

CONFORMAÇÃO DE PERFIS DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO COM USO DE LASER*

Rafael Humberto Mota de Siqueira¹

Sheila Medeiros de Carvalho²

Ivan Kwei Liu Kam³

Rudimar Riva⁴

Milton Sergio Fernandes de Lima⁵

Resumo

A conformação a laser (*Laser Beam Forming* – LBF) é um processo mecânico sem contato realizado pela introdução de tensões térmicas na superfície de um material com laser, a fim de induzir a deformação plástica. Neste estudo, foram realizadas conformações em chapas de 1,6 mm de espessura, de alumínio de alta resistência, classe AA6013-T4, com uso de um laser de Yb-fibra operando em modo contínuo. A potência do laser foi variada entre 200 e 1000 W e a velocidade entre 3 e 30 mm/s, com o feixe desfocalizado em 5 mm sobre a superfície da chapa. O ângulo de dobramento das chapas variou entre 0,1 e 2,5° por passe, dependendo das condições experimentais. Na condição de maior ângulo, 1000 W e 30 mm/s, a poça de fusão atingiu 0,6 mm de profundidade, porém sem alterar a microestrutura da parte inferior da chapa. Em todas as condições, a dureza se manteve constante em aproximadamente 100 HV, sendo semelhante ao material de base. Para verificar a aplicabilidade do método, foram desempenadas chapas previamente soldadas na configuração T. O método mostrou-se eficiente em corrigir o empenamento de chapas com inclinação de até 5°.

Palavras-chave: Lasers; Ligas de alumínio; Conformação mecânica.

LASER BEAM FORMING OF AERONAUTICAL ALUMINUM PARTS

Abstract

Laser Beam Forming (LBF) is a no contactless mechanical process accomplished by the introduction of thermal stresses in the surface of a material using a laser in order to induce plastic deformation. In this study, the shaping were performed on 1.6 mm thick sheets of a high strength aluminum alloy, AA6013-T4 class, with the use of a Yb-fiber laser operating in continuous mode. The laser power was varied between 200 and 1000 W and the speed between 3 and 30 mm/s, with a defocused beam at 5 mm above the surface of the plate. The bending angle of the sheet ranged from 0.1 to 2.5 ° per run, depending on the experimental conditions. In the wider angle condition, 1000 W and 30 mm/s, the weld pool has 0.6 mm depth, but without altering the microstructure near to the bottom of the sheet. In all conditions, the hardness remained constant at approximately 100 HV, which is similar to the base material. In order to verify the applicability of the method, it had been straightened some previously T-welded sheets. The method was efficient in correcting the distortion of the sheets with tilt angle up to 5°.

Keywords: Lasers; Aluminum alloys; Mechanical forming.

¹ *Doutorando em Ciências e Tecnologias Espaciais, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil.*

² *Doutora em Engenharia de Materiais, Pesquisadora da Divisão de Propulsão Espacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos, SP, Brasil.*

³ *Graduando, Graduação em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, SP, Brasil.*

⁴ *PhD, Pesquisador Adjunto da SubDivisão de Laser e Aplicações, Divisão de Fotônica, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, SP, Brasil.*

⁵ *Doutor em Engenharia, Pesquisador Adjunto da SubDivisão de Laser e Aplicações, Divisão de Fotônica, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A soldagem a laser tem sido empregada de uma forma geral na indústria, principalmente pelas vantagens em termos de automatização e velocidade do processo. Outra vantagem é o baixo aporte térmico, que traduz por uma pequena zona afetada termicamente, reduz o empenamento e distorção do conjunto soldado. Idealmente, numa solda por penetração (*keyhole*), as distorções da chapa metálica são muito menores que na soldagem a arco, mesmo em espessuras elevadas como aquelas observadas na indústria naval [1].

