

SOLDAGEM A LASER DA LIGA Ti-6Al-4V*

Milton Sergio Fernandes de Lima¹
Bruna Junqueira Cortell²
Hélio Rubens Simoni³
Sheila Medeiros de Carvalho⁴
Davi Neves⁵

Resumo

A soldagem a laser do Ti-6Al-4V necessita de cuidados especiais quanto à reatividade do cordão com o ar. A fragilidade da solda é apontada como um dos entraves para o uso da liga em algumas aplicações de engenharia. Neste estudo, foram realizadas soldas em chapas de Ti-6Al-4V em diferentes condições experimentais. Verificou-se que a dureza aumenta com o inverso do logaritmo da velocidade de soldagem. A dureza, embora heterogênea na largura do cordão, é resultado da contaminação com oxigênio da estrutura hexagonal da fase α -Ti e da formação de óxido de titânio. Um sistema otimizado de proteção gasosa, protegendo ambas as superfícies e em particular a região do plasma, foi eficaz para melhorar o comportamento mecânico das juntas. Os resultados obtidos em tração uniaxial mostraram que houve um ganho expressivo nas medidas de tensão e deformação. Portanto, o sistema é indicado e recomendado para materiais com sensibilidade à contaminação atmosférica.

Palavras-chave: Laser; Soldagem a laser; Ligas de titânio.

LASER BEAM WELDING OF Ti-6Al-4V

Abstract

Laser beam welding of Ti-6Al-4V requires special care because of the reactivity between the molten pool and the air. The weld weakness is seen as one of the barriers to the use of this alloy in some engineering applications. In this study, the welds were made in Ti-6Al-4V sheets in different experimental conditions. It was found that the hardness increases as the inverse logarithm of the welding speed. The hardness is a result of contamination with oxygen of the α -Ti hexagonal structure and also because of the titanium oxide. An optimized welding shielding system, protecting both surfaces and in particular the plasma region, was effective for improving the mechanical behavior of the joints. The results obtained in uniaxial tension tests showed that there was a significant improvement in stress and strain behavior. Therefore, the system is available and recommended for materials sensitive to air contamination.

Keywords: Laser; Laser beam welding; Titanium alloys.

- ¹ *Doutor em Engenharia Metalúrgica, Chefe da SubDivisão de Laser e Aplicações, Divisão de Fotônica, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, SP, Brasil.*
- ² *Graduanda, Graduação em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, SP, Brasil.*
- ³ *Doutorando em Ciências e Tecnologias Espaciais, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil.*
- ⁴ *Doutora em Engenharia de Materiais, Tenente-engenheira da Força Aérea Brasileira, Divisão de Propulsão Espacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos, SP, Brasil.*
- ⁵ *Doutor em Engenharia Mecânica, SubChefe da Divisão de Suporte Tecnológico, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

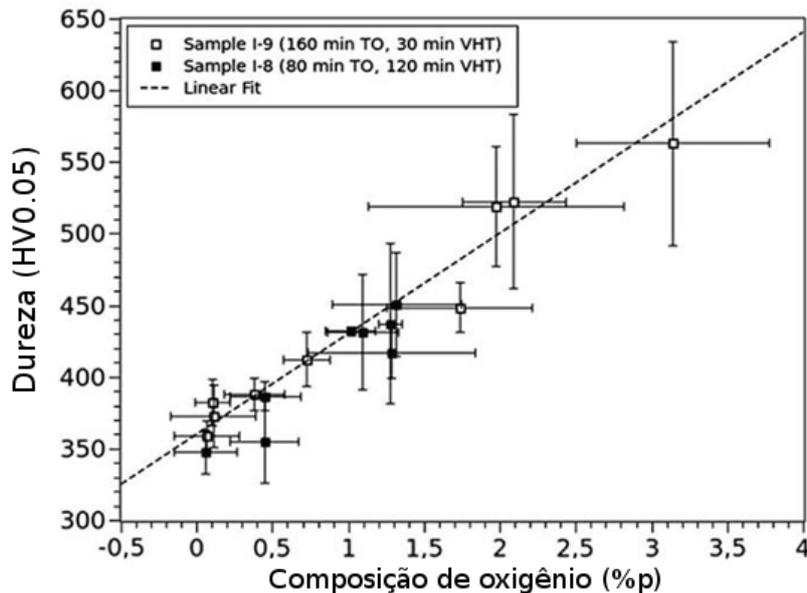
O titânio e suas ligas são materiais empregados em vários ramos da indústria, principalmente na biomedicina, para a fabricação de implantes, e na indústria aeroespacial, para a fabricação de componentes de aeronaves. Uma das limitações do uso mais amplo das ligas de titânio é o seu elevado custo se comparado com outros materiais, como as ligas de alumínio e aço. No entanto, as vantagens se sobressaem sobre as desvantagens, por exemplo, na redução de volume e de massa em aplicações que exigem alta confiabilidade e desempenho em altas temperaturas.

