



# ESTUDO DA SOLDABILIDADE A LASER E A TIG DO TITÂNIO A40 PARA EMPREGO EM SISTEMAS PNEUMÁTICOS DE AERONAVES<sup>1</sup>

Sheila Medeiros de Carvalho<sup>2</sup>  
Carlos Antonio Reis Pereira Baptista<sup>3</sup>  
Milton Sérgio Fernandes de Lima<sup>4</sup>  
Andréia de Souza Martins Cardoso<sup>5</sup>

## Resumo

O conjunto de tubos denominado *engine bleed air system*, também conhecido como sistema pneumático, tem a função de conduzir o ar quente pressurizado desde o motor até os pontos de utilização pelos sistemas ambientais de uma aeronave. A ocorrência de falhas em serviço de peças do sistema pneumático soldadas pelo processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), motivou o estudo da substituição desse processo pelo processo de soldagem a laser. Para desenvolver o procedimento de soldagem foi utilizado um laser a fibra de 2 kW de potência e o material estudado foi o Ti A40. As avaliações microestruturais e de microdureza dos cordões de solda evidenciaram a adequação do processo. A melhor condição de solda a laser apresentou limite de resistência igual a 238 MPa, valor inferior aos 324 MPa mostrados pela solda TIG. No entanto, a solda laser falhou por cisalhamento, e sua resistência mecânica pode ser aumentada por meio da execução de dois cordões paralelos. Os ensaios de fadiga mostraram a mesma tendência do comportamento em tração.

**Palavras-chave:** Solda laser; TIG; Ti A40; Comportamento mecânico.

## WELDABILITY STUDY OF LASER BEAM AND ARC WELDING OF A40 TITANIUM FOR USE IN AIRCRAFTS PNEUMATIC SYSTEM

### Abstract

The engine bleed air system, also known as pneumatic system, conducts the pressurized hot air from the engine to the environmental control systems of the aircrafts. Possibility of fails during service of arc welded pneumatic parts driven further developments of laser beam welding (LBW), as an alternative method. Here, a fiber laser with 2 kW average power has been employed to weld a A40 titanium alloy. Both microstructural and hardness examinations of weldments shown that the laser method is adequate. The best laser welding condition presented an ultimate stress of 238 MPa, which is lower than observed in arc welding, i.e. 324 MPa. However, the laser welded joints had failed by shearing and the actual mechanical resistance could be increased by consecutive parallel weld runs. The fatigue mechanical testing shown similar procedures for both arc and laser welded samples.

**Key words:** Laser beam welding (LBW); Arc welding; A40 titanium alloy; Mechanical behavior.

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

<sup>2</sup> M.Sc.; Doutoranda Eng. Materiais – EEL/USP; [smc@ppgem.eel.usp.br](mailto:smc@ppgem.eel.usp.br)

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia de Materiais – EEL/USP; [baptista@demar.eel.usp.br](mailto:baptista@demar.eel.usp.br)

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia Metalúrgica – IEAv/CTA; [msflima@yahoo.com.br](mailto:msflima@yahoo.com.br)

<sup>5</sup> Eng<sup>a</sup> Química; Mestranda Eng. Materiais – EEL/USP; [bra\\_afs@hotmail.com](mailto:bra_afs@hotmail.com)



## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas ambientais têm a função de garantir o conforto no interior das aeronaves. A energia necessária ao funcionamento desses sistemas em voo provém do ar quente retirado do motor. O conjunto de componentes necessários para a contenção e condução desse ar desde o motor até os pontos de utilização é denominado *engine bleed air system*, também conhecido como sistema pneumático. Este contém derivações, curvas, junções e soldas, que constituem suas partes críticas. A confiabilidade e durabilidade desse sistema são fatores importantes na segurança de voo, na redução dos custos, no tempo de manutenção e no cumprimento dos requisitos de certificação e aeronavegabilidade.<sup>(1)</sup>

O material empregado no presente trabalho é o titânio A40, o qual permite a fabricação de peças mais leves além de ser adequado às situações em que se necessitam de boa ductilidade, conformabilidade, resistência ao impacto em baixa temperatura e resistência à corrosão. Entretanto, sabe-se que o processo de soldagem pode induzir contaminações e alterações microestruturais que afetam a resposta dos materiais frente ao processo de dano acumulado deflagrado pelos ciclos térmicos e mecânicos em serviço.<sup>(2,3)</sup> A Tabela 1 apresenta algumas das propriedades mecânicas do titânio A40.