Nas soldas feitas por condução, ou seja, com menores intensidades do feixe laser, existe claramente um efeito de deformação permanente das chapas. O fenômeno envolvido é chamado de Mecanismo de Gradiente Térmico, ou TGM da sigla em inglês de *Thermal Gradient Mechanism* [2]. O mecanismo é apresentado esquematicamente na Figura 1. No momento que o laser está passando por uma determinada superfície, é gerado um gradiente térmico entre a superfície superior exposta ao laser e a superfície inferior. Isso leva a um empenamento na direção oposta a normal da superfície, ou seja, num primeiro momento a parte central da chapa se “levanta”. Esse dobramento é limitado pelo aparecimento do líquido, que não oferece mais força trativa na chapa. Quando o feixe já passou pelo ponto na superfície da chapa, ocorrem dois fenômenos: (a) contração por resfriamento e (b) contração devido ao rechupe (*shrinkage*). O resultado final é um dobramento em “V” com uma marca (traço fino) na superfície da placa [3].

O processo é cotado para materiais dúcteis como aço [4], alumínio [5] e titânio [5] e já se mostrou viável em escala laboratorial para a conformação de compósitos laminados, tais como alumínio-fibra de vidro [6].

Uma característica particularmente interessante do processo de conformação a laser é a possibilidade de conjugá-lo com a soldagem a laser convencional. Por exemplo, um painel aeronáutico pode ser conformado em dado ângulo pelo pequeno calor residual do processo de soldagem, produzindo diretamente a curvatura necessária [7]. Alternativamente, utiliza-se o laser desfocalizado para produzir a curvatura requerida, após o processo de soldagem [8].

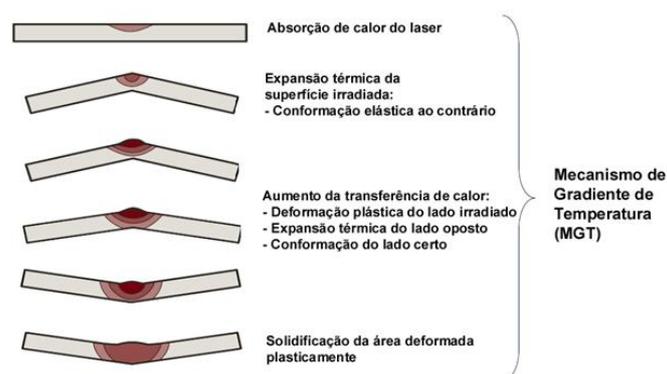


Figura 1. Mecanismos de conformação de uma chapa segundo o critério MGT.

Watkins e colaboradores [5] verificaram que o ângulo de dobramento de uma chapa de alumínio AA2024, com 0,8 mm de espessura, foi de 0,3 a 6° por passe do laser de CO₂. Estes autores utilizaram uma faixa de potência entre 250 e 1300 W e velocidade entre 10 e 140 mm/s, para um diâmetro de feixe de 10 mm, com aplicação de grafite na superfície do alumínio para aumentar a absorvidade. Estes autores verificaram também a possibilidade de aumentar o ângulo de dobramento

pelo aumento do número de passes do laser na mesma trilha. Edwardson e colaboradores [9] mostraram que o aumento do número de passes para aumentar o ângulo atinge um limite de eficiência devido à perda da camada absorvedora, do endurecimento por deformação local e da perda da geometria inicial da peça, dificultando a ação do laser.

O modelamento do processo de conformação a laser é bastante complexo, foi realizado inicialmente pelo método de elementos finitos por Ji e Wu [10]. Shen e Vollertsen [11] realizaram uma revisão da conformação a laser sobre o ponto de vista de simulações de modelos analíticos, numéricos e empíricos. Constataram que o uso de ferramentas computacionais modernas, como do *software* de análise por elementos finitos Sysweld®, permite estimar as temperaturas, tensões e deformações as quais o material passa durante o processo de LBF. Este programa será utilizado neste estudo.