Dentre as ligas de titânio mais usadas na indústria aeroespacial e biomédica, destaca-se a liga com 6% de alumínio e 4% de vanádio em peso, chamada Ti-6Al-4V. A liga Ti-6Al-4V foi desenvolvida originalmente em 1954 por pesquisadores russos, para aplicação no setor aeroespacial, tendo como vantagens: boa conformabilidade, boa resistência mecânica na faixa de temperaturas dos equipamentos aeronáuticos e excelente resistência a corrosão [1]. Estas propriedades fizeram com que essa liga não ficasse apenas limitada a indústria aeronáutica, mas também começasse a ser aplicada em outras áreas da engenharia. Na indústria aeronáutica, a liga Ti-6Al-4V é utilizada em várias partes da aeronave, como fuselagem, nacelas, trem de pouso e asa, e em áreas de alta temperatura como, pilone e APU, e ainda em peças do motor como turbinas e palhetas de compressores [2].

Donachie [3] mostrou que há certa complexidade para realizar o processo de conformação mecânica e usinagem na liga de Ti-6Al-4V, dificultando a produção de grandes componentes e exigindo ferramentas especiais. A manufatura a laser de peças menores para a formação do componente é um meio viável para evitar este tipo de problema, diminuir custos e aumentar a produtividade. Neste aspecto, duas técnicas são muito promissoras: a fabricação por manufatura aditiva [4] e a fabricação por soldagem de peças menores [5]. Este trabalho se dedica ao segundo processo.

A proteção gasosa é essencial durante a soldagem do Ti-6Al-4V. Conforme visto por Zabler [6], a dureza da liga aumenta com a contaminação com oxigênio. Este autor ofereceu uma importante correlação entre o nível de dureza e a quantidade de oxigênio dissolvida na fase α da liga Ti-6Al-4V, conforme visto na Figura 1. Na Figura 1, o autor estabelece uma relação linear entre a dureza HV e a contaminação por oxigênio. Os pontos no gráfico representam amostras oxidadas em forno a 700°C por 160 minutos e a 850°C por 30 minutos a vácuo. Os quadrados fechados apresentam o mesmo procedimento, mas por 80 min em forno e 120 min a vácuo. Por meio do gráfico, se obtém a Equação 1.

Considerando que existe sempre a possibilidade de contaminação do cordão de solda pela atmosfera e que esta contaminação impacta diretamente sobre o comportamento mecânico do conjunto soldado, este trabalho objetivou entender como os parâmetros de processo influenciam na dureza do cordão. A contaminação do cordão será investigada por difratometria de raios-X, a fim de investigar o efeito da oxidação na estrutura hexagonal da fase α -Titânio. Finalmente, um sistema otimizado de proteção gasosa será apresentado, visando melhorar o desempenho das soldas em tração uniaxial.



$$HV = 325 + 70 \times \%O \quad (1)$$

Figura 1. Teor de oxigênio dissolvido na fase α -Ti em função da dureza e equação correlacionando a dureza com a porcentagem de oxigênio em solução.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais de partida são chapas de titânio grau 5, com duas espessuras: 5 mm e 2 mm, e com composição química dada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química das chapas.

Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
6,1	4,1	0,017	0,17	0,12	0,009	0,004	Bal.

A chapa de 5 mm de espessura será usada para determinar o efeito dos parâmetros de processo na qualidade das soldas. Já a chapa de 2 mm será utilizada para os ensaios de tração.

O laser a fibra utilizado neste trabalho está instalado no Laboratório Multiusuário de Desenvolvimento de Aplicações de Laser e Ótica (DEDALO) da Divisão de Fotônica (EFO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv). Trata-se de um laser de 2 kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000) com comprimento de onda de 1,07 μ m. Este laser é dotado de uma fibra de saída com 50 μ m de diâmetro e 5 m de extensão. Uma unidade de acoplamento de fibras faz a conexão de uma segunda fibra com 100 μ m de diâmetro e 10 m de comprimento que é utilizada nos processos de soldagem. A fibra secundária é conectada a um colimador óptico formando o sistema de acoplamento do feixe.