**Tabela 1:** Algumas propriedades do titânio A40<sup>(4,5)</sup>

Peso atômico	Densidade	Ponto de Fusão	Limite de resistência
22	4,51 g/cm <sup>3</sup>	1668 °C	340 MPa

Análises realizadas em peças do sistema pneumático, que falharam em serviço, comprovaram que a superfície interna está submetida a solicitações cíclicas de pressurização pelo ar aquecido e sofre um processo de dano superficial que pode resultar em concentração local de tensão e redução de sua vida útil.<sup>(6)</sup> Foi verificado experimentalmente em tubos de titânio A40<sup>(7)</sup> que a pressurização cíclica promove acúmulo de danos, sobretudo ao lado das regiões soldadas, onde as trincas são nucleadas. A ocorrência dessas falhas, muitas vezes envolve peças soldadas pelo processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), abre a perspectiva para a utilização de processos alternativos de soldagem, tais como a soldagem a laser adotada no presente estudo.

As técnicas de soldagem a laser e por feixe de elétrons são as mais adequadas à soldagem do titânio e suas ligas.<sup>(8)</sup> 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.<sup>(9)</sup> O processo consiste na focalização do feixe de laser sobre a junta sobreposta, que é aquecida até o ponto de fusão e, em seguida resfriada 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 frequência destes pulsos, a taxa de sobreposição (que depende dos 3 fatores anteriores, caso o laser seja pulsado), 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.<sup>(10)</sup> 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 (caracterizada pela formação do keyhole). No presente estudo será empregada a soldagem a laser por penetração.

A despeito do fato de o titânio e suas ligas serem empregados em muitas aplicações de engenharia, não há na literatura técnica dados sistemáticos sobre o desempenho de juntas soldadas em termos da estimativa do eventual aumento ou redução do seu limite de fadiga. Casavola, Pappalettere e Tattoli<sup>(8)</sup> observaram que corpos-de-prova de titânio de pureza comercial e da liga Ti-6Al-4V soldados a laser falharam na região do metal base ao serem ensaiados em fadigas. Dentre os fatores que podem estar contribuindo para esse comportamento, incluem-se as características apresentadas pelos perfis dos cordões de solda, que resultam em baixos fatores de concentração de tensão, bem como o fato de o processo de soldagem a laser limitar o tamanho da zona afetada pelo calor. No trabalho de Srimaneepong et al.<sup>(11)</sup> observou-se que as peças de titânio comercial e de Ti-6Al-7Nb soldadas a laser e destinadas às aplicações odontológicas apresentaram os mesmos níveis de resistência à torção que os respectivos materiais sem a solda, ao passo que juntas soldadas de liga Co-Cr apresentaram uma queda na resistência à torção.

Um trabalho recente desenvolvido no IEAv/CTA em colaboração com o IPEN-SP<sup>(12)</sup> mostrou que as características microestruturais das soldas a laser de ligas Ti-6Al-4V são decisivamente controladas pelos parâmetros do laser e, em particular, pela atmosfera de proteção.

Em face das informações anteriores, a soldagem a laser se apresenta como uma alternativa promissora a ser investigada, visando à substituição do processo TIG na produção de juntas soldadas de Ti-A40 em peças do sistema pneumático de aviões. Sendo assim, o presente estudo visa desenvolver o procedimento para a soldagem a laser de chapas finas do titânio A40; realizar soldagem TIG no mesmo material, empregando-se os parâmetros usuais adotados na indústria aeronáutica; caracterizar as juntas sobrepostas soldadas, quanto a sua microestrutura e dureza; avaliar comparativamente a resistência mecânica em solicitações uniaxiais monotônica e cíclica do Ti-A40 soldado a laser e com TIG

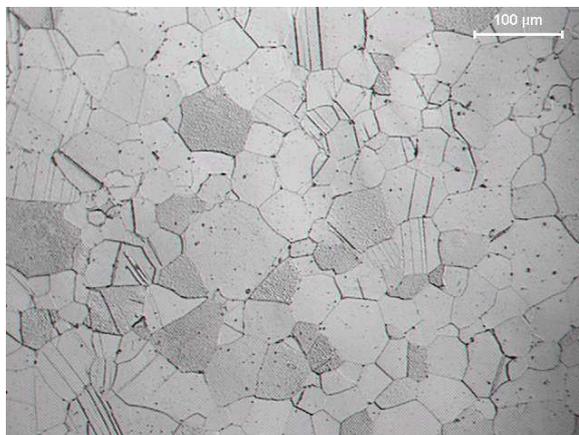
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente montou-se uma carta de processo de soldagem, a fim de verificar se as condições experimentais da soldagem a laser estão dentro da janela de processo. A carta de processo é um procedimento preliminar que serve como referência para a realização da soldagem pretendida. Uma janela de processo típica de um laser contínuo (CW) associa duas ou mais variáveis de processo com uma determinada qualidade do cordão. As variáveis de processo escolhidas foram: a vazão do gás, a potência e a velocidade de soldagem. Devido à limitação de material, os testes preliminares que constituíram a carta de processo foram realizados em uma chapa (20 mm X 10 mm X 1 mm) de titânio de pureza comercial grau 2, cuja composição é similar ao Ti A40. As análises da qualidade do cordão a laser foram realizadas por meio de inspeção visual, de microscopia óptica e de microdureza. Essas análises preliminares permitiram definir o intervalo otimizado de parâmetros de processo, associando a penetração e a qualidade da solda à potência do laser, à velocidade de soldagem e à vazão de gás.

