beta$ ⁽¹⁾ e uma das mais utilizadas, possui uma alta reatividade com o oxigênio e o nitrogênio a altas temperaturas. Nos processos de fabricação mecânica com estes materiais envolvendo aumento da temperatura, é preciso utilizar uma atmosfera de proteção. Na maioria dos casos é utilizado o argônio ou o hélio, já que o material também é reativo a outros gases comumente utilizados como o nitrogênio ou gás carbônico⁽²⁾.

Na usinagem a laser sabe-se que a atmosfera de proteção tem uma grande influência na microestrutura formada^(3,4) e na soldagem a laser a natureza do gás de proteção considerada um dos fatores mais significativos para a natureza do material formado⁽⁵⁾.

Já a velocidade de soldagem é um dos parâmetros decisivos na qualidade da solda, determinando o formato do cordão (largura e profundidade⁽⁶⁾) e a extensão da zona afetada pelo calor.

2. SOLDAGEM A LASER

A soldagem a laser, devido ao grande volume de trabalhos e conseqüente avanço ao longo dos últimos anos, se constitui em uma das operações a laser mais importantes⁽⁷⁾. O processo na focalização de feixe laser sobre a junta de duas placas, que são aquecidas até seus pontos de fusão e, em seguida resfriadas após a saída do feixe.

Vários parâmetros devem ser levados em conta na soldagem a laser, entre eles podemos destacar a velocidade de soldagem, a largura temporal do pulso, a freqüência destes pulsos, a taxa de sobreposição (que depende dos 3 fatores anteriores), o gás de proteção, o fluxo do gás de proteção, o bocal de distribuição do gás, a distância do bocal até a superfície e a posição do foco em relação à superfície das amostras a serem soldadas⁽⁶⁾.

A intensidade do feixe na superfície das amostras, que depende da potência do laser e da posição do foco relativa à superfície, determina o modo de soldagem utilizado. Existem dois tipos de soldagem a laser, a soldagem por condução e por penetração (*keyhole*).

Na soldagem por condução o material é aquecido até fundir e a energia do laser não é suficiente para evaporar o material⁽⁷⁾. A energia do pulso é transmitida para o resto do material por condução de calor na poça fundida. A figura 1⁽⁷⁾ mostra como isto ocorre.

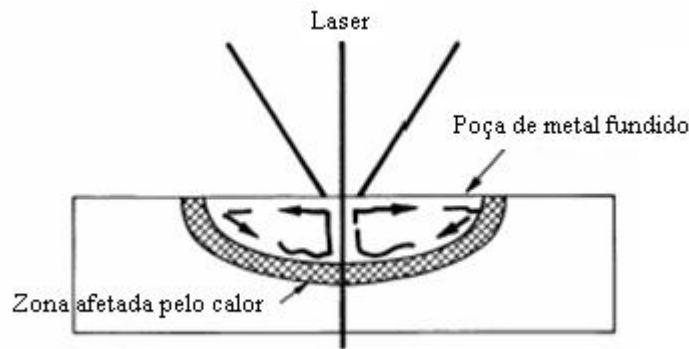


Figura 1 – Soldagem a laser de condução

Este modo de soldagem tem a desvantagem de possuir uma penetração limitada, o que pode prejudicar as propriedades mecânicas da solda.

Na soldagem por penetração o feixe tem intensidade suficiente para provocar a evaporação no centro da poça fundida. Isto leva ao chamado *keyhole*, um canal formado por vapor e plasma (do gás de proteção e do metal) o que aumenta a razão entre a largura e a profundidade da solda. Este modo de soldagem é muito utilizado quando é preciso atingir maiores profundidades de penetração^(9,10).