Os experimentos de soldagem foram realizados em uma mesa com comando numérico computadorizada (CNC), por meio do software EMC2 e acionada por motores de passo, com velocidade máxima de 160 mm/s e cursos dos eixos X de 430 mm e Y de 508 mm, ambos com resolução de 5 μ m. Um eixo Z com curso de 215 mm e resolução de 1 μ m foi incorporado à mesa. Este eixo fixa a óptica de focalização e facilita posicionar corretamente o foco do feixe de laser sobre a amostra. No caso das chapas de 5 mm de espessura, o foco do laser foi posicionado 10 mm abaixo da superfície superior. A desfocalização produziu um diâmetro de feixe de 1,6 mm na superfície da chapa de titânio. Isto foi necessário para aumentar a região de análises por difratometria de raios-X e de dureza. No caso da chapa de 2

mm, o foco do laser foi posicionado na superfície inferior da chapa, produzindo um diâmetro de 0,34 mm na superfície superior.

Para controlar a contaminação do cordão de solda foi utilizado como gás de proteção o argônio de alta pureza (99,999%), a um fluxo de 30 l/min no topo do material. O bocal circular coaxial utilizado no trabalho permite bom controle do nível de oxidação na maioria dos metais, conforme mostrado anteriormente [7].

As soldas foram realizadas em um passe com 10 cm de extensão em superfícies lixadas (lixa classe SiC 600). Para as análises subsequentes, apenas a parte central das chapas foi utilizada. As análises realizadas foram: metalografia óptica, dureza Vickers, nanodureza instrumentada, difratometria de raios-X e ensaios de tração uniaxial.

As análises metalográficas foram realizadas conforme metodologia padrão: corte, lixamento, polimento e ataque com reagente Kroll (10 ml de ácido hidrófluorídrico, 45 ml de ácido nítrico e 45 ml de água) por tempos variando de 1 a 5 segundos. O microscópio óptico usado foi um da marca Zeiss, modelo Imager2.

Para ensaios de dureza no centro do cordão foi utilizado um penetrador piramidal Vickers em equipamento FutureTech FM800, com carga de 200 gf e tempo de ensaio de 10 segundos. Também foi utilizado um nanodurômetro digital instrumentado (AntonParr, modelo NHT2) com penetrador Bekaert para o perfil de dureza. A carga máxima aplicada foi de 80 mN por 10 segundos.

As análises por difratometria de raios X foram obtidas por meio de um difratômetro Rigaku, modelo Ultima IV. Foi utilizado radiação α do anodo de cobre (comprimento de onda de 1,542 Å) e intervalo de varredura entre 30 e 60°, com passo de 0.05°.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios (Emic modelo DL com 100 kN de capacidade), com uma velocidade de ensaio de 1,0 mm/min, em temperatura ambiente. Para cada condição de velocidade e de potência, três réplicas segundo a norma ASTM E 8 foram ensaiadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização das Soldas

Foram realizadas soldas a laser com os parâmetros de processo apresentados na Tabela 2. Os outros parâmetros foram mantidos constantes: desfocalização de +10mm, fluxo gasoso de argônio de 30 l/min e inclinação do feixe de 5°.

Tabela 2. Parâmetros de processo na soldagem a laser

Solda	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V (mm/s)	44,5	27,5	17,0	10,5	6,5	4,0	2,5	1,5	1,0	0,5
P (W)	400	400	400	300	300	300	250	250	250	200

As dimensões das soldas, largura e profundidade, apresentaram relação aproximadamente linear com o logaritmo do aporte térmico (AT), conforme mostrado na Figura 2. O aporte térmico considerado aqui é a razão da potência pela velocidade, mostradas na Tabela 2. Conforme observado na Figura, a razão de aspecto da solda apresenta um comportamento de calota aproximadamente circular. Neste caso, se diz que a solda é por condução.

A macroestrutura das soldas muda bastante com a variação da velocidade. Como o número de variáveis foi grande, apenas algumas macrografias representativas são apresentadas na Figura 3. De uma forma geral, a diminuição na velocidade de soldagem aumenta a contaminação do cordão de solda, que se apresenta mais

escuro. No caso extremo, condição 10, o cordão apresenta irregularidades e trincas em toda a extensão. Isto é esperado, pois a diminuição da velocidade de soldagem leva à formação de muito óxido, como resultado da contaminação pelo ar devido ao longo tempo de interação com o ambiente.

