

AValiação de Deformações e Tensões Residuais nas Juntas Soldadas Produzidas a Laser em Ligas de Alumínio com Restrição e sem Restrição Mecânica

Olga Liskevych, olga.liskevych@ufes.br¹

Gabriela Lugão de Souza Zatta, gabrielalugaosz@gmail.com¹

Gabriel Fracalossi Feijo, gabriel.feijo@edu.ufes.br^{2,4}

Elton Mesquita de Almeida, eltonmesquitaalmeida@gmail.com²

Milton Sergio Fernandes de Lima, msflima@gmail.com³

Sheila Medeiros de Carvalho, sheila.m.carvalho@ufes.br¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Mecânica – Centro Tecnológico, Vitória - ES, Brasil

²Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento – CPID, Cariacica – ES, Brasil

³Instituto de Estudos Avançados – IEAv/DCTA, São José dos Campos – SP, Brasil

⁴Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) - UFES, Vitória – ES, Brasil

Resumo: O estudo das tensões residuais provenientes das operações de soldagem é de grande importância, pois a sua subestimação ou falta de controle podem levar às deformações dos componentes soldados, deterioração das propriedades mecânicas ou até mesmo às falhas das estruturas metálicas. Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação sistemática da contribuição dos parâmetros de controle, tais como energia de soldagem e restrição mecânica, na geração de tensões residuais, sua natureza e distribuição, assim como nas possíveis deformações oriundas do processo de soldagem a laser das ligas de alumínio. Para esse fim, os corpos de prova de AA6013-T4 foram soldados variando a quantidade de passos com presença e ausência de restrição mecânica durante o procedimento. Posteriormente, deformações e tensões residuais foram medidas, estas últimas com a utilização da técnica ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) combinada com método do furo-cego nas regiões de zona fundida, zona termicamente afetada e no metal base. Em relação às deformações, foi observado que um maior número de passes de soldagem a laser contribui para uma maior deformação angular, entretanto, esse aumento não é proporcional. Também foi concluído que, para a espessura e condições de soldagem testados, praticamente todas as tensões térmicas são aliviadas na forma de deformações angulares quando não há restrição mecânica da junta, ou seja, nesses casos é imprescindível o uso de métodos de controle de deformações. Em relação às tensões residuais, foi observado que um número de passes de soldagem não tem uma influência significativa nas tensões longitudinais e transversais medidas na zona fundida dos cordões de solda. Entretanto, a restrição imposta a junta durante soldagem a laser tem efeito significativo tanto nas intensidades das tensões residuais, quanto na sua distribuição, indicando ainda presença de tensões trativas na zona afetada pelo calor, mesmo no processo de soldagem de alta intensidade.

Palavras-chave: deformações, tensões residuais, soldagem a laser, restrição mecânica, AA6013-T4

1. INTRODUÇÃO

A técnica de soldagem a laser (*Laser Beam Welding – LBW*) vem ganhando cada vez mais espaço no setor produtivo devido várias vantagens em comparação aos processos de união convencionais, tais como redução de peso das estruturas, maior produtividade, melhoras nas propriedades mecânicas e possibilidade de unir materiais dissimilares. Mas mesmo considerando estas vantagens, o processo de soldagem a laser tem um grande impacto nas características resultantes dos componentes mecânicos soldados e, conseqüentemente, no seu comportamento em serviço. Entre outros fatores, as transformações ocorridas também são determinadas por desenvolvimento de tensões térmicas recorrentes de fusão localizada do material e grandes gradientes térmicos presentes durante o processamento a laser.

Conforme apontado por Scotti (2014), o desenvolvimento destas tensões térmicas (TT) no material soldado pode se manifestar de três formas: como deformações; como tensões armazenadas (tensões residuais - TR); ou como falha (colapso, total ou parcial, por exemplo, como uma trinca propagada e estancada). As deformações normalmente ocorrem na soldagem de componentes de espessuras mais finas devido a sua baixa autorestrição, como foi, por exemplo, relatado por Cabral e colaboradores (2013). Embora estas sirvam como alívio de TR, são classificadas como descontinuidades

estruturais dimensionais (AWS, 2001) e podem comprometer a funcionalidade do componente soldado. Por sua vez, a subestimação ou falta de controle das TR provenientes das operações de soldagem podem levar a falhas catastróficas em serviço (Fig. 1), ou como resultado menos nocivo, na deterioração das propriedades mecânicas dos componentes. Por exemplo, a análise detalhada realizada por Kudryavtsev *et al.* (2017) demonstrou que a presença de TR nas juntas soldadas carregadas ciclicamente leva à redução drástica da resistência a fadiga dos componentes e o seu efeito pode ser comparado a presença de um concentrador de tensões.