O objetivo da presente contribuição é estudar o processo de conformação a laser utilizando um laser de Yb-fibra, sem necessidade de camadas absorvedoras. Este laser permite operações conjuntas de soldagem e conformação de painéis soldados, como aqueles utilizados em aeronaves comerciais. Assim, será possível eliminar a etapa de conformação dos painéis antes da soldagem, o que causa problemas na fixação e demora na programação dos robôs de soldagem.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado foi uma liga Al-Mg-Mn-Si, classe AA6013-T4, na forma de placas com 1,6 mm de espessura. Nos experimentos em chapas, os corpos de prova (CDPs) com dimensões de 10 x 5 cm, foram lixados com papel SiC de grana 600, lavados e secos com nitrogênio. Os experimentos que utilizaram conjuntos soldados em T, o feixe de laser foi focalizado na superfície externa do conjunto, sendo esta oposta ao reforçador.

O laser utilizado foi um laser de Yb-fibra, modelo YLR-2000 da marca IPG, com potência máxima de 2 kW. O diâmetro mínimo do feixe é 0,1 mm, o que corresponde ao diâmetro da fibra óptica de trabalho. O deslocamento da amostra foi feito por uma mesa CNC de três eixos, sendo que o eixo vertical Z controla o diâmetro do feixe de laser sobre a superfície do material pela focalização. Para os ensaios, o cabeçote do laser foi posicionado 5 mm acima da distância focal, resultando em um diâmetro do feixe de 0,82 mm na superfície da chapa. A potência do laser variou entre 200 e 1000 W e a velocidade de varredura entre 3 e 30 mm/s. O laser realizou uma trilha no meio da chapa no comprimento total de 5 cm.

Nos ensaios, apenas um lado do corpo de prova é preso, estando o outro livre para dobrar. A Figura 2 apresenta um desenho esquemático do processo de LBF empregado. No presente trabalho, foi realizado apenas um passe de laser em cada placa.

As análises dos resultados foram realizadas por meio de um microscópio óptico e um microdurômetro Vickers. As análises por microscopia óptica foram realizadas na seção transversal das chapas, as quais foram polidas e atacadas quimicamente com solução de Keller (2% HF, 10% HNO₃ e 88% H₂O), por aproximadamente 5 segundos. A carga aplicada no ensaio de microdureza Vickers foi de 50gf, durante 9 segundos.

O ângulo de inclinação experimental foi obtido pela medida da altura da extremidade da amostra, para tal fez-se uso de um relógio comparador. O relógio comparador foi

zerado na superfície do outro lado da amostra, firmemente fixada a uma mesa de granito.

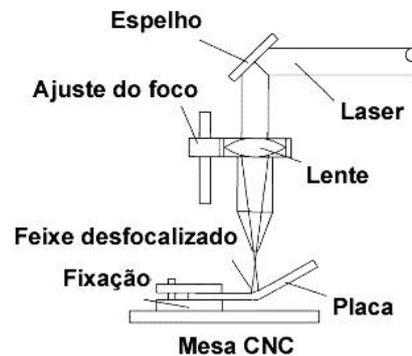


Figura 2. Desenho esquemático do processo de LBF, aplicado no presente estudo.

Os dados experimentais foram comparados com aqueles obtidos por meio do programa de simulação numérica Sysweld®. No Sysweld® foi analisada uma placa de Al-Mg-Si com 200 x 200 x 1,6 mm, com uma linha de tratamento a laser no meio. A velocidade e a potência do laser foram ajustadas conforme aqueles usados experimentalmente. A absorvidade do laser na peça foi fixada em 30%, pois este valor se aproxima das medidas reais das marcas de fusão. Para cada ensaio, foram estimados os seguintes parâmetros: a temperatura máxima no topo do centro da chapa, a temperatura máxima no verso no centro da chapa, a tensão residual no centro/verso da chapa e o ângulo de dobramento final.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Chapas

Depois de realizados os ensaios livres para determinar alguns parâmetros de processo, foram realizados os ensaios onde variou-se a velocidade e a potência do laser, conforme mostra a Tabela 1. Os outros parâmetros foram mantidos constantes e identificados na própria Tabela 1. Foi observada fusão superficial nos CDPs de número 1 a 6.