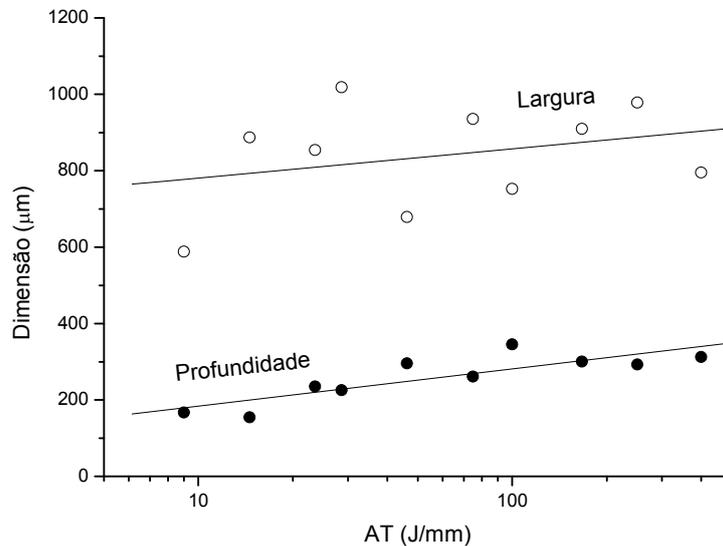


Figura 2. Dimensões da profundidade e largura do cordão na chapa G e largura do cordão na chapa F, em função do aporte térmico.

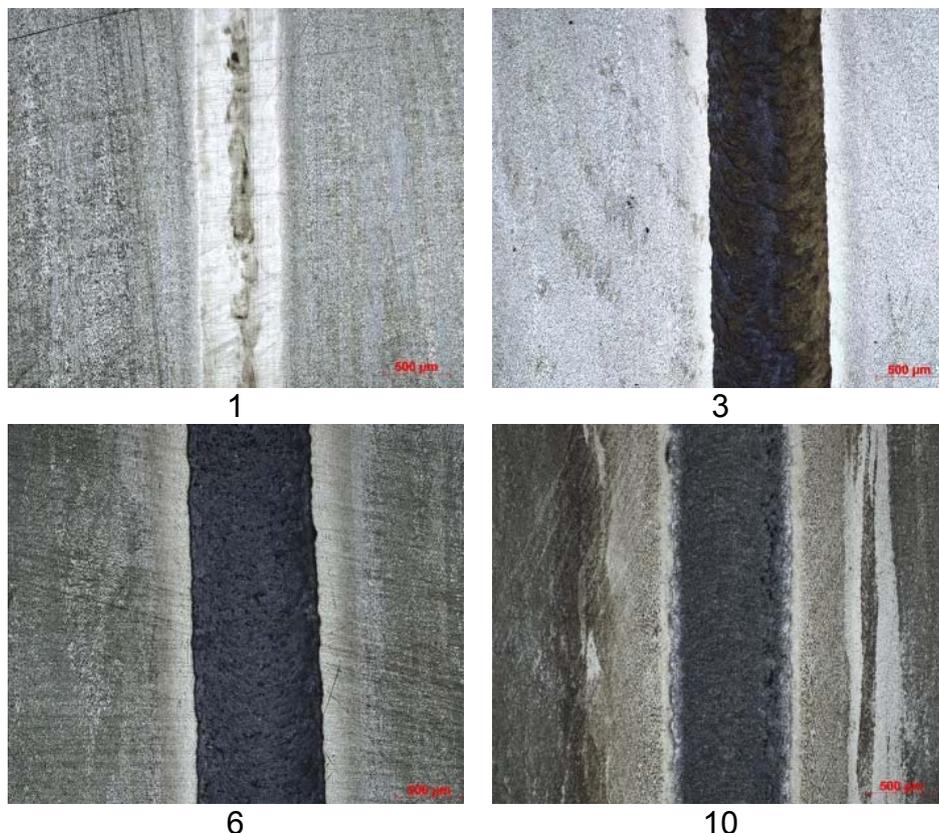


Figura 3. Macroestruturas representativas dos cordões de solda.

A variação da dureza com a velocidade de soldagem fica evidente na Figura 4, onde o decréscimo é aproximadamente exponencial. Aparentemente, os extremos da reta apresentam patamares que remetem a um comportamento sigmoide. Em outras palavras, parece que a dureza se estabiliza em um patamar de cerca de 1400 HV em velocidades abaixo de 1 mm/s e em um patamar de cerca de 500 HV acima de 27,5 mm/s. Neste caso, pode-se considerar que o efeito cumulativo da contaminação do cordão atinge um valor limite no qual a fase α -Ti não pode mais absorver.