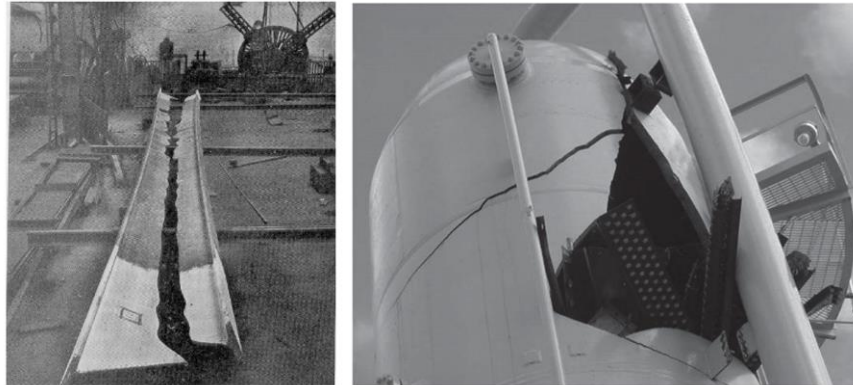


Figura 1. Exemplos de falhas causadas por alívio de tensões residuais (Steinzig *et al.*, 2014; Scotti, 2014)

Entre os parâmetros de controle na soldagem a laser que contribuem para geração dessas tensões, analisados e sistematizados de uma forma generalizada por Mishchenko & Scotti (2018), destacam-se a potência do laser (P), a velocidade de soldagem (V), as propriedades e espessura do material, e o tipo de restrição mecânica ao qual a junta será submetida (podendo ser imposta pela configuração ou geometria da estrutura soldada, ou ainda pela condição térmica inicial imposta ao componente). Conforme explicado pelos autores, todos esses parâmetros influenciam diretamente no volume do material aquecido, taxa de resfriamento, transformações metalúrgicas, que por sua vez, governam a geração de TT e, conseqüentemente, possibilidade de seu alívio e TR.

Hogenlocher *et al.* (2020) investigaram a influência da energia de soldagem e a presença de TR na formação de trincas a quente durante soldagem a laser de chapas de alumínio AA6014. Os autores concluíram que a velocidade de soldagem de 3 m/min e energia de soldagem da ordem de 20-25 J/mm², evitam a formação de trincas a quente em chapas que possuem TR na faixa de 110 MPa. Por sua vez, Moraitis e colaboradores (2008) simularam numericamente os valores de TR e deformação obtidos em juntas sobrepostas de chapas de alumínio 6061-T6 para diferentes parâmetros de soldagem (potência do laser, velocidade de soldagem e ângulo de trabalho). Entre outros resultados, os autores observaram que no início da soldagem a laser (run-in) as deformações não são uniformes e as deformações são maiores no lado em que o laser entra na chapa. No final da solda, as deformações começam a ser mais uniformes. Esse fenômeno pode ser explicado por meio da autorestrição diferencial da junta sendo soldada no início e no final do processo.

Além dos fatores que determinam a geração das TT e TR na soldagem a laser, o conhecimento da natureza dessas tensões, sejam elas trativas ou compressivas, e da sua distribuição é de extrema importância para prever o comportamento do componente em serviço. Assim, conforme explicado por Totten *et al.* (2002), as tensões trativas são deletérias aos materiais submetidos a carregamentos cíclicos, por contribuírem para a propagação de trincas, levando o material a falhar por fadiga. Por outro lado, as tensões de natureza compressivas podem ser benéficas, por dificultar a nucleação e a propagação de trincas, reduzindo ou compensando a tensão total na superfície da peça.

A natureza e distribuição típica das TR no cordão de solda produzido por processo convencional são apresentados na Fig. 2, indicando que as tensões compressivas (benéficas) estão concentrados no metal base, enquanto as trativas (de possível impacto negativo) se encontram parcialmente na região da ZAC (região de maior fragilização do cordão de solda) e na zona fundida.

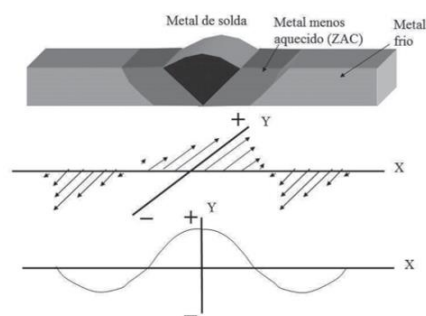


Figura 2. Representação das tensões térmicas/tensões residuais geradas no sentido longitudinal de um cordão soldado (Scotti, 2014).

Nesse sentido, há outra conclusão relevante do estudo de simulação numérica para soldagem a laser das TR e deformações em juntas sobrepostas de chapas de alumínio conduzido por Moraitis e colaboradores (2008). Os autores relataram que as TR longitudinais no cordão de solda atingem os valores máximos de -160 MPa (tensões trativas) no centro da zona fundida e decrescem rapidamente até os valores praticamente nulos, o que está de acordo com o modelo citado acima. Com relação às TR transversais, as tensões médias foram relatadas da ordem de -60 MPa (compressivas). Além disso, foi demonstrado que as tensões máximas, tanto longitudinais quanto transversais, ocorreram até uma profundidade de cerca de 1 mm.

Apesar da importância do assunto, há poucas análises na literatura em relação à distribuição das TR (longitudinais e transversais) no cordão de solda, sua correlação com as deformações provocadas, a autorestrição controlada durante a soldagem e os parâmetros de controle do processo, tanto para métodos convencionais, quanto para soldagem a laser. Provavelmente isso se deve a dificuldade de avaliação isolada da influência desses parâmetros e a sua interrelação complexa, assim como acurácia e precisão baixas das técnicas experimentais e numéricas aplicáveis as juntas soldadas. Dessa maneira, este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação sistemática da contribuição da energia de soldagem e da restrição mecânica para geração de TR e das deformações nas juntas soldadas por LBW em liga de alumínio AA6013-T4. Esse estudo visa a melhorar o entendimento de como e por que as TT se manifestam na forma de deformações ou TR, contribuindo dessa maneira para modelos e simulações de comportamento de estruturas soldadas em serviço.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atender os objetivos desse trabalho, chapas de liga de alumínio AA6013-T4 com 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 1,3 mm de espessura foram soldadas pelo processo LBW na sua parte central, sem abertura de chanfro. O procedimento foi realizado mantendo a potência do laser e velocidade de soldagem constantes, variando apenas o número de passes sobrepostos de 1 a 3. Com intuito de isolar o efeito das tensões térmicas na deformação angular resultante, uma extremidade dos corpos de prova foi restringida mecanicamente durante a soldagem e outra permaneceu livre (Fig. 3).