Tabela 1. Parâmetros de processo

CDP	V (mm/s)	P (W)	Outros parâmetros
1	30	1000	
2	10	1000	
3	3	1000	Proteção gasosa de He
4	30	500	Fluxo 15 l/min
5	10	500	Desfocalização do feixe $\Delta z = 5$ mm
6	3	500	Diâmetro do feixe na superfície da peça = 0.8 mm
7	30	200	Inclinação do cabeçote do laser = 5°
8	10	200	
9	3	200	

A Figura 3 apresenta a seção transversal das amostras produzidas segundo os parâmetros da Tabela 1. Verifica-se claramente a zona fundida nas amostras 1 a 4, enquanto esta é muito superficial nas amostras 5 e 6. No caso das condições 7 a 9,

não houve modificação visível na superfície exposta ao feixe e, portanto, elas não foram ilustradas na Figura 3.

O ângulo de inclinação medido em cada caso varia com os parâmetros do laser. A Figura 4 apresenta os resultados experimentais, nos quais variou-se a velocidade e a potência do laser. Como se vê, o ângulo de dobramento pode variar entre 0° e $2,5^\circ$ para um passe do laser. As condições de 1 a 4 são aquelas nas quais o dobramento mostrou-se mais marcante, variando entre $2,1^\circ$ e $2,5^\circ$, para um passe do laser.

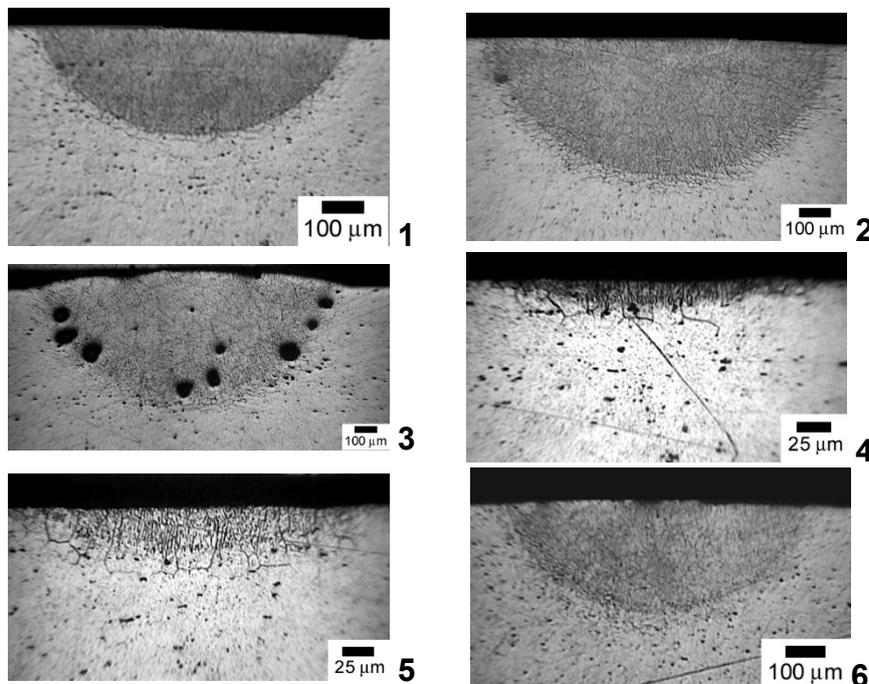


Figura 3. Microscopia óptica da seção transversal das chapas depois de tratadas no laser. Os números se referem às condições apresentadas na Tabela 1.

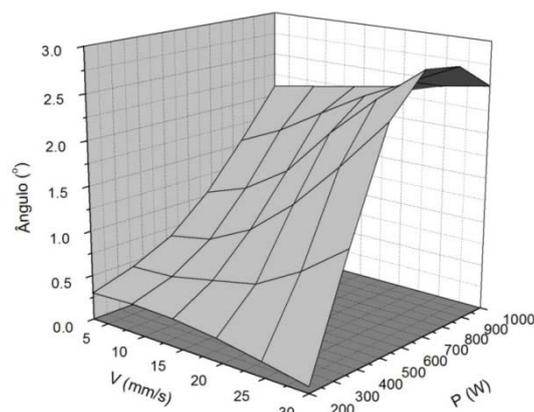


Figura 4. Ângulo de inclinação medido em função da velocidade (V) e da potência (P) do laser.