Uma vez definidos os parâmetros otimizados para a soldagem a laser, foram utilizadas chapas de titânio A40 de 1 mm de espessura, previamente recozidas e jateadas, fornecidas pela empresa EMBRAER. A Tabela 2 apresenta a composição química do Ti A40. A Figura 1 mostra a estrutura refinada e equiaxial do titânio e a existência de algumas maclas de deformação.

**Tabela 2:** Composição química do Ti A40 (% peso) <sup>(7)</sup>

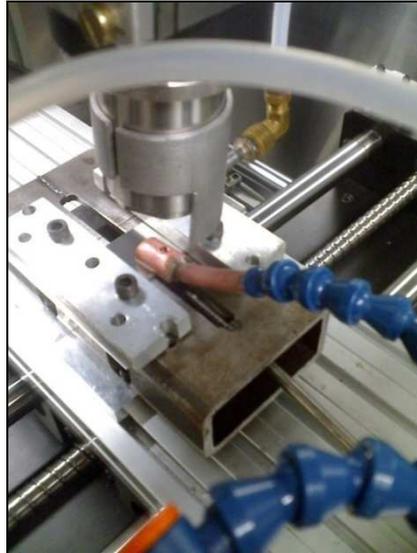
C	O	Fe	N	H	Elemento Residual	Total Residual	Ti
0,10 máx.	0,25 máx.	0,20 máx.	0,05 máx.	0,015 máx.	0,05 máx.	0,15 máx.	Remanescente



**Figura 1:** Micrografia do Ti A40, 200 X, observada ao microscópio ótico.

Essas chapas foram soldadas a laser e a arco. O equipamento utilizado para realizar a soldagem a laser é um laser a fibra de 2 kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000), instalado no Laboratório Multi-usuário de Aplicações de Lasers e Óptica (DEDALO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA). Os experimentos de soldagem foram realizados em uma mesa de comando numérico computadorizada (CNC), controlada por computador 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 µm. Um eixo Z com curso de 215 mm e resolução de 1 µm foi incorporado à mesa. Este eixo fixa a óptica de focalização e facilita posicionar corretamente o foco do feixe de laser sobre a amostra. Nos ensaios, foram utilizados dois tipos distintos de bocais de gás: um de geometria circular ( $\varnothing$  3mm) e o outro conforme a geometria exemplificada na Figura 2. O bocal circular, de uso corrente na soldagem de aços, se mostrou ineficiente na proteção gasosa da superfície do titânio, por este apresentar muita oxidação nas cores cinza, azul e verde. O bocal da Figura 2 foi desenvolvido neste trabalho e representa uma meia-cana com diâmetro de 5,5 mm com um furo no meio. Esse furo no meio é por onde o feixe de laser passa para atingir a chapa. Soldado a esta meia cana está um tubo de 3 mm de diâmetro interno, pelo qual o gás de proteção é soprado com um fluxo de 35 l/min. Na parte inferior das chapas foi fixado um cano de aço inoxidável com 1,5 mm de diâmetro interno. Esse dispositivo produzia a proteção de raiz com o mesmo fluxo do oferecido na superfície do titânio.

Para permitir uma comparação do desempenho dos processos de soldagem laser e TIG foram realizadas em chapas idênticas, soldas com o equipamento de solda a arco Aristotig 200 da ESAB, em corrente contínua de 30 A, ângulo de eletrodo de 45 graus, velocidade de soldagem de 350 mm/min e vazão de argônio entre 25 l/min e 30 l/min.



**Figura 2:** Geometria do bocal durante a soldagem a laser.

Inicialmente, realizou-se inspeção visual nas soldas para verificar a qualidade superficial dos cordões e a profundidade da penetração da raiz. Em seguida, foi realizada a etapa de preparação das amostras para análise metalográfica e para a realização dos ensaios de microdureza. Essa etapa consistiu em: (a) corte do material na direção transversal da solda; (b) embutimento a quente com resina sintética baquelite; (c) desbaste utilizando as lixas na seqüência granulométrica de #100, #220, #320, #400, #600, #1000 e #1200; (d) polimento utilizando o pano OP-Chem da Struers, a politriz AROTEC/APL-4 na rotação de 300 RPM, e pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  e OP-S para acabamento final; (e) enxague com água destilada e álcool etílico; (f) secagem com jato de ar comprimido; (g) identificação dos corpos-de-prova. Após a etapa de preparação dos corpos-de-prova, a microestrutura foi revelada por meio de ataque químico com uma solução de 10 ml de HF, 45 ml de HNO<sub>3</sub> e 45 ml de água, em tempos variando de 2 s a 5 s.