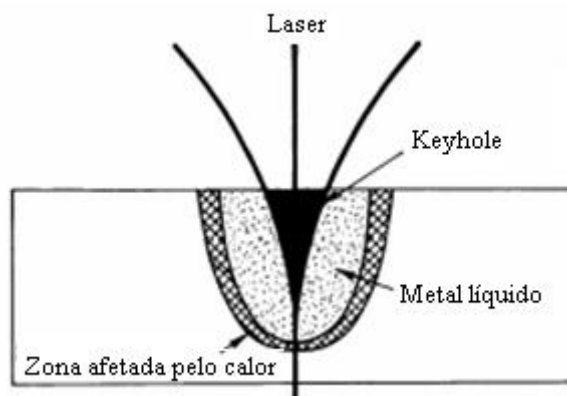


Figura 2 – Soldagem a laser de penetração

2.1. Soldagem a laser de ligas de titânio

À temperatura ambiente o titânio apresenta uma estrutura hexagonal compacta, a qual é referida como sendo sua fase α . A aproximadamente 980°C, esta fase α sofre uma transformação alotrópica e passa para uma estrutura cúbica de corpo centrado, conhecida como fase β ⁽¹¹⁾.

Na soldagem a laser ocorre um resfriamento rápido da poça líquida para a temperatura ambiente. No titânio este resfriamento irá produzir uma estrutura acicular (α acicular), similar em aparência com a martensita produzida nos aços.

Com o aumento da temperatura, o titânio torna-se altamente reativo, sendo sujeito a fragilização severa por uma quantidade pequena de impurezas, especialmente nitrogênio, oxigênio, carbono e hidrogênio.

O oxigênio e o nitrogênio diminuem a ductilidade da solda e podem causar o aparecimento de micro fissuras na parte soldada e na zona afetada pelo calor. Estas fissuras são atribuídas a tensões provocadas pelo endurecimento por solução sólida⁽¹¹⁾.

Sendo assim, o uso de uma atmosfera de proteção devida é indispensável para se obter uma boa solda com o titânio. Para tal, usa-se de gases inertes, como o hélio e o argônio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma chapa de Ti6Al4V de 1 mm de espessura foi utilizada para os testes de soldagem. Seis cordões de solda foram feitos nesta chapa sem a presença de uma junta com as seguintes condições:

Tabela 1 - Condições de soldagem utilizadas

Condição	Fluxo (l/min)	Atmosfera	Velocidade (mm/min)	tp (ms)	f (Hz)
1	3	Argônio	100	7	11
2	3	Argônio	100	4	11
3	0	Ar	100	7	11
4	0	Ar	100	4	11
5	3	Argônio	50	4	11
6	3	Argônio	50	7	11

As condições 3 e 4, que não tinham atmosfera de proteção, serviram de referência para estabelecer um parâmetro de melhora no nível de contaminação das soldas e de suas propriedades mecânicas.

Sabe-se que dependendo do nível de contaminação de oxigênio na liga Ti6Al4V, esta se apresentará com uma coloração diferenciada⁽⁸⁾, indo do prata, que indica uma solda sem contaminação, até o azul, que indica uma alta concentração de oxigênio.

As amostras foram devidamente polidas e atacadas com o reagente de Keller: 2ml de HF, 10ml de HNO₃ 88ml de H₂O^(12, 13).

Foram tiradas fotos utilizando microscopia eletrônica no CCTM (Centro de Ciências e Tecnologia dos Materiais) do IPEN para analisar a microestrutura formada em cada solda. Com o auxílio de um programa editor de imagens, foi possível medir o formato das soldas para a análise da influência dos parâmetros utilizados na zona afetada pelo calor, profundidade da poça fundida e cavidade formada.

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado apenas para duas amostras com diferentes condições de atmosfera, para que fosse possível visualizar a influência desta nas propriedades mecânicas da solda. Estas medidas foram realizadas no Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

4. RESULTADOS

4.1. Formato da solda

A seguir temos duas fotos das superfícies da chapa onde foram obtidos os cordões de solda a laser:

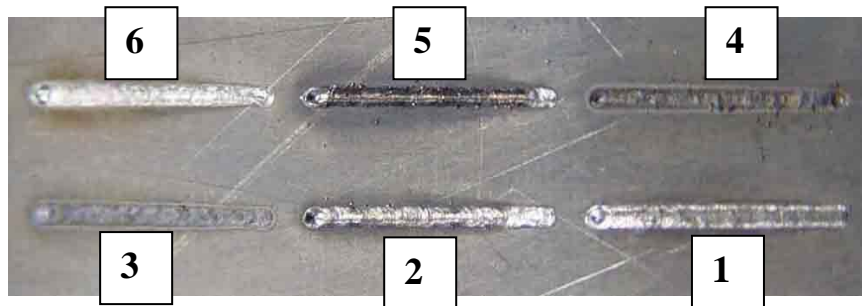


Figura 3 – Aspecto da parte superior da chapa de Ti6Al4V após os testes

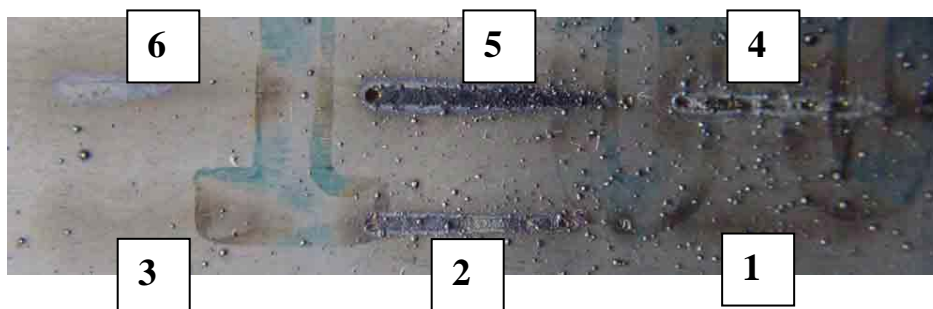


Figura 4 – Aspecto do verso da chapa de Ti6Al4V após os testes

A seguir têm-se os valores da zona afetada pelo calor e da cavidade formada pela solda (daquelas que tiveram penetração total) ou a profundidade da poça fundida (PPF) (daquelas que tiveram apenas penetração parcial). Os valores estão em micrometros.

Tabela 2 – Valores da extensão da zona afetada pelo calor, cavidade formada pela solda e profundidade da poça fundida em micrometros.

	Condição					
	1	2	3	4	5	6
ZAC	78	74	130	138	93	102
PPF	781	-	681	-	-	798
Cavidade	-	96	-	88	155	-



Figura 5 – Microscopia óptica da seção transversal das soldas feitas

4.2. Ensaio de microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado nas amostras 2 e 4, pois estas apresentaram soldas com penetração total e também porque os parâmetros se diferenciam apenas pela atmosfera de proteção (ver tabela 1). Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos a seguir, onde o ponto 0 localiza-se 600 micrometros à esquerda do centro da amostra e as medidas foram feitas para 3 profundidades (medidas a partir da superfície): 200 μm , 500 μm e 900 μm . A carga utilizada no ensaio foi de 50g.

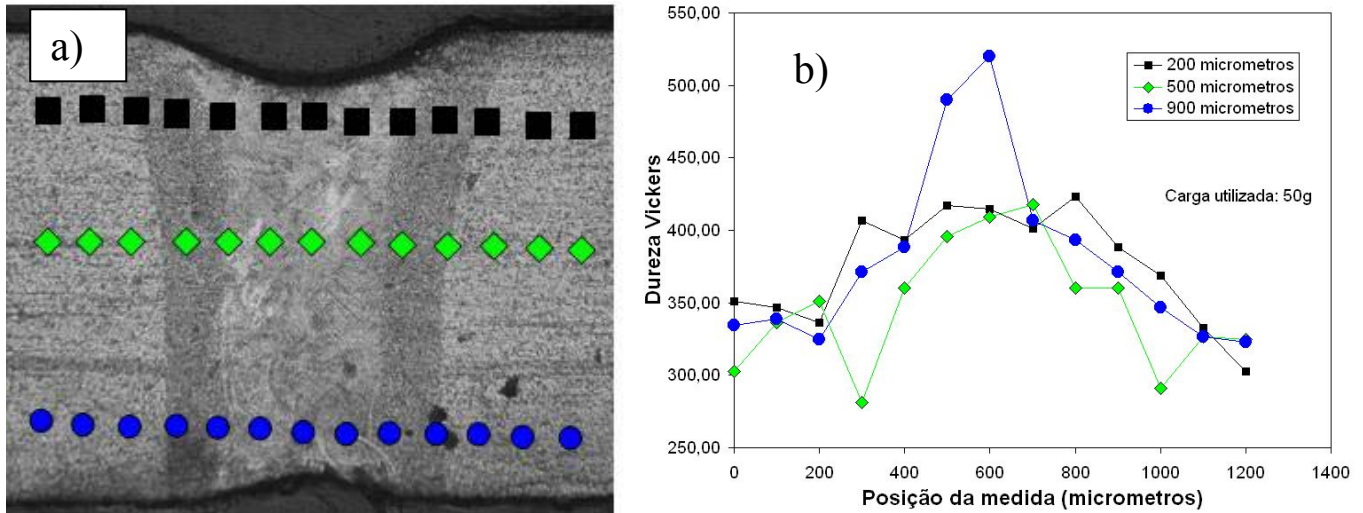


Figura 6 – Resultados do ensaio de microdureza da amostra 2: a) pontos analisados; b) Gráfico com os valores medidos