Não há diferença evidente no nível de dureza obtido nos materiais processados a laser, independente do tipo de tratamento. A dureza manteve-se entre 100 e 160 HV nas regiões analisadas: material base, zona afetada pelo calor, zona fundida e zona deformada plasticamente. A Figura 5 apresenta a medida de dureza Vickers na condição 1, em função da distância; sendo que a origem das abscissas corresponde ao meio do traço. A superfície superior corresponde àquela onde se incidiu o laser. No intervalo onde a fusão é observada, até cerca de 0,7 mm na Figura 5, há uma

pequena variação na dureza, que se situa ligeiramente acima do material de base (100 HV).

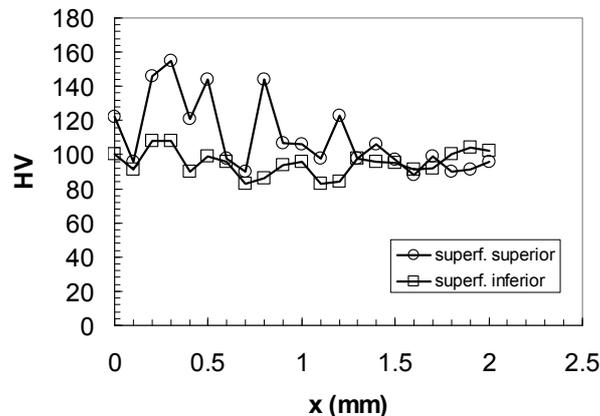


Figura 5. Medidas de dureza Vickers em função da distância, sendo que $x=0$ representa o meio do traço. Condição 1.

Os resultados obtidos com o *software* Sysweld® foram: T_{top} - a temperatura máxima no topo no centro da chapa, T_{ver} - a temperatura máxima no verso no centro da chapa, TR - a tensão residual no centro/verso da chapa e o α_b - o ângulo de dobramento final. A Figura 6 apresenta a evolução de T_{top} e T_{ver} para diferentes velocidades e potências do laser. A linha pontilhada horizontal é a temperatura *liquidus* da liga em questão, mostrando que ocorre fusão na superfície das amostras processadas a 1000 W, bem como aquelas processadas a 500 W e 3 ou 10 mm/s. No verso, a temperatura está sempre abaixo da fusão.

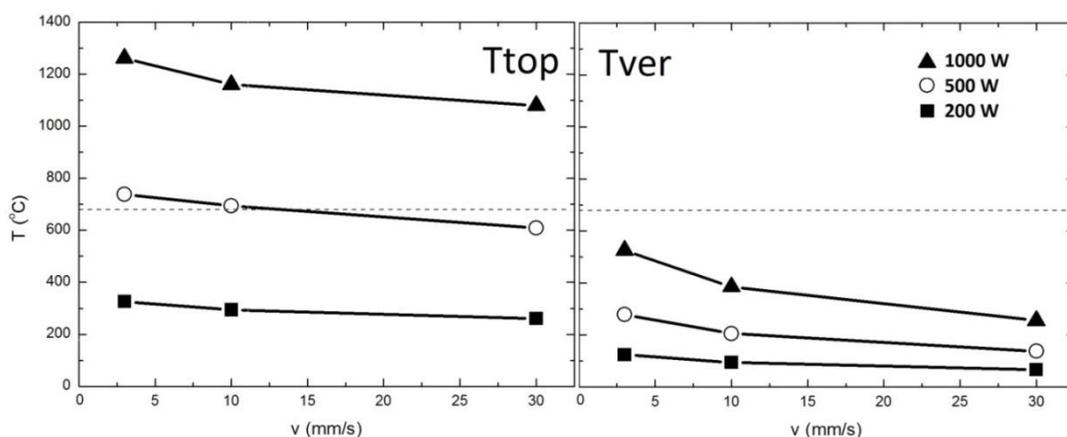


Figura 6. Temperaturas estimadas na superfície superior (T_{top}) e inferior (T_{ver}) das chapas.