As micrografias foram obtidas para verificar a microestrutura resultante, a penetração e os defeitos de soldagem. O equipamento utilizado para a realização dessas análises foi microscópio óptico LEICA modelo REICHERT POLYVAR 2, pertencente à divisão de Materiais (AMR/IAE/CTA). Para a obtenção dos valores de penetração, as micrografias obtidas da seção transversal da solda foram analisadas por meio do software Image J. A altura do reforço foi desconsiderada no presente estudo.

As medidas de dureza foram obtidas por meio de um microdurômetro digital na escala Vickers (Microhardness tester FM700, da Future Tech). A carga aplicada foi de 500 gf e o tempo de aplicação da carga foi de 9s. Para cada corpo-de-prova, foram feitas no mínimo 25 medidas ao longo do cordão. A medida da dureza nos corpos de prova soldados em sobreposição foram realizados na seção transversal polida, com o penetrador começando de uma lado do material de base e terminando no outro lado, passando pela zona fundida. As medidas foram feitas a meia-altura da chapa superior.

Os corpos-de-prova para os ensaios de tração e de fadiga foram fabricados de forma a minimizar o desperdício do material soldado. O comprimento total dos CDPs foi de 110 mm; a região útil teve 40 mm de comprimento e 8,0 mm de largura.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL-USP. O equipamento utilizado foi uma máquina servo-hidráulica MTS mod.

810.23M, com capacidade de 250 kN. A velocidade do deslocamento do cabeçote foi de 1,0 mm/min. Para cada condição analisada foram ensaiados 4 CDPs. Como resultados dos ensaios de tração foram obtidos os limites tensão máxima para as condições estudadas.

A determinação do comportamento em fadiga do material foi feita por meio de ensaios com carregamentos cíclicos estacionários na forma de onda senoidal com controle de força, frequência de 10 Hz e razão de tensão (mínima/máxima) igual a 0,1. Os corpos-de-prova foram levados até a ruptura, e procurou-se ajustar os níveis de carregamento de modo a que o número de ciclos para a falha estivesse entre  $10^4$  e  $10^6$ . Foram adotados 3 níveis de carga: 1000, 700 e 500 MPa.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Carta de Processo**

Inicialmente obtiveram-se duas cartas de processo para verificar a penetração e qualidade superficial do cordão. As variáveis de processo estudadas foram a velocidade, potência de soldagem do laser e vazão do gás de 40 l/min. O tipo de junta utilizada foi a sobreposta de 5 mm e as soldas obtidas foram avaliadas segundo dois critérios: penetração e qualidade. A penetração foi medida a partir do topo até a raiz da solda, sendo que a solda com melhor penetração tem o seu valor próximo de 2 mm (soldas sobrepostas). A qualidade foi determinada qualitativamente pela observação de oxidação, respingos, sangria e porosidades ou descontinuidades na superfície, sendo um critério relativo.

Com a obtenção da primeira carta de processo foi possível selecionar a potência de 700 W com sendo a que produziu melhor penetração e qualidade de soldagem. Em seguida fez-se necessário a elaboração da segunda carta de processo, onde a potência selecionada na 1 carta foi mantida fixa e a velocidade de soldagem foi variada de 1.800 mm/min a 3.600 mm/min. Na carta de processo de número 2, as soldas que apresentaram melhor penetração e qualidade superficial foram as obtidas com as velocidades de 1.800 mm/min, 2.400 mm/min e 3.000 mm/min. Sendo assim, escolheu-se a potência de 700 W e as velocidades de soldagem de 1.800 mm/min e 3.000 mm/min como parâmetros a serem utilizados para continuidade do presente estudo. Embora a velocidade de 2.400 mm/min também tenha produzido uma solda de qualidade, não foi considerada para prosseguimento do trabalho, visto que essa é um valor intermediário entre 1.800 mm/min e 3.000 mm/min. A

**Tabela 3** mostra as cartas de processos obtidas.

**Tabela 3:** Cartas de processo de soldagem

Carta de Processo 1			
Velocidade (mm/min)	Potência (W)	Penetração (mm)	Qualidade superficial
3000	600	1.08	excelente
	700	1.51	excelente
	750	1.99	boa
	800	1.64	ruim
	900	1.55	insuficiente
Carta de Processo 2			
Velocidade (mm/min)	Potência (W)	Penetração (mm)	Qualidade superficial
1800	700	1.89	excelente
2400		2.01	excelente
3000		1.51	excelente
3600		1.60	boa

### 3.2 Soldas a Laser e TIG

A partir dos resultados apresentados no item 0, selecionou-se para a soldagem a laser os parâmetros: velocidades de 1.800 mm/min e 3.000 mm/min e potência de 700 W. A vazão do gás foi aumentada de 40 l/mim para 70 l/mim, visto que o material encontrava-se jateado e a absorvidade do feixe de laser foi aumentada. Com o aumento da absorvidade mais plasma é gerado, o qual precisa ser removido para o feixe atingir o canal do *keyhole*. Para soldagem a TIG utilizou-se os parâmetros descritos no item 0. Após as soldagens as ligações soldadas (CDP) foram identificadas de acordo com a Tabela 4.