O material escolhido faz parte da classe de ligas 6XXX, que possui como principais elementos de liga o magnésio e o silício, e uma concentração de cobre que pode chegar a 1,1%. A maior concentração de cobre confere maior resistência mecânica à liga, podendo ser comparada a algumas ligas Al-Cu, sem prejudicar suas boas características de soldabilidade. A chapa passou por um tratamento térmico de solubilização e envelhecimento natural (T4) para adequação das propriedades mecânicas.

2.1. Soldagem a laser

O laser a fibra utilizado neste trabalho está instalado no Laboratório de Desenvolvimento de Aplicações de Laser e Ótica (DEDALO) da Divisão de Fotônica (EFO) do IEAv e é ilustrado na Fig. 3. Trata-se de um laser de 2 kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000) com comprimento de onda de 1,07 μm . 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, Y de 508 mm e Z de 215 mm. O eixo Z fixa a óptica de focalização e facilita posicionar corretamente o foco do feixe de laser sobre a amostra.

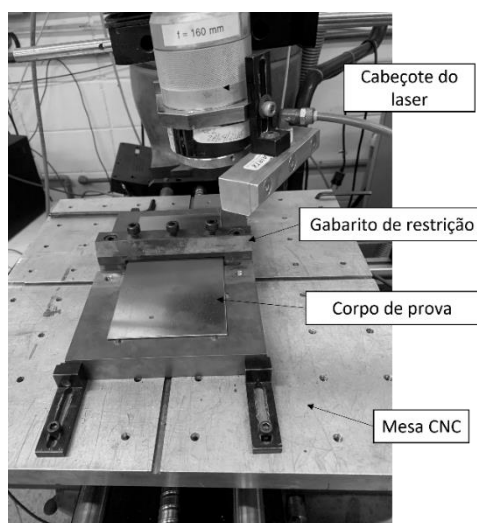


Figura 3. Conjunto cabeçote do laser e mesa de processo junto com detalhe da montagem da chapa na mesa de processo.

Na condição de focalização do feixe de laser no plano focal, o diâmetro do feixe foi de 0,1 mm, sendo o mesmo diâmetro da fibra óptica de trabalho. No entanto, no presente estudo o feixe de laser foi desfocalizado em 5 mm, o que confere um diâmetro do feixe de laser de 0,82 mm. Esta desfocalização foi realizada para diminuir a intensidade do feixe, privilegiando uma solda por condução em detrimento a uma solda por penetração. O procedimento permitiu entender melhor o efeito de número de passes na geração de TTs e sua relação com as deformações e TRs. O cabeçote foi inclinado de um ângulo de 2° em relação ao plano de trabalho, de forma a evitar que a reflexão do feixe de laser danificasse a fibra óptica. Para melhorar a absortividade, foi aplicado um filme de carbono por meio de spray. Não foi utilizado gás de proteção e a potência do laser e a velocidade de soldagem foram mantidas fixas em 200 W e 3 mm/s, respectivamente, e o número de passes foi variado de 1 a 3, sendo o primeiro corpo de prova soldado com apenas um passe, segundo com dois e o terceiro com três passes.

2.2. Medição de deformações

Para avaliar a deformação angular resultante de alívio de TT decorrentes de soldagem a laser, os corpos de prova foram fixados em uma mesa de desempenho na sua parte não deformada (aquela que foi mecanicamente restringida durante a soldagem). Dessa maneira foi possível medir a altura máxima h na extremidade oposta, utilizando um equipamento para medições dimensionais Tesa-Hite 700, com resolução de 0,001 mm, instalado no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal do Espírito Santo, conforme demonstrado na Fig. 4(a). Posteriormente, a deformação angular α foi definida como sendo a razão entre a altura medida h e o comprimento original da peça L , conforme demonstrado na Fig. 4(b).

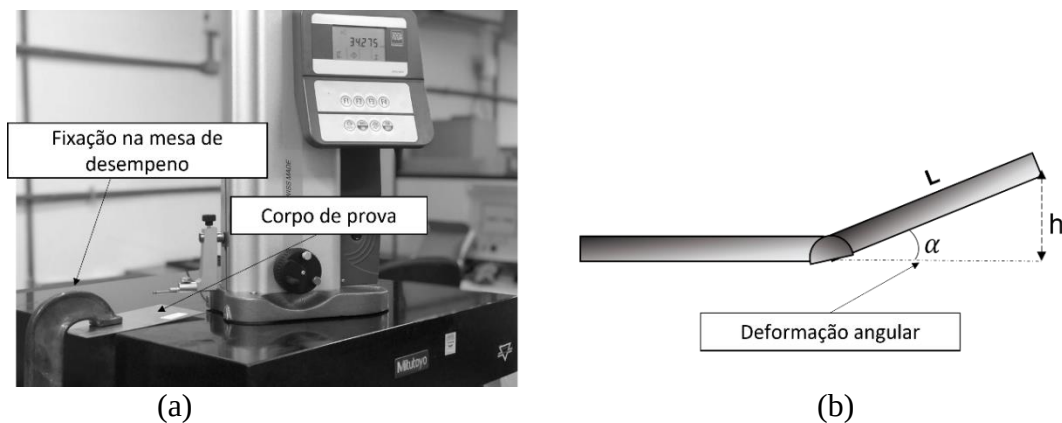


Figura 4. Medição de deformação angular dos corpos de prova soldados a laser:

a) detalhe do conjunto de medições dimensionais Tesa-Hite 700; b) definição da deformação angular medida.

