



Associação Brasileira de Soldagem

**XLVII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem
III CBMAdi – Congresso Brasileiro de Manufatura
Aditiva**

Avaliação Experimental e Computacional da Soldagem a Laser de Chapas Finas da Liga de Alumínio UNS A96061.

(Evaluation of Experimental and Computational Laser Welding of Al 6061 Thin Plates)

F. E. O. B. Bartalo¹,

M. S. F. de Lima², F. C. A. L.³, S. Delijaicov³, L.A. Santana⁴, A. Alakour⁶, M. D. M. das Neves¹

*¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil, fe.bartalo@gmail.com,
mdneves@ipen.br.*

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv), SJC, SP, Brasil

³Centro Universitário da FEI, SBC, SP, Brasil

⁴FLOW 3D Weld, São Paulo, SP, Brasil

⁵M&N Simulações e Projetos, São Paulo, SP, Brasil

⁶Dept of Energy Systems Engineering, IGP, Karabuk University, Karabuk, Turkiye

Resumo

Neste trabalho é apresentado um estudo da soldagem com laser de Yb:fibra de juntas sobrepostas em chapas da liga de alumínio UNS A96061-T6 com espessuras de 1,2 mm. Foram soldadas amostras com a variação dos parâmetros de potência do feixe laser e velocidade de soldagem, e gerados modelos computacionais com estas variáveis, a fim de se estabelecer um modelo adequado para executar as simulações com programas computacionais, que permitissem a análise da distribuição de temperatura e sua relação com as propriedades mecânicas de dureza e de tensões residuais. A validação da simulação computacional foi realizada pela correlação dos resultados obtidos no modelamento com as propriedades mecânicas reais obtidas na junta soldada. Assim, foi realizada análise da microestrutura para auxiliar na comparação entre os processos de simulação e real. Com isto, foi possível concluir que o modelo virtual a ser adotado é uma aproximação válida de análise entre tempo de engenharia e propriedades do produto.

Palavras-chave: Alumínio 6061, Soldagem a laser, Simulação computacional, Tensão residual, dureza

Abstract: *This study presents an investigation of Yb:fibra laser welding of lap joints in 1.2 mm thick sheets of aluminum alloy 6061-T6. Samples were welded by varying laser beam power and welding speed parameters, and computational models were developed using these variables in order to establish a suitable model for performing computer simulations which enabled the analysis of temperature distribution and its correlation with mechanical properties such as hardness and residual stresses. The validation of the computational simulation was conducted through the correlation between the results obtained from the modeling and the actual mechanical properties measured in the welded joint. Accordingly, microstructural analysis was carried out to assist in the comparison between the simulated and real processes. Thus, it was possible to conclude that the adopted virtual model represents a valid approximation for analyzing the relationship between engineering time and product properties.*

Key-words: Aluminum 6061, Laser welding, Computational simulation, Residual stress, hardness

1. Introdução

A liga de alumínio 6061-T6 é formada pelas adições de Mg-Si-Cu-Cr, sendo empregada nas indústrias, aeroespacial, naval, automotiva, construção e outras aplicações. Esta liga possui diversas aplicações, em razão de sua elevada resistência-peso, boa soldabilidade, facilidade de usinagem e de conformação mecânicas

e elevada resistência à corrosão [1, 2].

A soldagem a laser é uma possibilidade de fabricação de conjuntos para diversas aplicações, em razão da elevada concentração de calor e precisão na execução da soldagem, o que possibilita reduzir a distorção da junta soldada. Todavia, o principal fator que determina a qualidade de uma junta soldada a laser é a correta escolha dos parâmetros do equipamento para a realização do processo. Dentre estes, pode-se ressaltar como os principais os seguintes parâmetros de soldagem: potência e propriedades do feixe laser, velocidade de soldagem, posicionamento do plano focal do feixe, atmosfera de proteção e outros parâmetros. Outras propriedades tais como, propriedades físicas do material de base (MB), características da superfície e geometria da junta são aspectos de relevante importância que também impactam na geometria do cordão de soldagem [2].

Paralelamente, a soldagem a laser de ligas de alumínio apresenta desafios quanto a sua alta refletividade, baixa viscosidade e alta condutividade térmica, como observado por Le-Quang [1], além da instabilidade do *keyhole*, como mostrado por Kang [2] e a facilidade de absorção de gases como nitrogênio, oxigênio e hidrogênio da atmosfera, que podem causar o surgimento de trincas a quente, porosidade e redução da qualidade da solda de acordo com o apresentado por Karami [3].

Estes fatores correspondem aos fatores de maior peso no aporte de calor pelo laser no material a ser unido, pois influenciam diretamente o resultado obtido na soldagem. Esta influência tende a ser análoga dentre os diferentes tipos de laser e materiais utilizados, como estudado por Oliveira [4].

É possível observar que a profundidade de penetração do cordão de solda é diretamente proporcional a potência do laser e inversamente proporcional a velocidade de processo, dada uma potência média do laser. A largura do cordão, tende a apresentar uma diminuição com o aumento da velocidade de soldagem, esta tende a manter um valor constante que pode ser relacionado ao comprimento de difusão térmica do material, como o apresentado por Duley [5]. No estudo de Rakhi [6], no qual foram estudadas as características do cordão de solda de juntas sobrepostas de chapas de alumínio 6061 em função da variação de velocidade e potência, foram obtidos resultados similares que apontam para um aumento da penetração com o aumento do aporte de calor e potência do laser, enquanto a penetração diminui com o aumento da velocidade.

Segundo Tao [7], um aumento na velocidade de soldagem, provocou menor abertura do *keyhole*, desta forma, reduziu-se a abertura do canal de entrada do feixe e menor é o aporte de calor na soldagem. Além disso, a velocidade e a sua mudança direcional são capazes de colapsar o mecanismo de penetração por *keyhole*. O aumento da velocidade tende a gerar um cordão com menos poros, em razão do fluxo de metal líquido formado facilitar o movimento das bolhas do processo, que conseguem atingir a atmosfera externa com mais facilidade do que com menor velocidade. Em estudo realizado por Samuel [8] foi mostrado que a porosidade pode se formar nos metais fundidos quando a taxa de solidificação supera a taxa de preenchimento do metal líquido, durante o colapso do *keyhole*.