**Tabela 4:** Identificação dos corpos-de-prova (CDP)

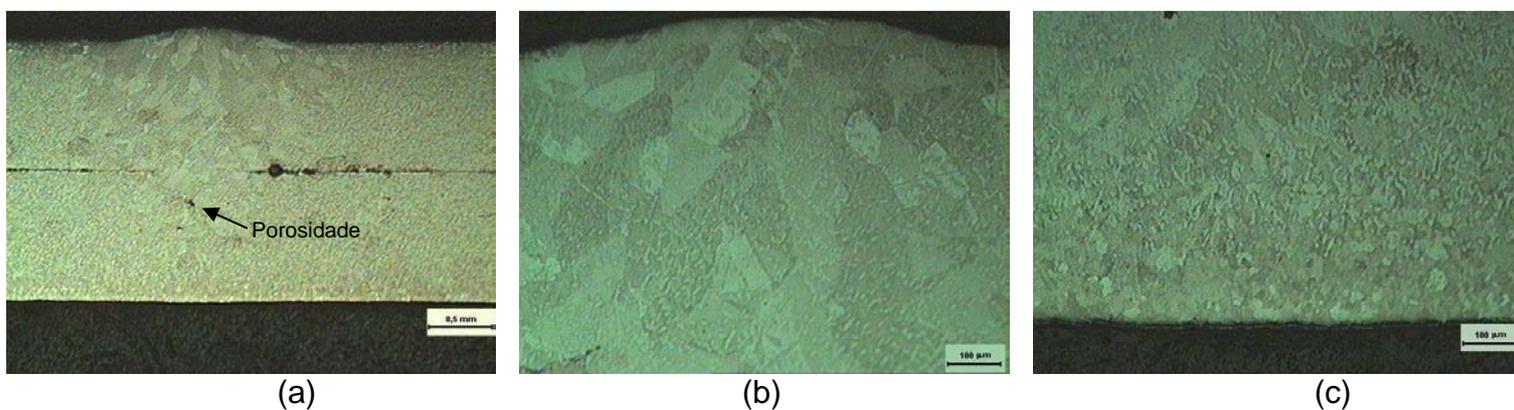
Identificação	Velocidade (mm/min)	Potência (W)	Tipo de solda
CDP1	1800	700	Laser
CDP2	3000	700	Laser
CDP3	350	-	TIG

### 3.3 Análises Metalográficas e de Microdureza

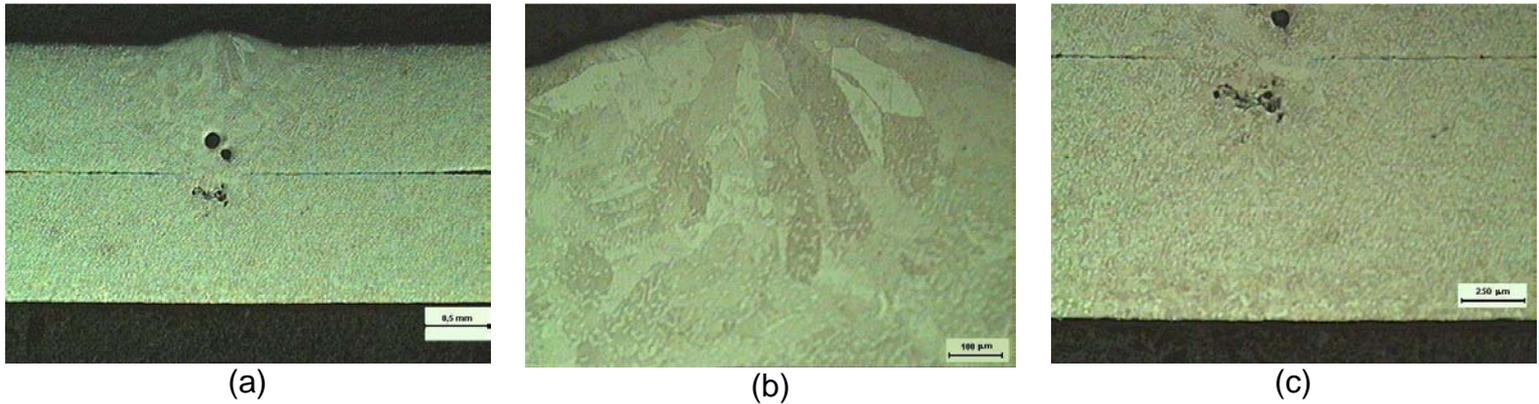
As análises metalográficas dos CDP1, CDP2 e CDP3 são mostradas nas Figuras 3 a 5. O volume de material soldado a laser muda conforme se altera a velocidade, sendo a largura da solda no topo de 1,7 mm e 1,2 mm para o CDP1 e CDP2, respectivamente. A penetração das soldas foi cerca de 1,6 mm e 1,2 mm para o CDP1 e CDP2, respectivamente. Portanto, em ambos os casos houve diluição de material entre as chapas sobrepostas. No entanto, a largura do cordão na altura onde as duas chapas se encontram foi relativamente pequena, sendo aproximadamente 0,75 mm e 0,60 mm para o CDP1 e CDP2, respectivamente. Esta pequena largura na interface entre as chapas deve refletir nas propriedades mecânicas, sobretudo considerando que existe uma cunha formada pelo espaço entre as chapas. Ademais, o espaço entre as chapas parece ter contribuído para o aparecimento de porosidades tanto no CDP1 quanto no CDP2.