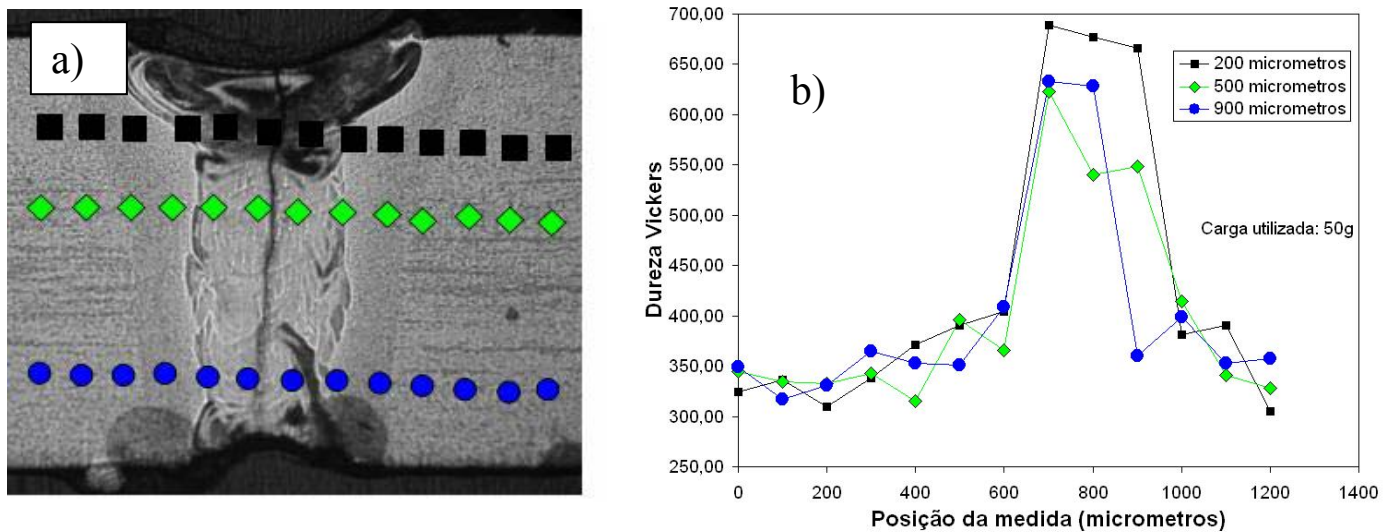


Figura 7 – Resultados do ensaio de microdureza da amostra 4: a) pontos analisados; b) Gráfico com os valores medidos

4.3. Microestrutura formada

As amostras 1, 2, 5 e 6 apresentaram a estrutura martensítica na região da solda que se estende um pouco na zona afetada pelo calor. A seguir tem-se uma fotografia feita com um microscópio eletrônico da zona fundida da amostra 1, onde se pode perceber a estrutura acicular característica da martensita da liga⁽¹⁴⁾.