2.3. Medição de tensões residuais

Para medição das TRs foi utilizada uma técnica ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) combinada com método do furo-cego, seu princípio de funcionamento encontra-se descrito detalhadamente nos trabalhos de Steinzig *et al.* (2014) e Ponslet *et al.* (2003). A técnica consiste basicamente em usinar um pequeno furo na superfície do componente a ser avaliado, registrar e processar as mudanças no estado de tensões que acontecem durante esse processo. A usinagem do furo provoca, a cada passo de profundidade, o alívio das tensões existentes que atuam no volume de material removido. As mudanças provocadas nos estados de deformação em pontos da região no entorno do furo resultam em deslocamentos (franjas) que são registrados por um sistema óptico e processados numericamente como interferogramas digitais. Um exemplo de franjas causadas por alívio de tensões durante a usinagem do furo é demonstrado na Fig. 5.

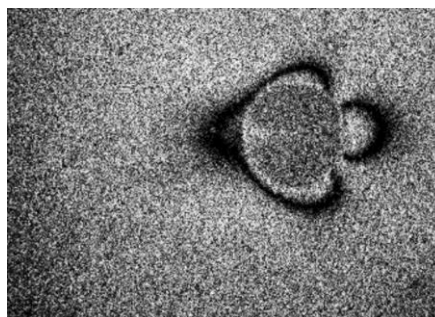


Figura 5. Deslocamentos (franjas) provocadas por alívio de tensões durante a usinagem do furo, que são registrados e processados como interferogramas digitais.

O equipamento utilizado para medição de tensões residuais, ilustrado na Fig. 6, está situado no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do Estado do Espírito Santo e é composto por um laser, câmera, furadeira e suporte para fixação do corpo de prova. O feixe de laser, com todas suas propriedades conhecidas, é dividido em dois. O primeiro feixe de luz é lançado no corpo de prova e refletido para o sistema ótico (câmera). Já o segundo, de referência, passa por um sistema de mudança de fase piezoelétrico e posteriormente é direcionado para o sistema ótico onde ele interfere com a luz refletida pela superfície do corpo de prova, dessa forma, gerando um padrão de interferência.

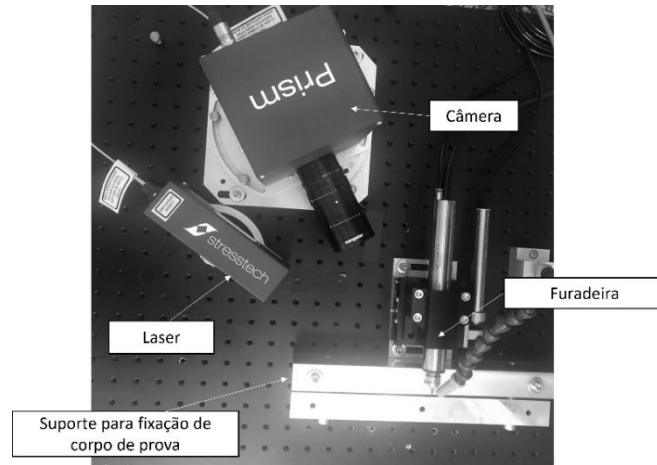


Figura 6. Equipamento para medição de tensão residual (combinação de técnicas ESPI e furo-cego).

Ao final do furo, as imagens são capturadas a cada incremento de profundidade (um exemplo é dado pela Fig. 7) com mudanças de padrão de interferometria devido a alteração de estado de tensões no material usinado. As imagens são processadas por algoritmo do software do equipamento que fornece como resposta os valores de tensão longitudinal (σ_y), transversal (σ_x) e de cisalhamento (τ), conforme ilustrado na Fig. 8. Vale a ressaltar que para os fins desse trabalho foi adotado o modelo de distribuição das tensões junto com respectivos eixos do cordão de solda, conforme representado na Fig. 2, onde as tensões longitudinais (σ_y) são distribuídos ao longo do eixo Y (eixo coincidente com a linha do cordão de solda), e as tensões transversais (σ_x) são distribuídos ao longo do eixo X (eixo perpendicular ao cordão de solda).