Na parte de baixo do gráfico HV(v) da Figura 4 está apresentada a porcentagem de oxigênio dissolvido na fase α -Ti em função da velocidade para cada caso, conforme a Equação 1 (Figura 1). É possível notar uma relação aproximadamente linear entre a contaminação por oxigênio e o $\text{Log}(v)$ até cerca de 1 mm/s. O limite de solubilidade de O no Ti é 14% (saturação), conforme o diagrama de fases [8]. Isso está bem caracterizado no gráfico. No entanto, o aparecimento de óxido de titânio (TiO_2) em velocidades relativamente altas mostra que existe um processo contínuo de formação de núcleos de TiO_2 no metal líquido.

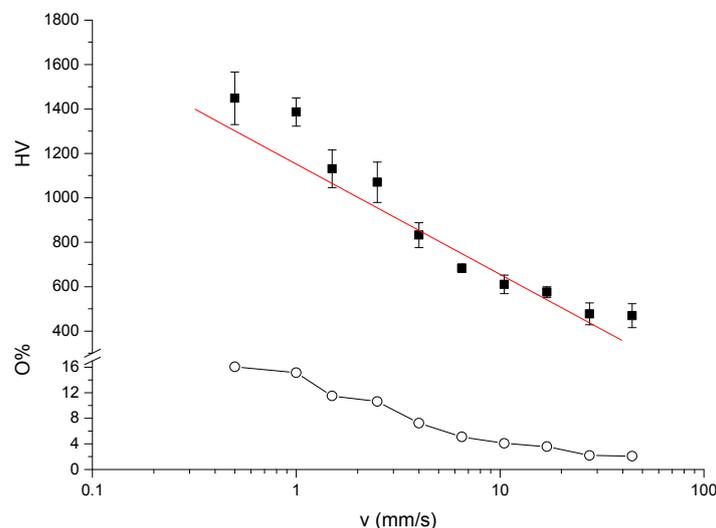


Figura 4. Medidas de dureza Vickers (HV) em função da velocidade de soldagem e estimativa da contaminação do cordão, conforme a Equação 1.

A distribuição da dureza não é uniforme dentro do cordão, como pode ser visto na Figura 5. Os limites do cordão de solda estão escritos na Figura, e mostram que a dureza é bem baixa nos extremos da zona de fusão e sobe na região mais central da solda. Isto indica que a região de máxima concentração de energia do feixe de laser é, também, uma região de particular contaminação. Portanto, o plasma formado no centro do feixe durante o processo está sugando a maior parte dos contaminantes gasosos, o que não pode ser prevenido pelo atual sistema de proteção gasosa. Na Figura 5 também é apresentado o valor do Módulo de Elasticidade em endentação (EIT), nota-se que o seu valor cai na região da solda como resultado da formação da fase α . A fase β possui um valor maior de EIT e HV do que a fase α . Verifica-se, ainda, que a região fora da solda possui uma variação importante nos valores de HV e EIT. Isto se deve ao fato que a nanodureza se impõe sobre um grão, ora α ora β , o que produz tal variação.

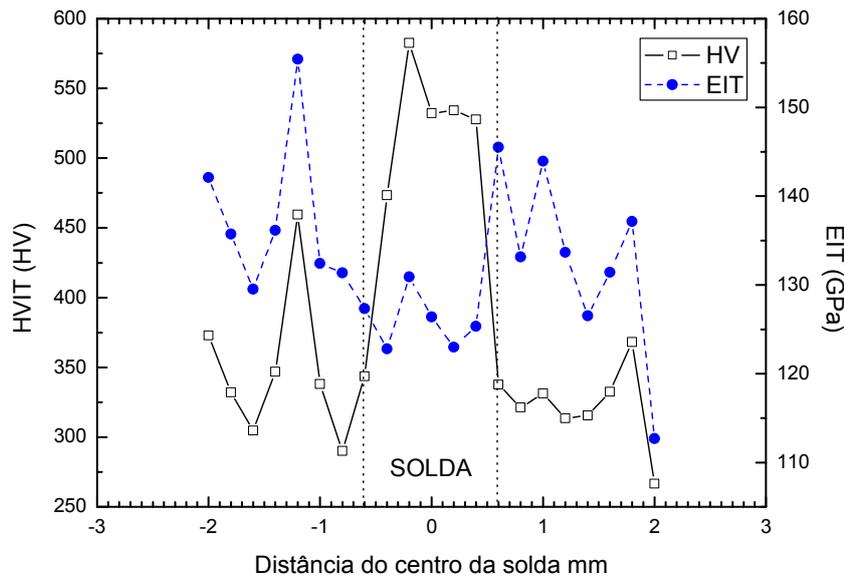


Figura 5. Medidas de nanodureza instrumentada na condição 1 (Tabela 1).