No caso do CDP 2, além dos poros esféricos oriundos do gás aprisionado entre as chapas, existe uma porosidade de raiz (Figura 4a). Esta porosidade está associada ao desabamento do keyhole, (canal de vapor criado dentro do material sendo soldado) indicando que a velocidade de 3000 mm/min deve estar acima do permitido para a formação estável do keyhole.

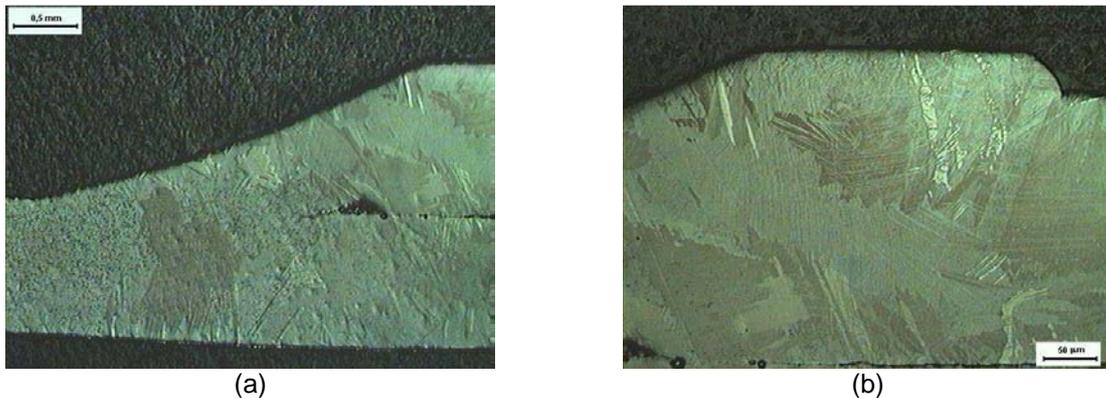
Ao contrário dos CDPs 1 e 2, o CDP 3 (Figura 5) apresenta a ligação de transpasse com solda de filete executada na extremidade de uma das chapas, como é usual no processo TIG. O filete apresenta lados com dimensões distintas, sendo o menor deles (denominado perna) igual à espessura da chapa, e o maior com aproximadamente 3,5 vezes este valor. Observa-se também a existência de defeitos próximos à raiz da solda (Figura 5a).



**Figura 3:** Micrografias das seções transversais das soldas do CDP1 atacadas com reagente químico Kroll: (a) vista geral da solda, 25 X; (b) vista do topo da solda, 100 X e; (c) vista da raiz da solda, 100 X.



**Figura 4:** Micrografias das seções transversais das soldas do CDP2 atacadas com reagente químico Kroll: (a) vista geral da solda, 25 X; (b) vista do topo da solda, 100 X e; (c) vista da raiz da solda, 50 X.



**Figura 5:** Micrografias das seções transversais das soldas a TIG do CDP3 atacadas com reagente químico Kroll: (a) vista geral da solda, 25 X e; (b) vista do topo da solda, Zona Fundida (ZF), 200 X.

Em ambos os processos de soldagem, como foram realizadas soldas autógenas e o material foi resfriamento ao ar, a microestrutura bruta de fusão resultou em titânio  $\alpha$ , não havendo transformação de fase. É possível observar nas Figuras 3b e 4b o crescimento de grão na região da zona fundida, acarretando numa morfologia diferente da observada no metal base (Figura 1).

Foram realizadas medidas de dureza no sentido transversal do cordão de solda a meia altura da chapa superior dos corpos-de-prova (CDP) soldados, sendo os resultados apresentados na Tabela 5. Como pode ser observado, não existem grandes variações nos valores da microdureza nas três diferentes condições de soldagem, estando os valores médios no metal base e na zona fundida entorno de 175 HV e 180 HV respectivamente. Esses resultados demonstram que não houve contaminação do material e a proteção gasosa foi eficiente.