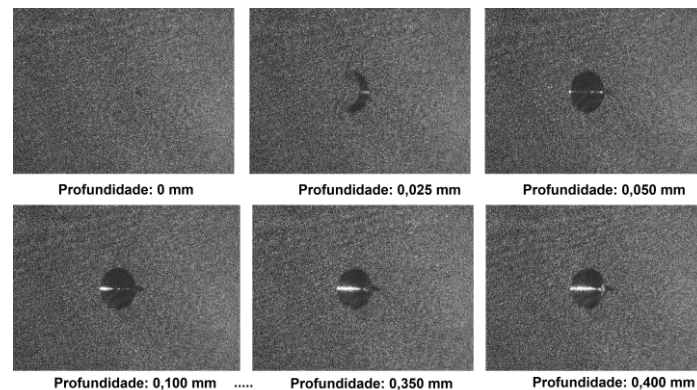


Figura 7. Padrão de imagens a cada incremento de furação processados para obter os valores de tensões presentes no material ensaiado

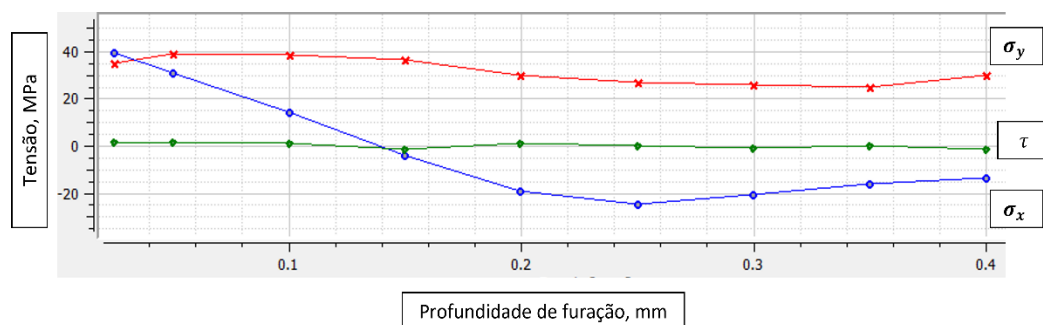


Figura 8. Representação de resultados de medição de tenções residuais longitudinais σ_y , transversais σ_x e cisalhantes τ em função de profundidade do furo.

Como os valores de tensões são fornecidos a cada 0,050 mm de incremento na profundidade do furo, os estados da tensão na superfície do corpo de prova (devido a um processo de fabricação anterior a soldagem, por exemplo), somados as limitações do sistema óptico (principalmente, no fundo do furo), causam variações nos resultados de medição, como pode ser observado na Fig. 8. Assim, para os fins de comparação foram utilizados os dados obtidos nos intervalos de furação entre 0,2 e 0,3 mm, levando em consideração as imagens com menor porcentagem de pixels defeituosos (em torno de 11-12%). Para os fins desse estudo, a tensão de cisalhamento foi desconsiderada.

As furações foram realizadas conforme apresentado na Fig. 9, com intuito de medir as TR no metal base (MB), zona fundida (ZF) e zona afetada pelo calor (ZAC) tanto do lado que foi restrito durante a soldagem, quanto do lado que ficou livre e deformou. As medições foram feitas para 3 amostras soldadas com 1, 2 e 3 passes, respectivamente.

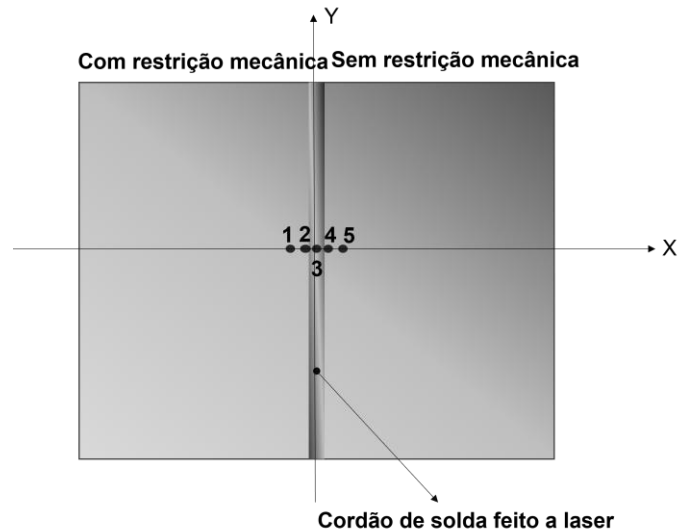


Figura 9. Representação esquemática de realização de furações para ensaio de medição de TR.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Efeito de soldagem a laser na deformação angular

Os resultados de medição de deformação angular são apresentados na Tab. 1. Como foi esperado, maior número de passes de soldagem contribuiu para uma maior deformação angular. Entretanto, esse aumento não foi proporcional. Como pode ser visto, de primeiro passe para o segundo, a deformação angular aumentou $4^{\circ}05'$, enquanto de segundo passe para o terceiro, o aumento foi de apenas $1^{\circ}39'$.

Tabela 1. Deformação angular dos corpos de prova soldados por processo LBW

CP	Es (J/mm)	Número de passes	Altura h (mm)	sen (α)	Deformação angular (α)
1	66,7	1	4,218	0,0422	$2^{\circ}30'$
2	66,7	2	11,480	0,1148	$6^{\circ}35'$
3	66,7	3	13,260	0,1326	$8^{\circ}14'$

Segundo a relação entre os parâmetros de controle na soldagem e os fenômenos que de fato governam a geração de TT (Mishchenko & Scotti, 2018), o efeito de volume aquecido a uma dada temperatura e o efeito da taxa de resfriamento podem ser desconsiderados na tentativa de explicar essa diferença, pois os passes subsequentes foram realizados apenas após o resfriamento completo dos passes anteriores, ademais, a energia de soldagem para todos os passes foi igual.