Por outro lado, a potência utilizada tende a gerar uma penetração incompleta, quando selecionada abaixo da demanda do projeto e pode prejudicar a integridade da peça e sua aplicação. Quando esta for selecionada acima do recomendado, pode gerar zonas termicamente afetadas de proporções acima das desejadas com penetração e respingos em excesso. Conforme apresentado por Jian [9] variando-se a potência do feixe laser foram obtidos resultados que apontam que, com o aumento da potência do laser aumentam a largura e a penetração, porém as fraturas das amostras com potências de 2000 W e 2500 W ocorreram próximas à linha de fusão, enquanto a fratura das amostras com 3000 W ocorreram no centro do cordão de solda.

Processos de fabricação são geradores de tensão residual no material e modificação da dureza na junta soldada. A soldagem a laser apesar da alta concentração de energia do feixe, também provoca o aparecimento de tensões residuais na junta e regiões com picos e redução de dureza. O valor máximo pode ser superior a tensão de ruptura ou de escoamento do material, provocando respectivamente, o aparecimento de trincas e de empenamentos. As tensões residuais de tração facilitam a propagação de trincas, enquanto as tensões de compressão na maioria das situações são benéficas a junta soldada por dificultar a propagação de trincas.

Na soldagem a laser, a distribuição de temperaturas é importante, pois afeta a qualidade e a integridade da junta em ligas de alumínio e de metais em geral. O estudo da distribuição de temperaturas na soldagem a laser por meio de medidas experimentais pode ser demorado e pouco preciso, em razão das reduzidas dimensões da junta. Assim, uma alternativa a estes problemas é a realização de pesquisas sobre a soldagem a laser utilizando técnicas de simulação numérica computacional para avaliação de propriedades [10,11].

Este estudo propõe a avaliação integrada experimental e por simulação computacional do processo de soldagem a laser de Yb:fibra em uma junta sobreposta de chapas da liga de alumínio UNS A96061, buscando comparar os valores das tensões residuais e de dureza.

2. Materiais e Métodos

O estudo foi dividido em duas frentes de estudo e uma final de comparação dos resultados obtidos.

Primeiro, nas amostras físicas foi avaliada a composição das chapas (MB) a serem estudadas, passando-se para as etapas de preparação das superfícies e em seguida a realização da soldagem. Após a soldagem foram realizadas as etapas de caracterização microestrutural e os ensaios de tensão residual e de dureza.

No trabalho computacional, foram selecionados dois softwares específicos de soldagem, porém com distintos modelos de simulação, a fim de se obter uma comparação entre os modelos computacionais.

Por fim foram comparados todos os resultados obtidos.

2.1. Análise metalográfica e preparação das superfícies

Para este estudo foi utilizada a liga de alumínio 6061 produzida pela empresa Jiangsu Yiwanhong Int't, estabelecida na China, a composição química da liga 6061-T6 foi determinada por espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva, EDX-720 da marca Shimadzu, alocado no Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM) do IPEN, empregando-se um método semiquantitativo de análise em atmosfera de vácuo, conforme mostrada na Tabela 01. A partir destes resultados é possível afirmar que o MB atendeu os requisitos de composição química, segundo a norma NBR12638 de 06/2000.

Tabela 01. Composição química do material de base (MB) UNS A96061 obtido por fluorescência de Raio X. Valores de norma *NBR 12638-2000.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
MB	0,53	0,41	0,26	0,06	0,92	0,10	0,12	0,06	97,50
Min.*	0,40	-	0,15	-	0,80	0,04	-	-	Bal.
Max*	0,80	0,70	0,40	0,15	1,20	0,35	0,25	0,15	

Foram utilizadas chapas de alumínio 6061-T6 com espessura de 1,2 mm e junta sobreposta.

A tentativa de preparo superficial com polimento acarretou menor eficiência do processo de soldagem, uma vez que a superfície mais reflexiva tende a refletir maior parte da energia do feixe laser, além da eventual formação de fina camada óxido de alumínio na superfície, corroborando com a redução dos efeitos do aporte de calor pelo feixe laser. Desta forma, as amostras foram obtidas diretamente do processo de laminação e revestidas com um filme plástico protetivo, removido apenas no momento da realização da soldagem.

2.2. Especificação dos parâmetros e execução da soldagem nas amostras

A soldagem foi realizada com laser Yb:fibra, IPG Photonics modelo YLR2000, contínuo, com diâmetro do laser de 0,68 mm, distância de trabalho de 160,4 mm e distância focal de 158 mm, sendo usado argônio ultrapuro [12] com vazão de 16 l.min⁻¹, plano focal do feixe laser na superfície da chapa superior e diâmetro focal de 0,1 mm. O MB permanecia em repouso e a fonte do laser de movimentava com velocidade constante.

Os parâmetros de soldagem adotados para o estudo foram a variação da velocidade de 4, 6 e 9 m.min⁻¹ e de potência de 1500, 1800 e 2000 W, por limitações técnicas do equipamento a disposição.

A preparação das amostras para caracterização da microestrutura da junta soldada foi efetuada seguindo as etapas de: corte sob refrigeração, embutimento em resina, lixamento (grão 220, 320, 400, 600 e 1000) polimento e ataque químico, em duas etapas. A primeira etapa do ataque químico foi constituída por imersão durante 15 segundos no uma solução de 25% HNO₃, 15% HCl, 10% HF e 50% H₂O e polimento com pasta de diamante de 1 µm para limpeza. Esta etapa buscou revelar a geometria e microestrutura da poça de fusão. A segunda etapa foi usada para atacar o MB e consistiu na imersão por 2 ou 3 minutos em solução de 500 ml de H₂O, 3 ml de HNO₃ e 1,5 ml de HF.

Após as etapas de ataque foi realizada a análise por microscópio óptico ZEISS, com as medidas de largura e de profundidade do cordão, usando o software AxioVision.

A caracterização da microestrutura foi realizada por microscopia óptica utilizando óptico marca Leica e modelo DM750M. Foram usados Microscópios eletrônicos de varredura, MEV de bancada Hitachi modelo TM3000 e MEV-FEG JEOL modelo JSM-6701F que utiliza uma fonte de emissão de campo (FEG) para gerar o feixe de elétrons.