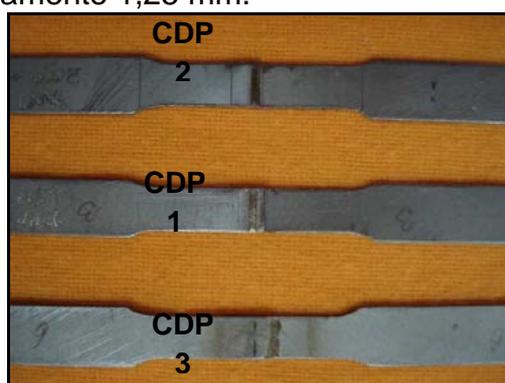
**Tabela 5:** Valores de microdureza Vickers dos corpos-de-prova

	Média (HV)		Desvio Padrão(HV)	
	Metal base	Zona Fundida	Metal base	Zona Fundida
CDP1	176.4	172.2	11.3	19.5
CDP2	176.2	186.7	19.6	9.0

CDP3	171.1	179.6	21.6	19.8
------	-------	-------	------	------

### 3.4 Ensaaios de Tração e Fadiga

Para a realização dos ensaios de tração foram fabricados 4 corpos de prova para cada uma das 3 condições de soldagem estudadas. A Figura 6 mostra um exemplo dos corpos de prova e as diferentes espessuras dos cordões de solda para cada um das condições (CDP1- solda laser, 1.800 mm/min e 700 W; CDP2- solda laser, 3.000 mm/min e 700 W; CDP3 – TIG). Enquanto o cordão de solda a laser tem no topo cerca de 1,6 e 1,2 mm para os CDPs 1 e 2 respectivamente. O cordão de solda referente ao CDP 3 tem aproximadamente 3,0 mm, embora a garganta do cordão tenha aproximadamente 1,25 mm.



**Figura 6:** Foto representativa dos corpos-de-prova soldados nas 3 diferentes condições estudadas.

A Figura 7 correlaciona a carga e o deslocamento para os corpos-de-prova representativos de cada condição de solda, ensaiados em tração. Os valores médios da carga máxima (média de 4 ensaios) foram de 2.071 N, 1.263 N e 2.966 N para os CDPs 1, 2 e 3, respectivamente. O CDP 3, soldado pelo processo TIG, apresentou um limite máximo de resistência superior aos CDPs soldados a laser, conforme mostrado na

Tabela 6. Uma análise mais detalhada do modo de falha desse material, evidenciou que as falhas das soldas a laser (CDP 1 e 2) foram por cisalhamento e o da solda TIG (CDP3) foi por tração. Como os modos de falhas são diferentes, provavelmente o limite máximo de resistência para solda a laser está subestimado. Isto se deve ao fato de que a área a ser considerada no rompimento por cisalhamento deva ser a área da solda entre as duas chapas (área transversal). Além disso, como o cordão da solda a laser não é executado na extremidade da chapa, a resistência da ligação pode ser facilmente dobrada por meio da execução de dois cordões paralelos na junta sobreposta.

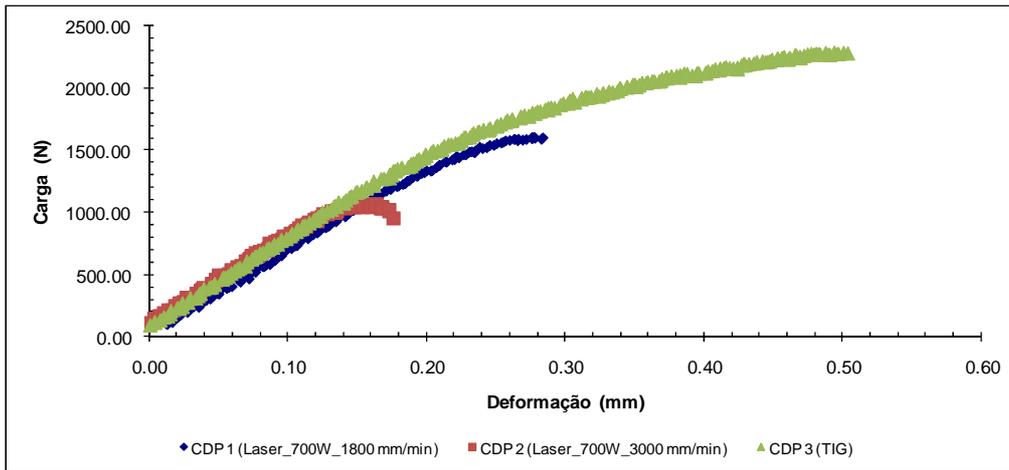


Figura 7: Curvas cargas versus alongamentos representativas para as diferentes condições.

Tabela 6: Limite máximo de resistência dos CDPs

Condição	Limite Resistência (MPa)
CDP1	238
CDP2	136
CDP3	324

Os resultados dos ensaios de fadiga, mostrados na Figura 8, seguiram a mesma tendência do comportamento em tração. Foi possível observar que para os níveis estudados de força máxima, a curva de vida em fadiga para o CDP 3 tem um melhor comportamento do que a referente aos CDP 1 e 2. No entanto, as amostras do CDP 1 ensaiadas a 500 N tiveram o ensaio interrompido com  $2 \times 10^6$  ciclos (run out), enquanto que as amostras da condição CDP 2 falharam entre  $6$  e  $7 \times 10^4$  ciclos.