O efeito desproporcional do número de passes pode então ser explicado por transformações metalúrgicas ocorridas e mudanças consequentes nas propriedades do material. Assim, supõe-se que existam dois efeitos que contribuem para a saturação do ângulo de deformação com o aumento do número de passes. Primeiro, o efeito da retração de solidificação, referente a parcela do material que sofreu fusão, o qual está diretamente relacionado a absorvidade do feixe de laser pelo material. No primeiro passe, a superfície está relativamente plana e lisa, com uma camada solta de grafita e consequentemente uma baixa absorvidade. A partir do segundo passe, a camada de grafita se encontra aderida como um filme, permitindo uma melhor transferência de calor (Carey, 2007). Ademais, no segundo passe, há uma superfície previamente modificada pelo primeiro passe, pois sua rugosidade aumentou devido à ressolidificação da trilha anterior, o que também contribui para o aumento da absorvidade e, consequentemente, para o maior aumento da deformação angular no segundo passe em relação ao primeiro.

Neste raciocínio, espera-se que o terceiro passe ofereça uma eficiência de dobramento, medida pela deformação angular da peça, ainda maior. No entanto, não é isso que ocorre. O que pode ser explicado pelo encruamento do material, oriundo dos passes anteriores, no corpo de prova soldado com 3 passes. Sabe-se que o encruamento modifica o valor do limite de escoamento do material, aumentando assim a tensão necessária para que o material seja deformado. Como não houve tempo e nem temperatura suficientes nos interpasses para quaisquer mecanismos de relaxamento de tensões ou recristalização, seria necessário um aporte térmico maior (o que não aconteceu devido a energia de soldagem constante), para que a deformação do terceiro passe superasse o patamar de saturação.

3.2. Efeito de soldagem a laser nas tensões residuais

Por vez, a Tab. 2 apresenta a relação das TRs medidas em diferentes regiões do cordão de solda levando em consideração restrição imposta durante o processo de soldagem.

Tabela 2. **Tensões residuais (MPa) medidas do lado restrito e do lado não restrito (e deformado) nos corpos de prova soldados por processo LBW**

Número de passes	Lado restrito da peça				Zona Fundida		Lado livre da peça			
	Metal Base		ZAC				ZAC		Metal Base	
	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x
1	-18,1	28,2	71,8	29,6	102,3	53,2	13,1	2,4	7,92	1,92
2	-20,0	31,3	70,0	31,9	98,1	47,5	13,9	9,2	5,4	3,47
3	-35,5	38,7	75,3	40,3	106,0	49,2	8,5	7,5	9,7	-1,1

Pode ser visto na Tab. 2 que o número de passes não teve uma influência significativa na mudança de TRs (longitudinais e transversais) na região da zona fundida do cordão de solda, apresentando variação de $\pm 3,95$ MPa (aproximadamente 4% em relação à média) para σ_y e $\pm 2,93$ para σ_x (6%, respectivamente). Estes valores são compatíveis com incerteza de medição do próprio método de medição. Isso leva a conclusão de que a energia de soldagem do processo não pode ser considerada como um somatório de energias de cada passe realizado – dúvida levantada pelos autores no início desse estudo – para análise dos fenômenos metalúrgicos ocorridos durante o processo e para análise das TT e das TRs. Da mesma forma, não houve variações significativas nas TRs das zonas afetadas pelo calor (ZACs) e do metal base, para diferentes números de passes, medidas do lado não restrito e deformado. Essa observação, junto como os valores baixos das tensões medidas, leva a conclusão de que, nesse caso, as TT geradas durante a soldagem majoritariamente foram aliviadas na forma de deformação angular, discutida anteriormente.

Já a influência da restrição imposta a junta durante soldagem a laser foi significativa e uma ilustração disso pode ser observada na Fig. 10. As TR longitudinais (σ_y) medidas do lado que foi restrito resultaram em valores maiores na ZAC e menores no metal base em comparação com as tensões medidas do lado não restrito, apresentando a tendência de distribuição começando com tensões trativas na faixa de 102 MPa (média entre corpos de prova soldados com diferentes números de passes) a partir do centro do cordão de solda até as tensões compressivas na faixa de -25 MPa no metal base adjacente. Tal distribuição está de acordo com modelos teóricos encontrados na literatura (AWS, 2011; Scotti, 2014) e ilustrados na Fig. 2 e, caso for confirmado o seu padrão para soldas produzidas a laser, demonstra que, mesmo possuindo a ZAC tipicamente estreita, os cordões de solda produzidos por LBW ainda possuem TR longitudinais trativas na ZAC, que já é naturalmente fragilizada nos processos de soldagem por fusão.

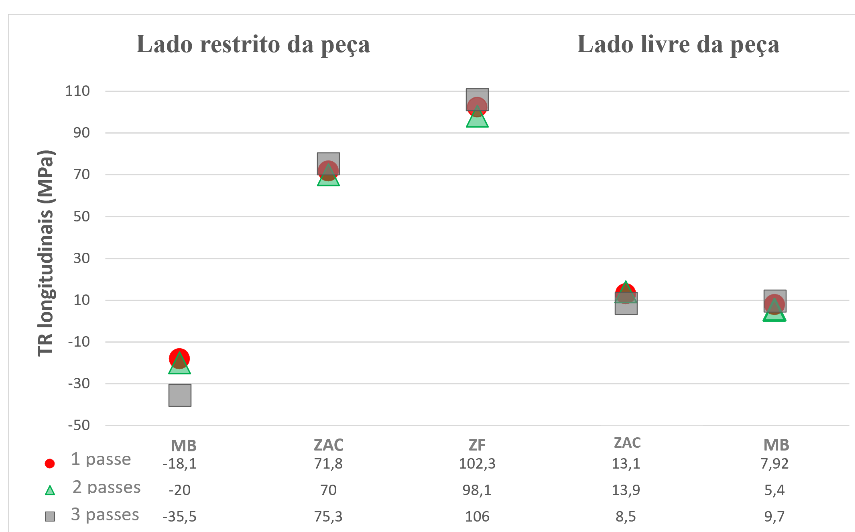


Figura 10. Distribuição de TR longitudinais (σ_y) nas diferentes regiões dos cordões soldados com diferentes números de passes.