2.3. Ensaios de dureza e tensão residual nas amostras

Foram realizados ensaios de dureza Vickers em pontos distribuídos ao longo da região de soldagem com carga de 0,5 kg. As medidas de dureza foram realizadas em uma linha horizontal, um pouco abaixo da superfície do MB, porém mais distante da raiz da soldagem. Os pontos foram distribuídos partindo de uma linha horizontal, transversal ao cordão de soldagem, iniciando pelo MB, passando pela zona termicamente afetada (ZTA), pela zona fundida, pela ZTA do lado oposto e terminando novamente no MB, do lado oposto ao início. Sendo assim realizadas 09 medições, segundo croqui mostrado na Figura 01 (a).

A distribuição das tensões residuais foi realizada pelo método do furo cego, ilustrado pela Figura 01 (b) ao longo das regiões do cordão de soldagem, conforme ilustrado pela Figura 01 (c). As deformações provocadas pela acomodação do material, em razão da realização do furo foram medidas por extensômetros de resistência elétrica colados no local em que se deseja efetuar a medição, conforme norma ASTM E-837 (2008). O dano causado pelo pequeno furo usinado local é pequeno – diâmetro e profundidade aproximados de 0,8 mm. Uma perfuração controlada de um pequeno furo no centro de uma roseta de extensômetros (strain gauge rosette), previamente colada na superfície do material. Essas deformações são utilizadas para calcular o campo de tensões residuais originais, por meio de equações analíticas ou correlações numéricas.

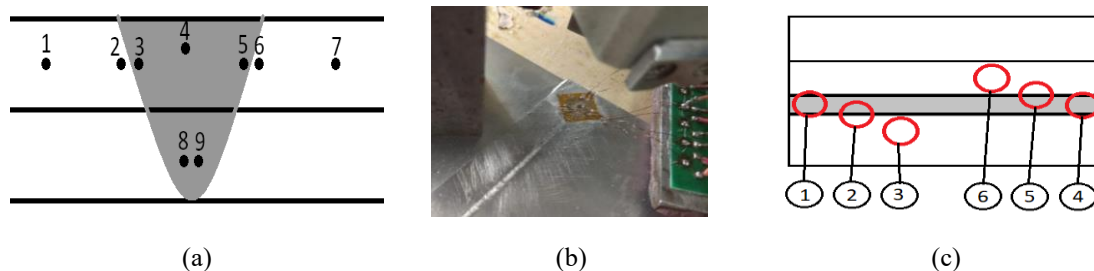


Figura 01. (a) Distribuição dos pontos para amostragem do ensaio de dureza (b) Vista da roseta do posicionamento da roseta de três elementos à 60° fixada na superfície do cordão de soldagem e (c) croqui da realização de medidas das tensões residuais. Fonte: autor.

2.4. Simulações pelo software ESI Sysweld

No software ESI Sysweld foi utilizada a ferramenta Visual-mesh 17.0 para a criação dos corpos de malhas. Foi criado um corpo de 20 mm de largura por 20 mm de comprimento e 2,4 mm de espessura, representando o segmento das chapas sobrepostas estudado. Para a criação da malha foi adotada inicialmente uma malha homogênea de tamanho dos elementos da ordem de 0,5 mm, refinada inicialmente pela ferramenta Biasing, por meio do modelo de Bel Curve, criando uma exponencial de tamanho de malha em função do distanciamento da região central da peça. Findado o processo foi ainda dobrado o número de elementos longitudinais, passando a cada elemento, no eixo da espessura da chapa, passando para a altura de 0,24 mm, conforme mostrado na Figura 02 (a). Foi então definido o caminho do feixe laser, ilustrado pela Figura 02 (b), especificando-se a região de recebimento de aporte térmico, definiram-se todas as superfícies da amostra virtual como extratoras de calor, a linha que serviu de guia para o percurso da fonte de calor, efetuou-se a parametrização do material, estabeleceu-se a velocidade para a primeira amostra de 66,67 mm.s⁻¹ (4,0 m.min⁻¹) e a potência 1500 W, (aporte de calor 30 J.mm⁻¹) para a primeira amostra da fonte de calor. Foi adotado um tempo de resfriamento de 10 segundos e temperatura ambiente de 20 °C. Para este software foi utilizada a modulação do parâmetro de eficiência de transferência de calor ao MB para aproximação das condições reais obtidas, sendo assim este variado entre 70, 50 e 30%. O material do corpo e suas propriedades foram configuradas segundo dados presentes no banco de dados do software.

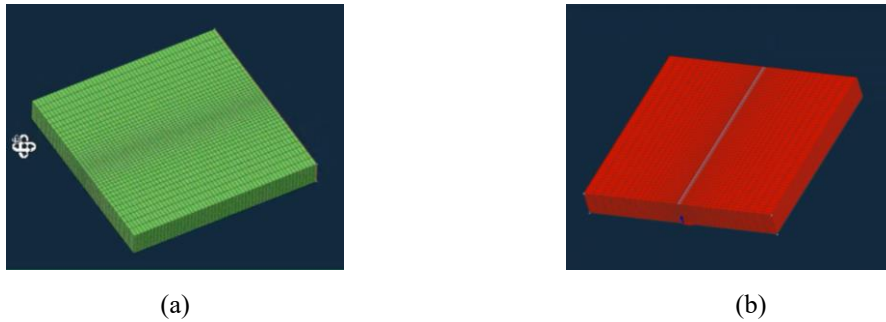


Figura 02. (a) Distribuição da malha no software ESI Sysweld e (b) definição do percurso da fonte de calor e regiões de extração de calor. Fonte: autor.

2.5. Simulações pelo software FLOW-3D WELD

A simulação com software FLOW-3D WELD se iniciou pela criação dos corpos das chapas e uma região de 30 mm de largura e 0,8 mm de altura ao longo do comprimento da região soldada. Tal região foi configurada para estar preenchida com gás de proteção e em seguida criado um bloco de estudo de 4,0 mm de largura e 3,2 mm de altura, também ao longo de todo o comprimento do cordão, conforme Figura 03.

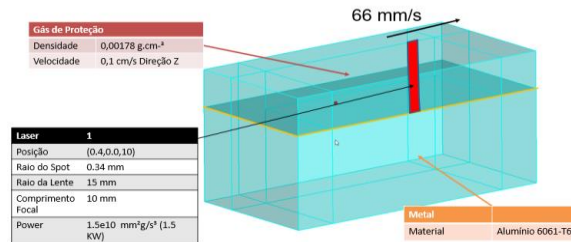


Figura 03: Regiões criadas para execução da simulação. Fonte: autor.