Uma análise mais criteriosa da estrutura das chapas foi feita por difratometria de raios-X. A fase presente em todas as soldas é α -titânio, com estrutura hexagonal compacta e parâmetro de rede teórico $a = 2.95111$ nm e $c = 4.68433$ nm ($c/a = 1.5873$) [9]. Nos casos onde se verifica a oxidação, o óxido presente é o TiO_2 e sua fração volumétrica é de 10.0% na condição 8 ($v1,5$ mm/s), 17.3% na condição 9 ($v1$ mm/s) e 48.5% na condição 10 ($v0,5$ mm/s).

A contaminação com oxigênio não é evidente quando se compara o valor experimental de c/a com o teórico, conforme mostrado na Figura 1a. Na figura, estão discriminados os valores de c/a experimentais juntamente com o valor teórico (T) e o valor obtido no metal base (MB). Nota-se que o valor experimental se situa acima do teórico, mesmo considerando o metal base. As soldas apresentam um valor de c/a próximo ao metal base, com um aumento médio de aproximadamente 0.003 no valor de c/a em relação ao metal base. Alguns pontos se situam abaixo do valor de MB, indicando um improvável refino. A metodologia mostrou ser muito difícil obter valores confiáveis de c/a para a fase α -Ti, particularmente quando existem outras fases presentes. No entanto, quando se considera um pico bem definido e separado das outras linhas, a contaminação fica mais evidente, embora não totalmente resolvida. A Figura 1b mostra a influência da linha (102) da fase α -Ti em função da velocidade. Evidencia-se a tendência ao deslocamento da linha para valores maiores com a diminuição da velocidade, indicando uma expansão da célula unitária, no entanto a relação não é totalmente uniforme.

Em termos microestruturais, a solda obtida na condição de soldagem normal e com proteção gasosa otimizada apresentam características marcadamente diferentes. Na Figura 7 estão apresentadas duas micrografias, uma na condição normal (a) e outra na condição otimizada (b). As soldas obtidas nas condições listadas na Tabela 2 apresentam características marcadamente dendríticas, fruto da nucleação de partículas de inclusões óxidas no metal líquido. O crescimento das dendritas da fase beta primária rejeita óxido para o espaçamento interdendrítico o que impede a formação de grãos homogêneos da fase α martensítica, o que é o esperado. No caso da solda com proteção gasosa otimizada (Figura 7b), os grãos são equiaxiais e marcados pela estrutura martensítica do titânio. Comparativamente com a alta

dureza observada nas amostras contaminadas (Figura 5), a dureza obtida na solda otimizada é de cerca de 450 HV.

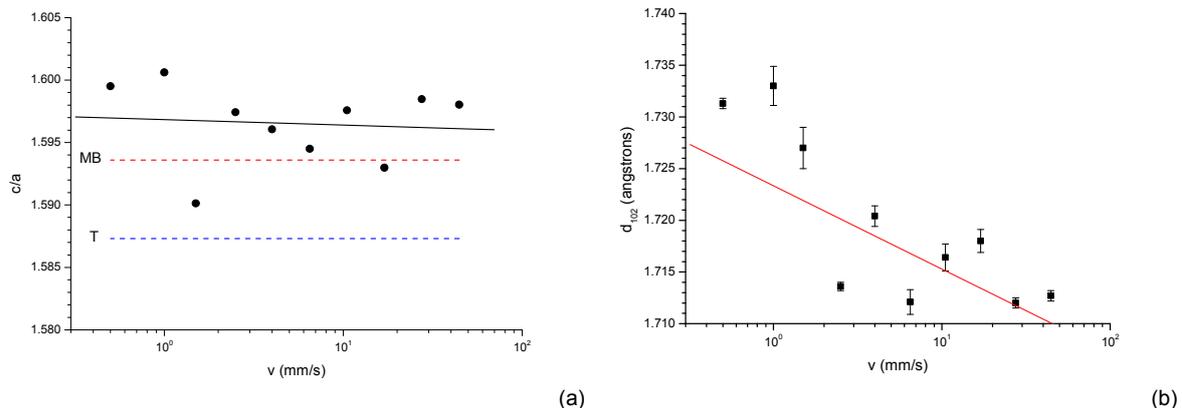


Figura 1. (a) Evolução da razão dos parâmetros de rede c/a do titânio com a velocidade de soldagem e (b) efeito da velocidade na distância interplanar da linha (102) do titânio.