O efeito de restrição nas TR transversais (σ_x) pode ser observado na Fig. 11. Nesse caso, não foi observada uma diferença expressiva entre a ZAC e metal base no lado restrito da junta, entretanto, a diferença entre essas TR foi significativa quando comparados os lados restrito e não restrito (deformado) para todas as juntas soldadas. Segundo o modelo teórico para tensões geradas no sentido transversal ao cordão de solda proposto por Scotti (2014) (modelo de 1 barra), são essas tensões que são responsáveis por deformação angular.

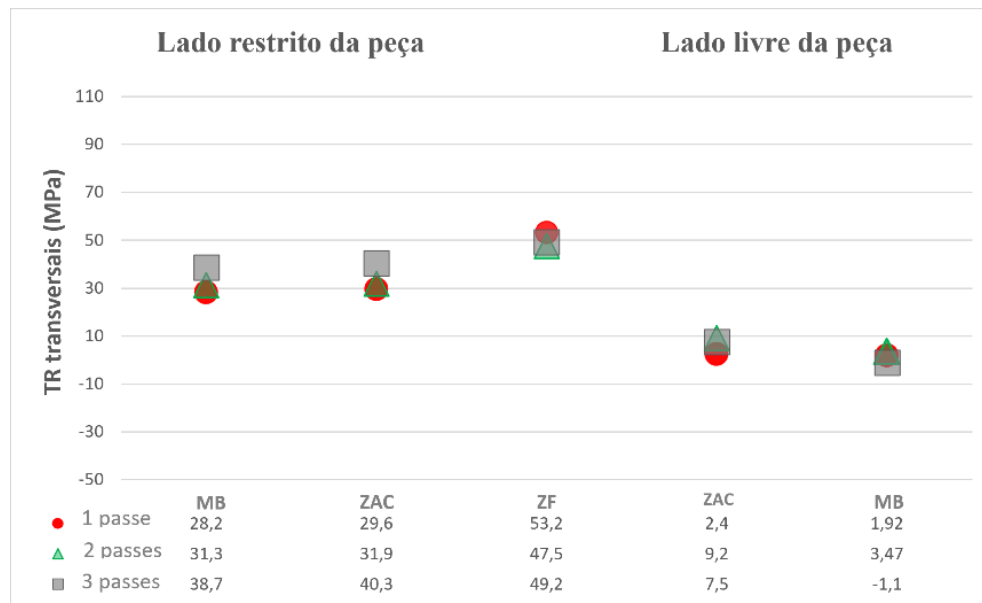


Figura 11. Distribuição de TR transversais (σ_x) nas diferentes regiões dos cordões soldados com diferentes números de passes.

Supõe-se que essas deformações acontecem devido a variação de volume ao longo da espessura da chapa, fazendo com que maior contração e, conseqüentemente TT de maiores intensidades, se deem na região mais volumosa. Os resultados obtidos nesse estudo acompanham essa explicação. Assim, como pode ser visto na Fig. 8, a diminuição da TR transversais (σ_x) acompanha aumento da profundidade de furação e, provavelmente, a diminuição do volume da poça de fusão. Entretanto, essa conclusão deve ser confirmada ainda por meio de respectivas macrografias. Caso não haja restrições ao movimento transversal externa ou internamente, a chapa acompanha a contração, e não se gera tensões ao final. Quando houver restrições ao movimento transversal e/ou angular, aparecem as tensões térmicas permanentes (TR). Portanto, como pode ser visto na Fig. 11, as TT geradas ao longo da soldagem foram aliviadas na forma de deformação angular no lado não restrito dos corpos de prova e foram armazenadas na forma de TR transversais no lado que foi mecanicamente restrito. Entretanto, o que chama a atenção, é que a proporcionalidade das TR transversais do lado restrito não acompanhou a proporcionalidade de deformações angulares apresentados na Tab. 1. Maiores estudos precisam ser realizados para explicar esse fenômeno.