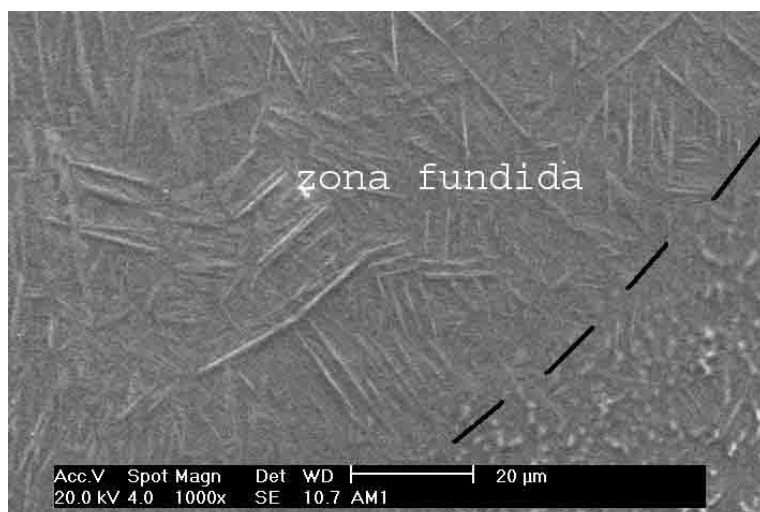


Figura 8 – Estrutura martensítica formada nas soldas

Nas amostras 3 e 4 foram notadas a formação de compostos com crescimento em forma de dendritas e pequenos grãos na zona fundida. A formação de uma estrutura dendrítica já foi associada por outros autores como característica de uma atmosfera de proteção deficiente.

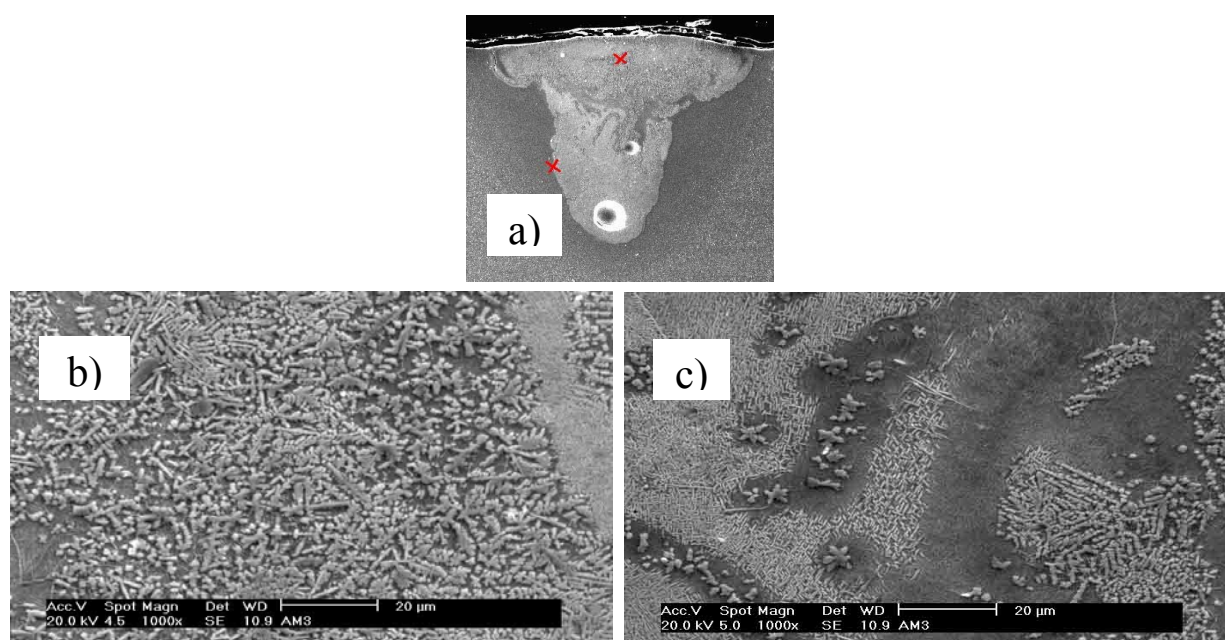


Figura 9 – Estruturas formadas nas soldas 3: a) pontos observados na amostra; 3 b) próximo à superfície; c) próximo à divisória entre a zona afetada pelo calor e zona fundida

As figuras 3 e 4 mostram o nível de oxidação das amostras. Na figura 3, as amostras 3, 4 e 5 apresentam cores mais escuras, sendo que nas amostras 3 e 4 esta cor é mais azul, cor já mostrada em outros trabalhos por estar relacionada com o nível de contaminação por oxigênio⁽⁸⁾. A coloração escura da amostra 5 pode ser explicada pela menor velocidade e uma menor largura de pulso utilizada.

Na figura 4, onde temos o verso da chapa, todas as amostras que apresentaram penetração total apresentaram coloração alterada, devido à falta de proteção da raiz do cordão de solda.