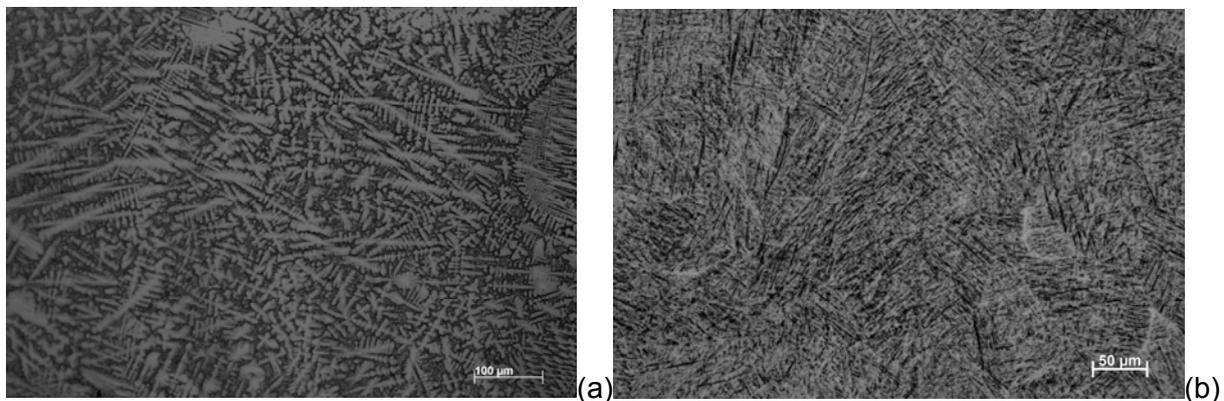


Figura 7. (a) Microestrutura da zona fundida na condição de proteção gasosa normal e (b) Microestrutura obtida no caso de proteção gasosa otimizada.

3.2 Caracterização da Resistência Mecânica

Dos resultados anteriores, fica evidente o efeito da velocidade sobre a contaminação do cordão e o papel da zona central do plasma como sorvedouro de oxigênio. Considerado estes fatos, foram realizadas soldas na chapa de 2 mm de espessura com um sistema otimizado de proteção gasosa. O sistema prevê um fluxo laminar em ambos os lados da solda e um fluxo mais intenso na região central para evitar a contaminação próxima à região do plasma.

A fragilidade da liga com proteção gasosa em apenas um dos lados fica evidente comparando-se dos gráficos de tensão-deformação da Figura 8. No caso da Figura 8a, a proteção gasosa é apenas no topo, conforme as amostras anteriores (Tabela 2). No caso da Figura 8b, é apresentado o resultado da mesma condição de soldagem, no entanto com o sistema aprimorado de proteção gasosa. A Tabela 3 resume as características mecânicas dos corpos de prova soldados a laser, mostrando as vantagens do método. As siglas σ_y , σ_{max} , D_{Fmax} e D_{rup} significam limite de escoamento, limite de resistência mecânica, deformação na força máxima e deformação de ruptura.

A dureza obtida no caso de proteção de apenas um lado foi maior que no caso anterior (Figura 4), pois agora a contaminação também vem por baixo. Por outro lado, a dureza no cordão com proteção otimizada é menor que a esperada, e similar ao material base. O comportamento mecânico do material soldado nas condições

otimizadas é excelente e comparável ao material sem solda. Comparando-se as duas técnicas de soldagem (Tabela 3), houve aumento de 2,6X no limite de escoamento, 2,4X no limite de resistência e aumentos ainda mais expressivos na deformação na força máxima e na deformação de ruptura.