A Figura 7 (a) apresenta a estimativa da tensão residual obtida no verso da chapa, segundo as simulações no Sysweld®. O valor da tensão residual varia entre 0 e 100 MPa, dependendo da condição. Esta tende a aumentar com o aumento da potência do laser. Os maiores valores de tensão residual situam-se nas condições nas quais o material passa por refusão na superfície (Figura 6), indicando o forte efeito de retração durante a solidificação sobre a tensão residual. Ainda não existe comprovação experimental desses valores de tensão residual.

Os ângulos calculados, pelo *software* de simulações Sysweld®, para as condições de estudo podem ser vistos na Figura 7 (b). O gráfico calculado guarda semelhança

com o obtido experimentalmente, no entanto, os ângulos teóricos são aproximadamente metade dos obtidos experimentalmente. Isso pode ser reflexo do tipo de fixação das chapas durante o processo. Na simulação, as chapas são livres para se movimentar, enquanto nos experimentos as chapas precisam ser fixadas para manterem a linha de tratamento do laser.

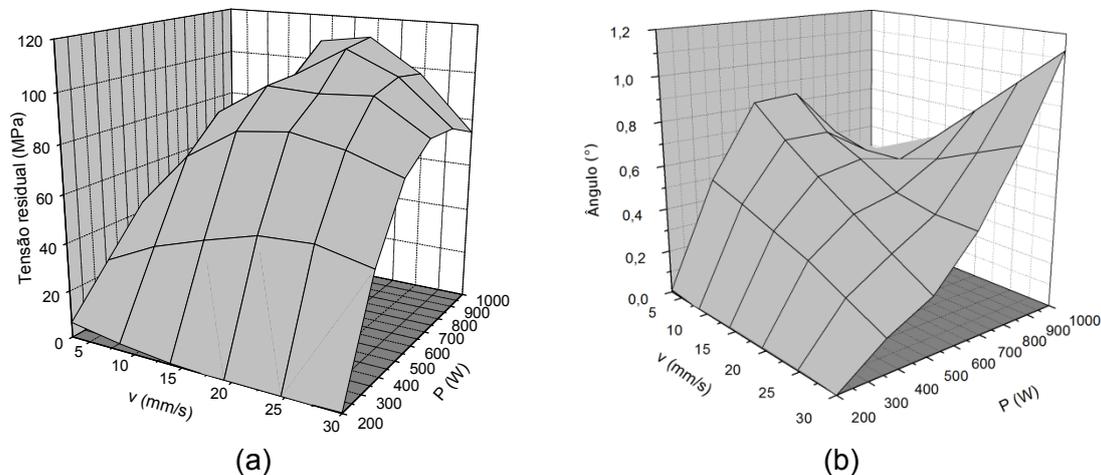


Figura 7. (a) Resultados calculados da tensão residual em função dos parâmetros de processo, potências (P) e velocidades (V) e (b) Ângulos de dobramento calculados para diferentes potências (V) e velocidades (V).

A fusão parcial da superfície da chapa durante o deslocamento do laser aumenta o ângulo de dobramento em relação ao processo sem fusão. As condições 1 a 4 produzem ângulos entre $2,11^\circ$ e $2,52^\circ$ depois de processadas com laser. As amostras nas quais a fusão foi superficial, condição 5 e 6, apresentam ângulos de $0,74^\circ$ e $0,62^\circ$, respectivamente. Finalmente, com aquecimento no estado sólido (condições 7, 8 e 9), foram obtidos ângulos entre $0,07^\circ$ e $0,32^\circ$. Isto indica que a retração de solidificação tem um papel mais importante que o efeito da dilatação térmica.