5. DISCUSSÃO

A seguir é apresentada uma discussão sobre a influência da largura temporal do pulso laser, velocidade de soldagem e atmosfera de proteção sobre as soldas obtidas.

5.1. Largura temporal do pulso laser

Todas as amostras irradiadas com um pulso de 7ms não apresentaram penetração total da chapa. Nessas condições obteve-se uma solda de condução, que em uma situação real de solda, ou seja, com duas amostras sendo unidas, não possui a mesma resistência que em uma solda de penetração total. Já as amostras com pulso de 4ms tiveram penetração total nas chapas, tornando este tempo de pulso mais adequado para efetuar a soldagem do material, nas condições estabelecidas.

Isto se deve basicamente à diferença da intensidade resultante sobre o metal. A formação do *keyhole* nas soldas realizadas com larguras temporais de 4ms resultou em uma solda com penetração total, porém com perda de material, o que provocou a formação da cavidade.

5.2. Velocidade de soldagem

Nos testes foram utilizadas duas velocidades diferentes: de 100mm/s e de 50mm/s. As amostras com velocidades de soldagem de 100mm/s apresentaram um valor de zona afetada pelo calor de 78 μ m e 74 μ m respectivamente (tabela 1). Com a diminuição da velocidade, teve-se um aumento da zona afetada pelo calor para 93 μ m e 102 μ m.

Nas amostras 2 e 5, onde se obteve soldas de penetração total, as cavidades formadas nas partes superior e inferior da solda tiveram valores médios de 96 μ m e 155 μ m respectivamente. Isto mostra que a diminuição de velocidade de soldagem acarreta em uma maior perda de material, e, portanto, uma solda menos resistente. Entretanto, não provoca mudanças significativas nas amostras que não apresentaram penetração total.

5.3. Atmosfera de proteção

Existe uma coloração diferente da parte de baixo do cordão das soldas devido à formação de óxidos e nitretos de titânio. Sendo assim, será utilizado para estudos posteriores uma atmosfera de proteção também na parte de baixo do cordão (*back-shielding*).

As amostras sem a atmosfera neutra de proteção apresentaram uma zona afetada pelo calor quase duas vezes maior do que aquelas que foram protegidas (tabela 1). Uma das possíveis explicações para isto é o fato de reações ocorridas durante o processo, como a formação de TiO₂, serem exotérmicas e também por provocarem uma mudança no valor da absorção do laser na superfície⁽¹⁵⁾.

O ensaio de microdureza mostrou um aumento significativo da dureza da solda, devido provavelmente à formação de martensita e nitreto de titânio. Os resultados sugerem que devido ao plasma formado e um posterior movimento de convecção do fluido na poça fundida, o oxigênio e o nitrogênio do ar estão presentes por toda a profundidade da solda.

Na amostra com atmosfera de proteção, o aumento de dureza nas profundidades de 200 μ m e 500 μ m era esperado devido à microestrutura formada pelo esfriamento rápido do material (martensita). Porém, percebe-se nesta mesma amostra um aumento significativo de dureza a 900 μ m, onde já não se tinha mais influência da atmosfera de proteção, o que justifica o próximo passo do trabalho.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados iniciais obtidos na soldagem a laser da liga Ti6Al4V. A largura temporal do pulso laser apresentou influência apenas no tipo de soldagem que ocorreu (por condução ou *keyhole*).

A velocidade de soldagem mostrou ter influência sobre a zona afetada pelo calor e principalmente na perda de material das soldas que obtiveram penetração total. Tudo isto é devido

ao acúmulo de calor em uma certa região por um tempo maior. Estudos serão feitos para determinar uma condição de máxima velocidade para para minimizar estes efeitos sem prejudicar a proteção da atmosfera neutra.

A atmosfera de proteção mostrou-se necessária não apenas na parte superior do metal, onde ocorre a interação com o laser, mas também na parte inferior, onde apresentou valores altos de dureza e, portanto, valores baixos de resistência mecânica.