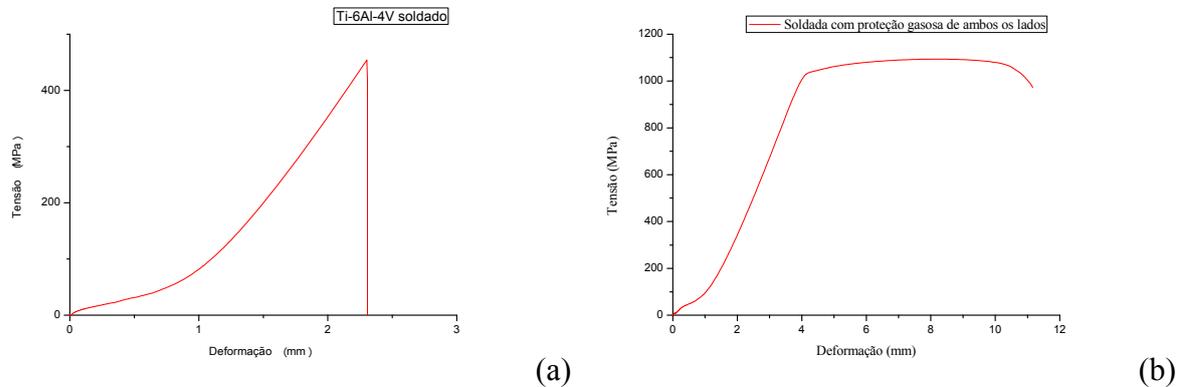


Figura 8. Gráficos tensão-deformação do Ti-Al-V soldado a laser: (a) com proteção gasosa no topo e (b) com a proteção gasosa otimizada.

Tabela 3. Resumo dos resultados mecânicos

Condição	Dureza (HV)	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	D_{Fmax} (mm)	D_{rup} (mm)
Proteção de um lado	1030	396	454	2,3	2,3
Proteção otimizada	450	1033	1074	8,2	11,0

4 CONCLUSÃO

Conforme os resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser descritas:

Foram obtidas soldas por condução com calotas aproximadamente hemisféricas em diferentes condições de potência do laser e velocidade, englobando aportes térmicos entre 9 e 400 J/mm.

A microestrutura destes cordões é caracterizada pela fase α -Ti, com estrutura hexagonal, e TiO_2 em quantidades crescentes com a diminuição da velocidade.

A dureza do cordão é aproximadamente linear com o logaritmo da velocidade de soldagem.

Foi possível correlacionar a dureza no centro de cada cordão com a contaminação por oxigênio, seguindo a indicação da literatura.

Abaixo de 1 mm/s a solda apresenta contaminação constante, resultado da saturação de oxigênio no metal líquido.

As soldas não apresentam um valor único de dureza na zona fundida, mas uma distribuição mais acentuada no centro.

Este fato indica o plasma gerado pelo laser como sorvedouro preferencial da contaminação atmosférica.

O uso da relação dos parâmetros de rede c/a da estrutura hexagonal do titânio não foi eficaz para prever a contaminação por intersticiais.

A linha (102) da estrutura α -Ti, que aparece mais isolada nos difratogramas de raios-X, pode oferecer alguma evidência de contaminação por oxigênio. No entanto, com baixa correlação entre a velocidade de soldagem e os valores dos parâmetros de rede.

Foi possível resolver o problema da contaminação do cordão com um sistema de proteção gasosa otimizado.

A contaminação com oxigênio foi minimizada gerando grãos equiaxiais da fase martensítica em contraste com uma microestrutura dendrítica, com microsegregação de óxidos.

O sistema, aplicado à soldagem de chapas de 2 mm de espessura, foi eficaz para produzir juntas soldadas com comportamento mecânico muito superior ao sistema anterior e próximo ao material de base sem solda.

Recomenda-se o uso de tal sistema para quaisquer materiais sensíveis à contaminação atmosférica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Aeronáutica pela doação de materiais de pesquisa e esclarecimentos técnicos. A autora BJC agradece a bolsa de iniciação científica do programa PIBIC/CNPq do IEAv. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processo 2012/12685-5) e pelo CNPq (processo 310264/2013-8).

REFERÊNCIAS

- 1 Leyens C, Peters M. Titanium and Titanium alloys: fundamentals and applications, Weinhein: Wiley-VHC; 2003.
- 2 Boyer RR. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering A*. 1996;213:103-114.
- 3 Donachie MJ. Titanium: A technical guide. Metals Park:ASM; 1988.
- 4 Baufeld B, der Biest OV, Gault, R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties, *Materials & Design*. 2010;31:S106-S111.
- 5 Akman E, Demir A, Canel T, Sinmazçelik T, Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(8):3705-3713.
- 6 Zabler S. Interstitial Oxygen diffusion hardening — A practical route for the surface protection of titanium. *Materials Characterization*. 2011;62:1205-1213.
- 7 Carvalho SM. Estudo da soldabilidade a laser e a TIG do titânio comercialmente puro grau 2 empregado em sistemas pneumáticos de aeronaves. Tese (doutorado). Univesidade de São Paulo. Orientador Carlos Antonio Reis Pereira Baptista. Lorena:USP, 2012.
- 8 ThermoCalc thermodynamic database, version J, Stockholm Royal Institute, Suécia, 1994
- 9 Wood RM. The Lattice Constants of High Purity Alpha Titanium. *Proc. Phys. Soc.* 1962;80: 783-786.