4. CONCLUSÕES

Ao que concerne a soldagem a laser de uma chapa de alumínio AA6013-T4, o presente estudo experimental permitiu concluir que:

- Um maior número de passes de solda a laser contribui para uma maior deformação angular, entretanto, esse aumento não é proporcional, possivelmente, devido as transformações metalúrgicas e mudanças nas propriedades do material;
- Número de passes de soldagem não tem uma influência significativa nas TR longitudinais e transversais medidas no centro do cordão de solda;
- Para a espessura e condições de soldagem testados, praticamente todas as TT são aliviadas na forma de deformações angulares quando não há restrição mecânica da junta, ou seja, nesses casos é imprescindível o uso de métodos de controle de deformações;
- A restrição imposta a junta durante soldagem a laser tem efeito significativo tanto nas intensidades das TR, quanto na sua distribuição, indicando presença de tensões trativas na ZAC mesmo nos processos de soldagem de alta intensidade da fonte de calor;
- TR transversais são responsáveis por deformações angulares e possuem maiores intensidades nas regiões mais próximas a superfície do cordão de solda;

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Desenvolvimento de Aplicações de Laser e Ótica (DEDALO) do IEAv, ao Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do Estado do Espírito Santo (CPID) e ao Laboratório de Metrologia (LabMetro) da Universidade Federal do Espírito Santo pela infraestrutura oferecida e pela oportunidade de realização desse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- AWS, American Welding Society, Welding Handbook, Vol 1: Welding Technology, Chapter 7: residual Stresses and Distortion, American Welding Society, 2001, 8o Edition, 891 p., ISBN: 0-87171-281-4.
- Carey, C., “Effects of laser interaction with graphite coatings”, Laser Assisted Netshape Eng., 2007, pp. 673–686.
- Cabral, T. S., Braga, E. M., Mendonça, E. A. M., Scotti, A., 2013. “Influência dos procedimentos e modos de transferência no processo MAG na redução de deformações em painéis de estruturas navais”. *Soldagem e Inspeção*, 18(4), 339–348. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000400006>.
- Hagenlocher C.; Wagner J.; Michel J.; Weber R.; Bachmann M.; Karadogan C.; Liewald M.; Graf T., 2020. “The influence of residual stresses on laser beam welding processes of aluminium sheets”. *Procedia CIRP*, pp. 713-717;
- Kudryavtsev, Y. e Kleiman, J., 2017. “Fatigue of welded elements: residual stresses and improvement treatments”. *Welding in the World*, London, v. 51, n. I, p. 255.
- Mishchenko, A. & Scotti, A., 2018. “Residual stresses in arc welding: A holistic vision”. *Soldagem e Inspeção*, 2018, 23(1), 93–112. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2301.10>.
- Moraitis, G.; Labeas, G., 2008. “Residual stress and distortion calculation of laser beam welding for aluminum lap joints”. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 260-269, 198(1-3).
- Ponslet, E. & Steinzig, M., 2003. “Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry Part II: Analysis technique”. *Experimental Techniques*, 27(4), 17–21. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2003.tb00117>.
- Scotti, A., 2014. “Modelos de cinco barras e de uma barra para geração de tensões térmicas na ZF, ZAC e MB durante soldagem a arco”. *Soldagem e Inspeção*, 19(1), 82–90. <https://doi.org/10.1590/s0104-92242014000100010>.
- Steinzig, M., Upshaw, D., & Rasty, J., 2014. “Influence of Drilling Parameters on the Accuracy of Hole-drilling Residual Stress Measurements”. *Experimental Mechanics*, 54(9), 1537–1543. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9923-x>;
- Totten, G., Howes, M., & Inoue, T., 2002. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, ASM International, Materials Science, 27-23;

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEFORMATION AND RESIDUAL STRESS EVALUATION IN ALUMINUM JOINTS PRODUCED WITH LASER BEAM WELDING

Olga Liskevych, olga.liskevych@ufes.br¹

Gabriela Lugão de Souza Zatta, gabrielalugaosz@gmail.com¹

Gabriel Fracalossi Feijo, gabriel.feijo@edu.ufes.br^{2, 4}

Elton Mesquita de Almeida, eltonmesquitaalmeida@gmail.com²

Milton Sergio Fernandes de Lima, msflima@gmail.com³

Sheila Medeiros de Carvalho, sheila.m.carvalho@ufes.br¹

¹Federal University os Espirito Santo, Mechanical Engeneering Department, Vitória - ES, Brazil

²Center of Research, Innovation and Development – CPID, Cariacica – ES, Brazil

³Institute of Advanced Studies – IEAv/DCTA, São José dos Campos – SP, Brazil

⁴Postgraduate Program in Mechanical Engineering (PPGEM), Vitoria - ES, Brazil

Abstract. *Evaluation of residual stress coming from welding operations is of great importance since its underestimation or lack of control can lead to deformation of welded components, deterioration of mechanical properties or even to metal structure collapse. This work aims to accomplish a systematic study of the control parameters contribution, such as welding energy and mechanical restriction, on residual stress generation, its nature and distribution, together with deformation of aluminum specimens welded with laser process. For this purpose, weldments of AA6013-T4 were performed varying a quantity of passes using mechanical restriction on one of the sample sides. Afterwards, deformations and residual stress were measured using the ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) technique combined with the hole drill method on the fusion zone, heat affected zone and base metal. What concerns deformations, it was observed that higher number of weld passes leads to bigger deformation angle, however this increment is not proportional. Also, it was concluded that considering tested material thickness and welding conditions, almost all thermal tension was relieved in the form of angular distortions when there is no mechanical restriction of the sample, i.e., it is necessary a use of deformation control methods in such cases. What regards to residual stress, it was observed that number of passes doesn't have considerable influence on longitudinal and transversal strain measured on fusion zone of welded beads. Meantime, a restriction imposed to the joint while laser welding procedure has a significant effect both on the residual stress values and on its distribution, also indicating the presence of tensile residual stress on the heat affected zone, even using the high intensity welding process, such as LBW.*

Keywords: *deformation, residual stress, laser welding, mechanical restriction, AA6013-T4*