Para as propriedades do MB foram atribuídas conforme exato material presente no banco de dados do software. A malha foi criada exclusivamente dentro deste bloco de estudo, de forma homogênea e tamanho de 0,05 mm em cada uma de suas dimensões. Para a fonte laser foi configurada uma distribuição gaussiana (0,0240) criada uma fonte 1500 W (15 x 1011 mm²/s³), com velocidade transversal de 66 mm/s e foco do laser na face superior da chapa superior.

3. Resultados e discussão

3.1 Morfologia do Cordão e Penetração

Na Tabela 02 estão mostradas as dimensões geométricas do cordão em relação aos parâmetros de soldagem. Foi também estimado o aporte térmico, para isto usando como coeficiente de eficiência de energia o valor de 0,3 (30%), conforme estudado por Maximo [13]. Observou-se que o aumento da velocidade de soldagem reduz a largura do cordão e a profundidade de penetração do cordão de soldagem. Enquanto o aumento da potência apresentou um efeito mais direto na penetração do que na largura do cordão.

Na Figura 04 são apresentadas as correlações entre os parâmetros potência do laser e velocidade de soldagem, em relação à profundidade de penetração e largura do cordão. Observa-se que de uma forma em geral o aumento da potência do laser pode resultar um cordão mais profundo e de maior largura, em razão da energia transferida para o MB ser maior. O aumento da velocidade de soldagem de forma isolada resultou em cordão com menor profundidade de penetração e menor largura do cordão, em razão do menor tempo de interação entre o laser e o MB. A combinação de baixa potência e elevada corrente pode resultar em soldagens com cordão pouco profundo e de menor largura. As condições das amostras 04 e 06 promoveram as melhores relações entre penetração e largura do cordão.

Tabela 02 – Largura e penetração medidas das amostras.

Amostra	Velocidade (m/min)	Potência (kW)	Largura do cordão \bar{x} (mm)	Penetração de soldagem \bar{x} (mm)
1	6,0	1,5	1,2	2,0
2	6,0	1,8	1,1	2,5
3	6,0	2,0	1,2	2,5
4	4,0	1,5	1,4	2,4
5	4,0	1,8	1,8	2,3
6	4,0	2,0	1,6	2,4
7	9,0	1,5	0,9	1,7
8	9,0	1,8	1,0	2,1
9	9,0	2,0	0,9	2,6*

Nota: na Amostra 09 foi observada a fusão e certo escorrimento do material fundido, o que levou a sua medida a ser maior do que propriamente a espessura inicial do MB.

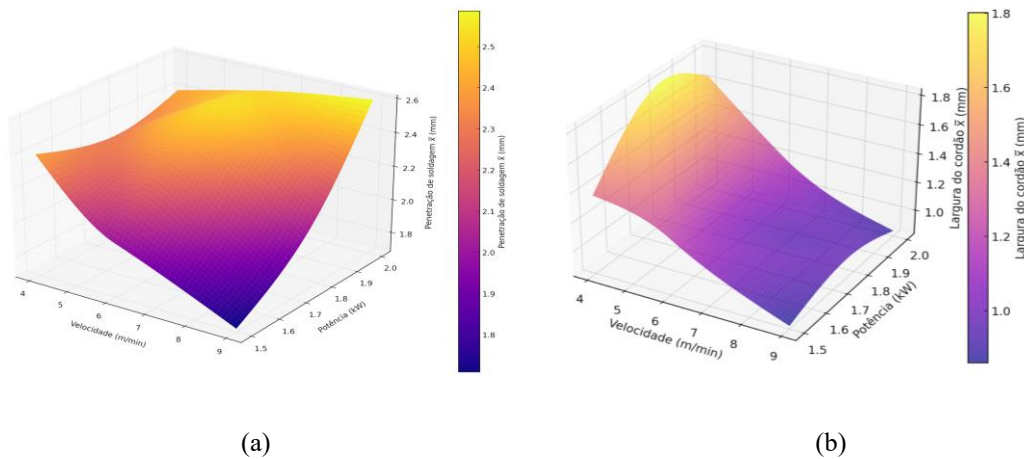


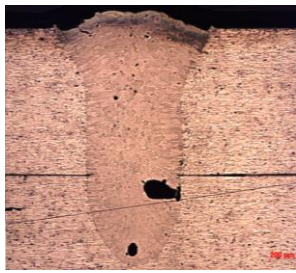
Figura 04. (a) Penetração de soldagem média (mm) e (b) Largura do cordão médio (mm). Fonte: autor.

3.2 Resultados de Microestrutura, dureza e tensões residuais.

Nas figuras 05 e 06 são mostradas imagens da macroestrutura da seção transversal da junta sobreposta soldada. Todas as condições propiciaram união das chapas. A região de fusão da junta tem a geometria no formato de taça. A presença de poros nas seções analisadas da região de fusão também é observada, estes que tendem a ter sido gerados por instabilidades do *keyhole*, onde a pressão interna não é suficiente para homogeneamente movimentar o metal fundido ou então evaporação dos elementos magnésio ou silício.

Cabe ressaltar que para as amostras de velocidade 6 m.min⁻¹ foram encontrados vazios no cordão de soldagem e nas amostras de velocidade 9 m.min⁻¹ vazios na região do cordão adjacente a interface entre as chapas e fissuras na raiz da solda, possivelmente ocasionados pelo efeito prioritário do modo de transferência térmica por condução superficial, gerado pela velocidade de soldagem mais alta e maior velocidade de resfriamento.

Na região da zona fundida (ZF) das figuras 05 e 06, apesar do pequeno aumento é possível observar a formação de uma estrutura de grãos colunares alongados na direção de extração de calor, com crescimento perpendicular a partir do MB, em razão do alto gradiente de temperatura e uma baixa taxa de crescimento. No centro da ZF, em razão do menor gradiente de temperatura pode ser observada uma mudança na orientação cristalina, resultando na formação de dendritas equiaxiais, em razão de uma direção preferencial de extração de calor menos acentuada.