Considerando agora um painel aeronáutico qualquer, como aquele apresentado por Genicolo [12], verifica-se uma placa de alumínio com 3 m de comprimento, 1,9 m de largura e 1,6 mm de espessura. Neste painel, foi projetado um raio de curvatura de 1,1 m para união das cavernas por rebiteagem. Considerando que a chapa deste painel seja composta de AA6013-T4, é possível estimar a quantidade de traços que serão necessários para se conseguir a curvatura requerida. Como são necessários quatro painéis para o fechamento da caverna, então o ângulo total deve estar em torno de 45° . Com aproximadamente $2,5^\circ$ por traço do laser, necessitar-se-á de dezoito traços do laser para completar a curvatura. Com uma largura de 1,9 m, o espaçamento entre as linhas pode ser de 100 mm, o que torna bastante confortável para se interpor entre os espaços deixados entre as longarinas (*stringers*). Ademais, pode-se escolher trabalhar com mais traços de laser para que o efeito de poligonização do perfil não fique evidente do lado externo do painel.

A profundidade de interação precisa ser mantida em níveis suficientemente baixos, para não afetar a estrutura metalúrgica da chapa na parte exposta ao meio ambiente externo. Conforme verifica-se na Figura 3, as profundidades de refusão foram 0,3, 0,5, 0,6 e 0,4 mm para as condições 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Isto equivale a até 38% da espessura da chapa. Este valor é suficientemente baixo para ser removido pelo trabalho de canelamento da estrutura do painel. No entanto, a condição 3 deve ser descartada uma vez que a mesma apresentou porosidades na zona de fusão.

O fato de não haver modificações na dureza antes e depois da conformação é sinal que não se espera mudanças significativas no comportamento mecânico estático do painel depois de conformado. No entanto, este resultado não é suficiente para provar a utilidade desta tecnologia, uma vez que o painel está sujeito a vários fatores, como a fadiga estrutural.

3.2 Soldas em T

Considerando a efetividade da técnica para a conformação de chapas, procurou-se utilizar o procedimento para desempenar chapas que foram utilizadas na soldagem de juntas do tipo T, de longarinas (*stringers*) sobre o revestimento (*skin*). O corpo de prova agora é aquele apresentado na Figura 8.

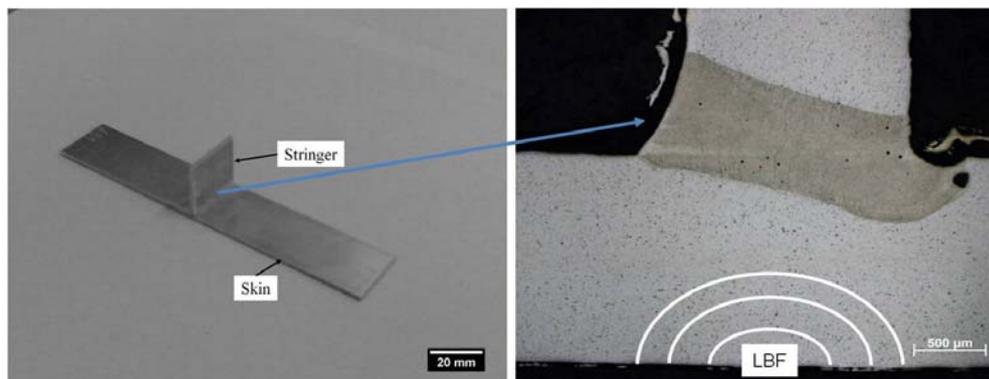


Figura 8. Amostra soldada a laser e detalhe da solda com a região oposta para conformação a laser – LBF.

Utilizando o mesmo procedimento adotado para as chapas, foi realizado o desempenho dos revestimentos conforme mostrado na Figura 9. Na figura fica evidente a efetividade do processo de desempenho para conjuntos soldados em diferentes condições experimentais. Variando-se o número de passes de 1 a 3 vezes, é possível corrigir ângulos de até 5°.

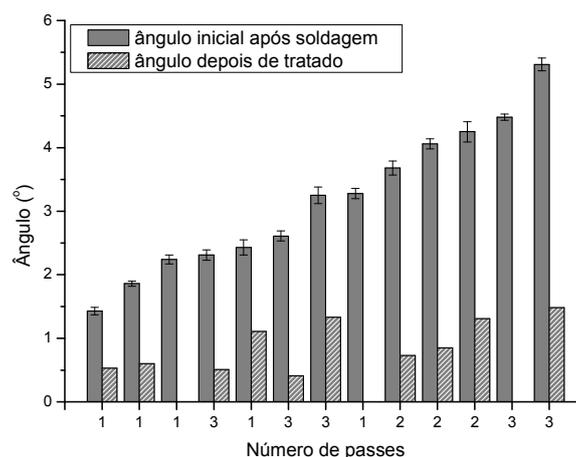


Figura 9. Medidas do ângulo obtido após a soldagem e após o tratamento LBF.