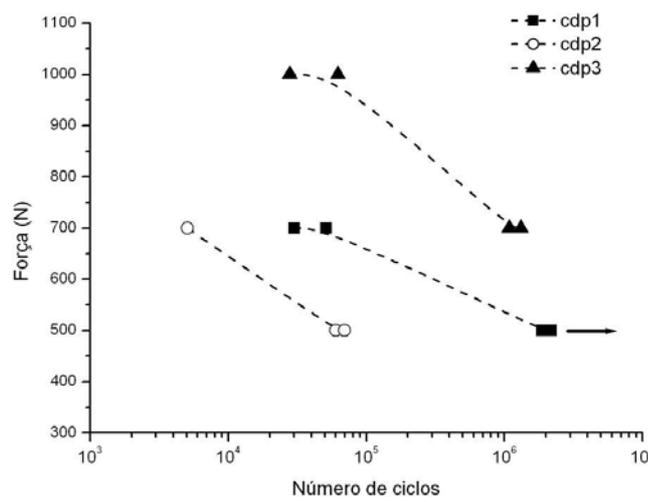


Figura 8: Resultados dos ensaios de fadiga.

#### 4 CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível selecionar um conjunto de parâmetros para a obtenção de ligações soldadas a laser de chapas de titânio sobrepostas. As avaliações microestruturais e de microdureza dos cordões de solda obtidos com o Ti



A40, empregado na fabricação de peças para sistemas pneumáticos de aviões, evidenciaram a adequação do processo. As propriedades mecânicas em tração e fadiga foram comparadas com filetes de solda TIG, obtidos de acordo com o procedimento usual para o material em questão. A melhor condição de solda a laser apresentou limite de resistência igual a 238 MPa, valor inferior aos 324 MPa mostrados pela solda TIG. No entanto, a solda laser falhou por cisalhamento, e sua resistência mecânica pode ser aumentada por meio da execução de dois cordões paralelos. Os ensaios de fadiga mostraram a mesma tendência do comportamento em tração. Este trabalho terá continuidade com análises fractográficas e com a obtenção e avaliação de ligações por soldagem a laser reforçadas (duplo cordão). Deve ser ressaltado que a soldagem a laser é atrativa também por sua produtividade significativamente maior e reprodutibilidade dos resultados.

## REFERÊNCIAS

- 1 SAE ARP 699, Aerospace Recommended Practice: High Temperature Pneumatic Duct Systems for Aircraft. SAE – The Engineering Society for Advancing Mobility Land, Sea, Air and Space, Warrendale, 103p., 1997.
- 2 Lubahn, J.D.; Felgar, R.P. Plasticity and Creep of Metals. John Wiley and Sons, New York, 608p., 1961.
- 3 Chen, L.J.; Yao, G.; Tian, J.F.; Wang, Z.G.; Zhao, H.Y. Fatigue and Creep-Fatigue Behavior of a Nickel-Based Superalloy at 850°C. *International Journal of Fatigue*, V.20, p. 543-548, 1998.
- 4 DONACHIE Jr., M. J., Titanium: a technical guide. ASM, 1988.
- 5 ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, v.2, 1990.
- 6 Adib, A.M.L.; Baptista, C.A.R.P.; Barboza, M.J.R.; Haga, C.; Marques, C.C.F. Aircraft Engine Bleed System Tubes: Material and Failure Mode Analysis. *Engineering Failure Analysis*. V.14, p.1605-1617, 2007.
- 7 Baptista, C.A.R.P.; Barboza, M.J.R.; Adib, A.M.L.; Andrade, M.; Otani, C.; Reis, D.A.P. High Temperature Cyclic Pressurization of Titanium Ducts for use in Aircraft Pneumatic Systems. *Materials and Design*, V.30, p.1503-1510, 2009.
- 8 Casavola, C.; Pappalettere, C.; Tattoli, F. Experimental and Numerical Study of Static and Fatigue Properties of Titanium Alloy Welded Joints. *Mechanics of Materials*, V.41, p.231-243, 2009.
- 9 Majumdar, J.D., Manna, I. Laser processing of materials, *Sadhana*, v. 28, p. 495-562, jun/ago. 2003.
- 10 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.
- 11 (11)Srimaneepong, V; Yoneyama, T.; Kobayashi, E.; Doi, H.; Hanawa, T. Comparative Study on Torsional Strength, Ductility and Fracture Characteristics of Laser-Welded, Ti-6Al-7Nb Alloy, CP-Titanium and Co-Cr Alloy Dental Castings. *Dental Materials*, V.24, p. 839-845, 2008.
- 12 Da Silva, D.R. Análise da Influência dos Gases de Proteção nas Propriedades de Solda a Laser da Liga Ti-6Al-4V. Dissertação (mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2008, 129p.