(a) Amostra 01



(b) Amostra 02



(c) Amostra 03

Figura 05. Amostras com a mesma velocidade de avanço da fonte de calor de $6,0 \text{ m.min}^{-1}$, (a) Amostra 01: Potência de 1500 W, (b) amostra 02: Potência de 1800 W e (c) Amostra 03: Potência de 2000 W. Fonte: autor.



(a) Amostra 05



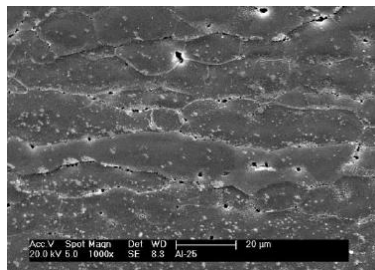
(b) Amostra 02



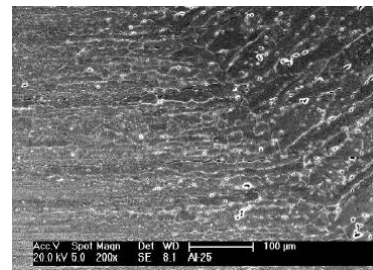
(c) Amostra 08

Figura 06. Amostras com potência de 1800 W, (a) Amostra 05: Velocidade de $4,0 \text{ m.min}^{-1}$, (b) Amostra 02: Velocidade de $6,0 \text{ m.min}^{-1}$ e (c) Amostra 08: velocidade de $9,0 \text{ m.min}^{-1}$. Fonte: autor

Na Figura 07, obtida por MEV, (a), observa-se a microestrutura do MB, característica de material encruado, com grãos alongados indicando um alinhamento fruto de processo de conformação mecânica. Foram observados precipitados de Mg_2Si e partículas de $\alpha\text{-Al (Fe,Mn) Si}$ no MB. As partículas de $\alpha\text{-Al (Fe,Mn)Si}$ se dissolveram pelo calor da soldagem. Na Figura 07 (b) identifica-se ZTA inferior a 1 mm e crescimento epitaxial de grãos originado na interface de ZTA e zona de fusão, com grãos e grãos colunares, de microestrutura dendrítica na zona fundida, na direção de extração de calor. De acordo com os resultados obtidos por Chu [14] uma menor velocidade, com potências entre 1800W e 2000W proporcionou melhor crescimento epitaxial de grãos.



(a)



(b)

Figura 07: Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura mostrando a microestrutura das regiões (a) MB e (b) interface MB com zona de fusão. Fonte: autor.

Na Tabela 04 são apresentados os valores médios de dureza. Importante notar a diferença de dureza nas regiões de interface (pontos 2 e 3 e pontos 5 e 6), nas quais pode-se notar que os menores valores diferenciais foram observados para as amostras de menor velocidade de avanço e que houve certo amolecimento tanto na zona fundida quanto na ZTA devido à dissolução ou coalescimento dos precipitados endurecedores de liga,

como também observado por Cheng [15]. Uma maior dureza na região fundida foi observada nas amostras com maiores velocidades, enquanto uma menor dureza na região fundida foi observada nas amostras realizadas com menor velocidade de avanço da fonte de calor, o que é esperado pelo fato de uma maior velocidade tornar incapaz a estabilização do *keyhole* e efeitos termomecânicos, ilustrado pela Figura 08.

Tabela 03. Dureza média por região de cada amostra, Vickers HV 05 kg.

Amostra	Velocidade (m/min)	Potência (kW)	Dureza MB (HV 5 kg)	Dureza Interface (HV 5 kg)	Dureza centro ZF (HV 5 kg)	Dureza Raiz (HV 5 kg)
1	6,0	1,5	74,0 ± 0,4	67,0 ± 3,7	64,0 ± 1,2	66,0 ± 1,3
2	6,0	1,8	80,0 ± 3,3	63,0 ± 4,2	66,0 ± 1,2	62,5 ± 1,1
3	6,0	2,0	75,0 ± 3,4	63,5 ± 3,7	66,0 ± 1,1	66,0 ± 1,2
4	4,0	1,5	76,0 ± 2,8	70,0 ± 2,4	70,0 ± 1,2	68,0 ± 1,0
5	4,0	1,8	74,5 ± 1,8	66,0 ± 3,4	63,5 ± 1,3	66,5 ± 1,3
6	4,0	2,0	74,0 ± 1,6	65,0 ± 3,4	63,5 ± 1,0	62,0 ± 1,1
7	9,0	1,5	95,5 ± 12,7	68,0 ± 3,0	65,5 ± 1,3	73,0 ± 1,2
8	9,0	1,8	90,0 ± 8,7	67,5 ± 4,9	65,5 ± 1,2	74,0 ± 1,0
9	9,0	2,0	87,5 ± 12,2	68,0 ± 4,3	62,0 ± 2,5	67,0 ± 1,9

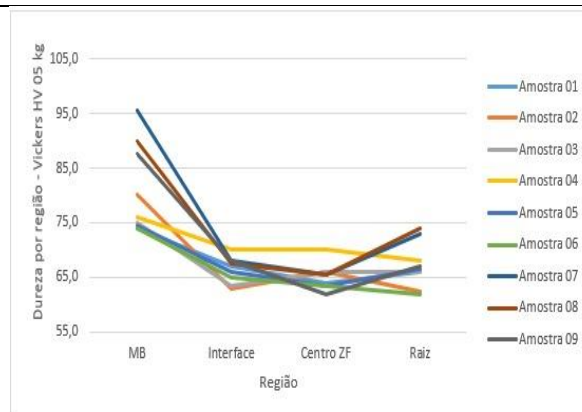
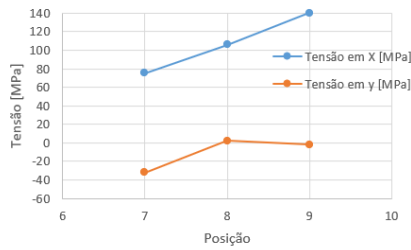


Figura 08: Medidas de dureza nas diferentes regiões. Fonte: autor.