4 CONCLUSÃO

Foi proposta uma tecnologia de conformação sem contato com uso de laser, testada para chapas de 1,6 mm de espessura de alumínio aeronáutico AA6013-T4. Foi

utilizado um laser de Yb-fibra de alta potência que pode proporcionar tanto a soldagem como a conformação no mesmo *set-up*. Dentro dos parâmetros experimentais utilizados, foram obtidos corpos de prova com e sem fusão. Os CDPs que apresentaram os maiores ângulos de inclinação foram aqueles onde houve fusão, a qual nunca ultrapassou 38% da espessura da chapa. Foi obtido um ângulo de dobramento de 2,5°, para uma potência de 1000 W e velocidade de 30 mm/s. Os resultados do Sysweld® permitem obter as temperaturas, as tensões residuais e os ângulos de dobramento com certa precisão, porém o modelo precisa ser refinado para levar em consideração as reais condições experimentais. Considerando a aplicação da tecnologia em conformação de painéis aeronáuticos, foi mostrado que o processo é plenamente aplicável a um caso real de painel soldado. O método se mostrou eficiente para desempenho de até 5° em soldas do tipo T.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER) por ceder às chapas de alumínio e a CAPES por bolsa de estudo de doutoramento.

REFERÊNCIAS

- 1 Dearen, G., Edwardson, S.P., 2003, "Laser Assisted Forming for Ship Building", Proceedings of SAIL 2003, Williamsburg, VA. June 2-4, 2003, 14p.
- 2 Shi, Y. et al., 2006, "Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 1689-1697.
- 3 Zhong, J., Wu, S., 1998, "FEM simulation of the temperature field during the laser forming of sheet metal", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 74, pp. 89-95.
- 4 Yang, L.J. et al., 2010, "Surface characteristic of stainless steel sheet after pulsed laser forming", Applied Surface Science, Vol. 256, pp. 7018-7026.
- 5 Watkins, K.G. et al., 2001, "Laser Forming of Aerospace Alloys", Proceedings of AMTC, Seattle (EUA), Sep. 2001, Society of Automotive Engineers, Paper number 2001-01-2610, 7 p.
- 6 Carey, C. et al., 2010, "Towards a rapid, non-contact shaping method for fibre metal laminates using a laser source", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 47, pp. 557-565.
- 7 Jullien, J.F., Combescure, A., Zain-ul-abdein, M., 2008, "Investigation of laser-beam welding induced distortions in thin sheets of Al 6056T4", Structures and Granular Solids, Chen et al. (eds), Taylor and Francis Group, London, pp. 145-151.
- 8 Hornfeck, T., Trautmann, A., Oefele, F., 2009, "Laserstrahlumformen von Aluminiumlegierungen fuer die Luft- und Raumfahrt", Relatório IWB, Institut fuer Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, 1p.
- 9 Edwardson, S.P. et al., 2007, "Key factors influencing the bend per pass in laser forming", Proceedings of ICALEO 2007 Congress Proceedings, Laser Materials Processing Conference, pp. 508-514.
- 10 Ji, Z., Wu, S., 1998, "FEM simulation of the temperature field during the laser forming of sheet metal", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 74, pp. 89-95
- 11 Shen, H., Vollertsen, F., 2009, "Modelling of laser forming - an review", Computational Materials Science, Vol. 46, pp. 834-840.
- 12 Genicolo, M.A.C., 2007, "Estudo de viabilidade para implementação de uniões soldadas pelo método friction stir welding em estruturas aeronáuticas", Tese (Mestrado), Universidade de São Paulo, 62p.