Uma solda com atmosfera de proteção deficiente poderá provocar aumentos nos valores de dureza por toda a sua extensão, devido provavelmente à formação do plasma.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPQ pelo processo 410156/2005-4 e à CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

8. REFERÊNCIAS

1. KORNILOV, I. I., **Titanium and Titanium Alloys**, Publication n.10, 1963.
2. PHILIPS, A.L., *Welding Handbook*, 5ª edição, vol.4 – **Metals and their weldability**, Macmillan London, 1966.
3. ALMEIDA, I. A., ROSSI, W., LIMA, M. S. F., BERRETTA, J. R., MORATO, S. P. *Corte de Titânio por Laser Pulsado de Neodímio:YAG* In: Anais do XXIX CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, São Paulo. 2003. p.CT11.
4. ALMEIDA, I. A., ROSSI, W., LIMA, M. S. F., BERRETTA, J. R., NOGUEIRA, G.E.C., WETTER, N.U., VIEIRA JR., N.D., Otimização do Corte do Titânio pela Análise Fatorial dos Parâmetros do Laser Pulsado de Nd:YAG. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Florianópolis (SC). Anais do III COBEF: 2005, CD1.
5. GREVEY, D., SALLAMAND, P., CICALA, E., IGNAT, S., Gas protection optimization during Nd:YAG laser welding, **Optics & Laser Technology**, v. 37, p. 647–651, ago/nov. 2005.
6. TZENG, Y., Parametric analysis of the pulsed Nd:YAG laser seam-welding process, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 102, p. 40-47, out. 2000.
7. DUTTA MAJUMDAR, J., MANNA, I., Laser processing of materials, **Sadhana**, v. 28, p. 495-562, jun/ago. 2003.
8. LI, X., XIE, J., ZHOU, Y., Effects of oxygen contamination in the argon shielding gas in laser welding of commercially pure titanium thin sheet, **Journal of Materials Science**, v.40, p.3437-3443, 2005.
9. NIPPES, E. F. (ed), *Metals Handbook*, 9ª ed., vol.6, **Welding, Brazing and soldering**, American Society for Metals, p.647-671, Ohio, 1983.
10. GLOWACKI, M. H., The effects of the use of different shielding gas mixtures in laser welding of metals, **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 28, p. 2051 – 2059, 2005.
11. PHILLIPS, A. L. (ed), *Welding Handbook*, 5ª ed., vol.4, **Metals and their weldability**, Ed. Macmillan, Londres, 1966.
12. ZHANGT, L., GOBBI, S. L., NORRIS, I., ZOLOTOVSKY, S., RICHTER, K. H., Laser welding techniques for titanium alloy sheet, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 65, p. 203-208, ago, 1997.
13. CAIAZZO, F., CURCIO, F., DAURELIO, G., MINUTOLO, F. M. C., Ti6Al4V sheets lap and butt joints carried out by CO₂ laser: mechanical and morphological characterization, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 149, p.546-55, xx/dez. 2003.
14. MEHL, R. F. (ed), *Metals Handbook*, 8ª ed., vol.6, **Atlas of microstructures of industrial alloys**, American Society for Metals, p.321-334, Ohio, 1972.
15. PROKHOROV, A.M., et.al., **Laser Heating of Metals**, Adam Hilger, 1990, 231.

Laser welding of titanium alloys

Douglas Ramos da Silva.

Centro de Lasers e Aplicações – Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares
Av. Prof. Dr. Lineu Prestes, 2242
Cidade Universitária, São Paulo - SP
drsilva@ipen.br

Wagner de Rossi, José Roberto Berreta, Nilson Dias Vieira Jr.

Centro de Lasers e Aplicações – Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares
Av. Prof. Dr. Lineu Prestes, 2242
Cidade Universitária, São Paulo - SP
wdrossi@ipen.br

Milton Sérgio Fernandes Lima

Instituto de Estudos Avançados/CTA
Rod. Tamoios km 5,5
São José dos Campos - SP
msflima@gmail.com

Abstract. *This work has the objective of analyze the effect of the shielding gas, welding speed and pulse width on the laser welding of the Ti6Al4V alloy, using a pulsed Nd:YAG laser (1,06 μ m) and observing the microstructure, the shape of the weld and the hardness of the material. It was verified the formation of titanium compounds and its consequences, like the formation of fissures and the increase of the heat affected zone, besides the influence of the welding speed on the material lost in the process.*

Keywords: *laser welding, Ti6Al4V, gas shielding, welding speed.*