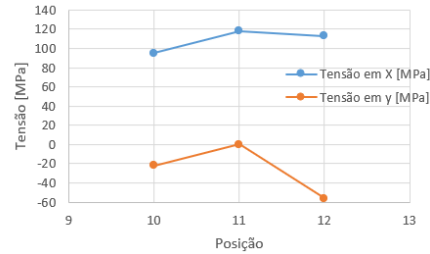
Para a realização dos ensaios de tensão residual foram selecionadas as amostras 3 (de velocidade 6,0 m.min⁻¹ na potência de 2,0 kW) e 4 (de velocidade 4,0 m.min⁻¹ e potência 1,5 kW. Sendo a direção X, longitudinal, na direção do cordão de soldagem (conforme ilustrado na Figura 01 (c)) e a direção Y transversal ao cordão de soldagem. Por meio dos ensaios realizados pela norma ASTM E-837 (2008) observou-se que as tensões residuais estão presentes com mais intensidade na região da ZTA.

Ao comparar ambos os resultados, ilustrados pela Figura 09, pode-se observar que a amostra de maior velocidade apresentou uma maior tensão residual no eixo X ao centro do cordão (95 MPa para a amostra 03 frente a 85 MPa para a amostra 04), porém no eixo Y que se observa a maior diferença de tensões, uma vez que as amostras de menor velocidade apresentaram tensões trativas enquanto as de maior velocidade apresentaram tensões compressivas, de certa forma esperado pois a diminuição da velocidade de soldagem tende a facilitar a eliminação dos efeitos termomecânicos e *keyhole*, deixando uma relação homogênea entre o processo de fusão e de solidificação, como também concluído por Rong [16]

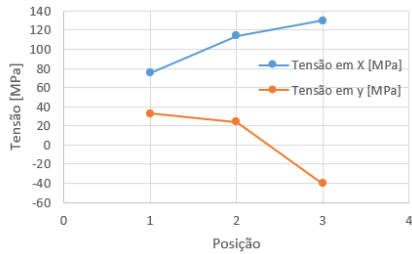
Na região de interface foram observadas similares tensões médias na direção longitudinal enquanto, para ambas as amostras, nas suas regiões finais foi observada uma ausência de tensões residuais longitudinais, possivelmente ocasionada pela mudança de campo de compressão para tração, eventualmente favorecida pelo processo prévio de conformação que o material de base passou durante sua confecção.



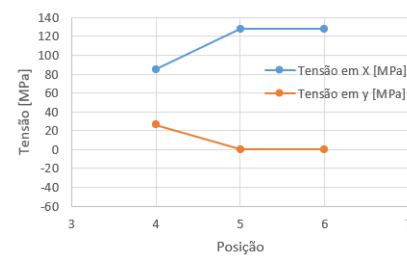
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 09. (a) Amostra 03, segmento inicial, (b) Amostra 03, segmento final, (c) Amostra 04, segmento inicial e (d) Amostra 04, segmento final. Fonte: autor

Na região do MB foram observadas as maiores tensões residuais, sendo novamente um comportamento mais acentuado apresentado pela amostra de maior velocidade (130 MPa de tensão em X para a amostra 04 e 140 MPa de tensão em X para a amostra 03). Também nesta região foi observada a maior tensão residual compressiva, identificada na região final da amostra de maior velocidade de soldagem, a qual tende a ser justificada pelo fato de uma maior velocidade, além do ponto ótimo, tornar o processo de soldagem menos eficiente, prevalecendo o modo de fusão por condução de calor, gerando maior calor nas zonas adjacentes e acarretando processos térmicos e maiores tensões residuais.

Cabe ressaltar que na direção X, ou seja, longitudinal, foi observada determinada uniformidade de tensões residuais entre as zonas de interface e o MB, com exceção apenas do medido na região de início da amostra 03, possivelmente ocasionado por menor tempo de aquecimento pelo processo de soldagem daquela região da chapa.

3.3 Resultados obtidos pelas simulações realizadas por meio do software ESI – Sysweld

A partir deste software foi possível a extração de diversas análises computacionais por meio de simulação. Foram extraídos dados de deslocamento total, tensão residual, ilustrada pela Figura 10, dureza e gradientes térmicos, ilustrados pela Figura 11. Os melhores resultados foram obtidos para as amostras 04 e 06, uma vez que nestas a velocidade mais baixa permitiu que o aporte energético fosse melhor absorvido e assim estabilizasse os efeitos termomecânicos e o *keyhole*, de forma que uma quantidade maior de material foi fundida e o calor fosse melhor dissipado. Reduzindo a dureza e as tensões residuais no cordão e nas regiões adjacentes. Todavia, foram observadas similaridades comportamentais entre as amostras simuladas e as estudadas em laboratório, isto é, maiores tensões residuais observadas nas regiões periféricas ao cordão de soldagem nas amostras de maiores velocidades de soldagem e menores tensões residuais na região fundida para as amostras de menores velocidades de soldagem. Foram observadas diferenças dos valores máximos obtidos pelas simulações frente aos resultados obtidos em laboratório, por exemplo para a amostra 07, a qual por meio da simulação apresentou um valor máximo de 398 MPa. Isto pode ser explicado em razão de que as simulações neste software serem baseadas pela calibração por comparação da geometria dos perfis dos cordões de soldagem, tanto pelo fato deste software simular por meio do modelo de elementos finitos, ou seja, limitando as alterações geométricas e mudanças de fase na região do material fundido que acontecem durante o processo de soldagem, quanto pelo fato de que na amostragem em laboratório tal valor representaria

o rompimento da continuidade do material, uma vez que está acima da sua tensão de rompimento. Assim, a magnitude dos resultados obtidos na simulação deve ser interpretados como médios naquelas regiões, e não refletindo picos máximos ou mínimos microscópicos.

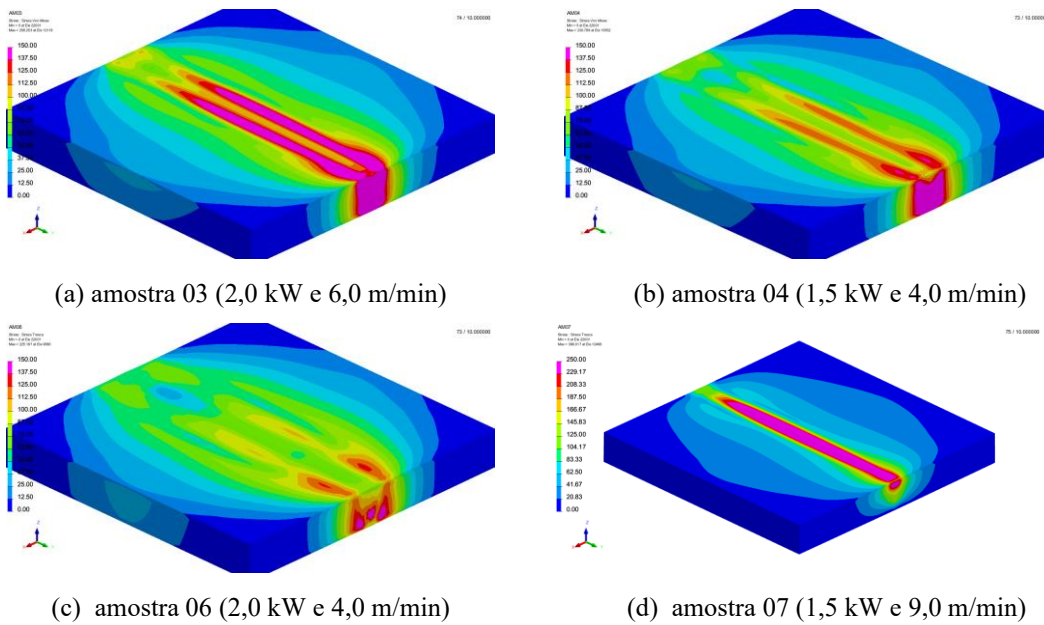


Figura 10. Resultados de tensão residual pelo critério de Tresca simulados pelo software ESI Sysweld, (a) amostra 03, (b) amostra 04, (c) amostra 06 e (d) amostra 07. Fonte: autor

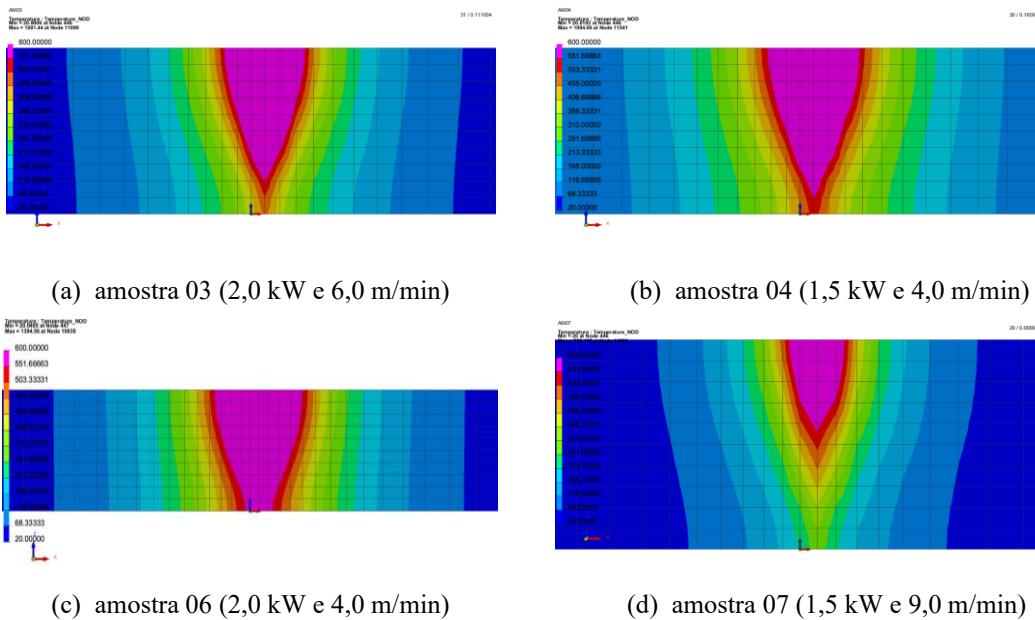


Figura 11. Resultados de distribuição de temperatura simulados pelo software ESI Sysweld, (a) amostra 03, (b) amostra 04, (c) amostra 06 e (d) amostra 07. Fonte: autor

Foi também observado o efeito nas tensões residuais dos fenômenos de entrada e saída do feixe laser, nos quais pode-se observar uma lateralização dos efeitos do aporte de calor, ou seja, na região transversal à direção do percurso do feixe laser e solidificação abrupta da poça de fusão, com surgimento de região compressiva, respectivamente. Tais fenômenos ficam mais bem observados nas Figuras 10 (b) e 08 (c).

Os resultados de distribuição de temperatura obtidos e ilustrados pela Figura 11 pode-se também identificar a similaridade ao observado nas análises microscópicas de geometria de cordão, nas quais também fica evidenciado que menores velocidades de avanço propiciaram maiores volumes de material fundido.

3.4 Resultados obtidos pelas simulações realizadas por meio do software FLOW-3D WELD

O software FLOW-3D WELD é capaz de simular os efeitos do aporte de calor tanto durante a fase sólida quanto durante a fase líquida da poça de fusão, por meio de um modelo fluidodinâmico, tornando possível de serem observadas também as deformações geradas no cordão de soldagem. Com isso, foi possível observar que a modelagem da amostra 04 evidenciaram o escoamento do metal fundido, a ocorrência de turbulência e a movimentação convectiva de material, esperadas em função das diferentes zonas de pressão acarretadas pela fusão e eventual evaporação do MB, proporcionadas pelos efeitos termomecânicos e *keyhole*, quanto a formação de microvazios na região inferior do cordão de soldagem e sua raiz, possivelmente por instabilidade térmica, gravidade e extração assimétrica de calor. Assim, este modelo foi capaz de reproduzir com maior similaridade a geometria do cordão observado experimentalmente, como apresentado na Figura 12.

Em função da capacidade deste software em continuar a simulação após a fusão do material, consegue-se observar as alterações geométricas do cordão em cada etapa da movimentação da fonte de calor. Podendo-se observar a falta de penetração das etapas iniciais, ocasionada pela instabilidade do *keyhole* e dos efeitos termomecânicos; a região de constância de efeitos, central, desejada, ao longo do cordão; e o excesso de calor na região de saída, ocasionado pela relação de temperatura da região, aporte térmico e menor material de base para absorve-lo.

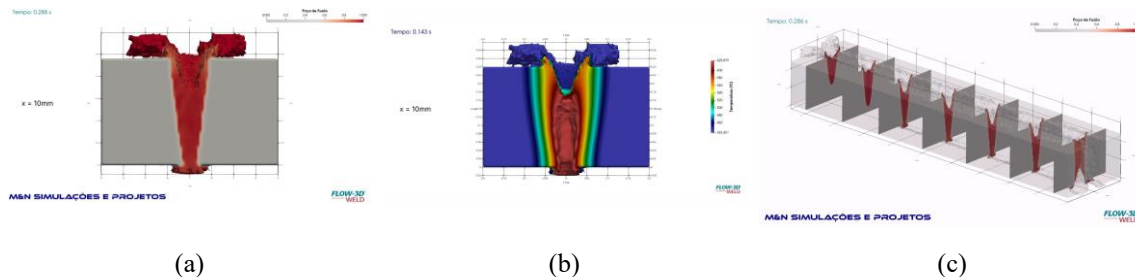


Figura 12. Resultados de simulação computacional pelo software FLOW-3D WELD, (a) gradiente sólido/líquido, (b) distribuição de temperatura e (c) Representação CFD do *keyhole*, movimentação de metal fundido e alterações geométricas do cordão. Fonte: autor

4 Conclusão

A união de experimentação e modelagem computacional permitiu identificar os parâmetros ótimos de soldagem a laser da liga 6061-T6. Os quais são os de menor velocidade de soldagem aplicada, de $4,0 \text{ m.min}^{-1}$ e potências de 1500 W a 2000 W, em função das melhores condições de geometria do cordão (relação entre largura do cordão e penetração), dureza e tensões residuais observadas.

As ferramentas numéricas mostraram-se eficazes para prever os comportamentos térmicos, mecânicos e microestruturais. A estabilidade do *keyhole*, o posicionamento do foco e a preparação superficial foram confirmados como fatores críticos de qualidade.

É possível utilizar ferramentas computacionais para prever regiões e graus de tensões residuais que em juntas soldadas, como pode-se observar nos resultados da simulação computacional regiões de tração e compressão como as encontradas nos ensaios em laboratório.

A utilização dos softwares de simulação computacional auxilia o entendimento das alterações microestruturais e geométricas geradas pelo processo de soldagem, utilizando-se as ferramentas apresentadas foi possível identificar a espessura da zona de interface, dimensionamento do cordão e, também pelo módulo de dinâmica dos fluidos computacional, estimar as alterações geométricas do cordão. Tornando-se possível prever a geração de concentradores de tensão ainda na fase de projeto.

Este estudo contribui para o avanço da simulação aplicada à soldagem de ligas leves e serve como base

para aplicação industrial e desenvolvimento de novas ligas otimizadas para soldagem a laser.

5 Referências

- [1] - LE-QUANG et al., Energy-efficient laser welding with beam oscillating technique – A parametric study. *Journal of Cleaner Production*, v. 313, p. 127796, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127796>.
- [2] – KANG, Y. et al., Simulation of the Effect of Keyhole Instability on Porosity during the Deep Penetration Laser Welding Process, *Metals*, Basel, v. 12, n. 7, p. 1200, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12071200>.
- [3] – KARAMI, S.; YOUSEFIEH, M.; MOOSAVY, H.N. The effect of laser welding parameters on mechanical properties and microstructure evolution of multi-layered 6061 aluminum alloy, *Journal of Advanced Joining Processes*, Volume 11, 2025.
- [4] - OLIVEIRA, Aline Capella de. Soldagem de alumínio estrutural aeronáutico utilizando um laser a fibra de alta potência. 2011. 151f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica e Aeronáutica). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [5] - DULEY, E. E. Laser welding, Ed. Wiley-Interscience. 1ª ed., 251 p., 1998
- [6] – RAKHI, K.; KANG, S.; SHIN, J.; Hot-Cracking Mechanism of Laser Welding of Aluminum Alloy 6061 in Lap Joint Configuration, *Materials*, v 16(19), p. 6426, 2023.
- [7] - TAO, W. et al. Simulating effects of welding speed on melt flow and porosity formation during double-sided laser beam welding of AA6056 –T4/AA6156-T6 aluminum alloy T-joint. *Journal of Alloys and Compounds*, v.699, p. 638-647, Março, 2017.
- [8] – SAMUEL, O. D. et al., Selection of optimal process parameters for a mild steel weld using Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, v. 26, n. 8, p. 1351–1356, 2022. DOI:<https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v26i8.5>
- [9] – JIAN et al., Effect of Laser Power on Microstructure and Properties of 6061 Aluminum Alloy Welded Joint, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, v. 12, p.683-691, 2023
- [10] Wei Duan, Ting Jiang and Lihong Zhou. Numerical Simulation of Laser Welding of Thin-wall Aluminum Alloy - *Advances in Engineering Research*, volume 166, 3rd International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering (AMCCE 2018), p. 401-404, 2018
- [11] PENG, J.; S XIE, S.; CHEN, T.; T.; WANG, X.; YU, X.; YANG, L.; NI Z.; LING, Z.; YUAN, Z.; SHI, J.; YANG, Z.; Numerical Simulation and Process Optimization of Laser Welding in 6056 Aluminum Alloy T-Joints. *Crystals*, 2025, 15(1), 35; <https://doi.org/10.3390/cryst15010035> p. 1-19
- [12] – EL-BATAHGY, A., Kutsuna, M., Laser Beam Welding of AA5052, AA5083, and AA6061 Aluminum Alloys, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2009, 974182, 9 pages, 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/974182>
- [13] - MAXIMO, Henry Wilson Pohling. Avaliação de propriedades mecânicas e microestruturais de juntas de aços maraging soldadas por meio dos processos laser e feixe de elétrons. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-27052015-090049/>. Acesso em: 01 jun. 2025.
- [14] - CHU, Qiaoling et al. *Microstructure, texture and mechanical properties of 6061 aluminum laser beam welded joints*. *Materials Characterization*, [S.l.], v. 143, p. 94–107, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.030>.
- [15] - CHENG, Jiwen et al. *Review of techniques for improvement of softening behavior of age-hardening aluminum alloy welded joints*. *Materials*, Basel, v. 14, n. 19, p. 5804, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14195804>.
- [16] - RONG, Youmin; HUANG, Yu; WANG, Lu. *Evolution mechanism of transient strain and residual stress distribution in Al 6061 laser welding*. *Crystals*, Basel, v. 11, n. 2, p. 205, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst11020205>.