

AVALIAÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO NO TRATAMENTO DE REFUSÃO SUPERFICIAL A LASER DA LIGA Al-1,5%Fe ATRAVÉS DA TÉCNICA DOS ELEMENTOS FINITOS¹

Viviane Teleginski²
Rudimar Riva³
Moisés Meza Pariona⁴

Resumo

O tratamento superficial a laser foi realizado em uma liga aeronáutica de alumínio (Al-1,5%Fe). A tensão residual desenvolvida na região aquecida pelo laser desempenha um papel importante na qualidade de propriedades mecânicas da chapa tratada. Neste caso, a chapa de metal foi aquecida acima da temperatura de fusão pela irradiação do laser, a região tratada sofreu elevados gradientes de temperatura durante o processo de aquecimento, resfriamento e solidificação. Como resultado, foi investigado o estresse térmico provocado pelo tratamento a laser, assim como as variações de temperatura na poça fundida e zona termicamente afetada, utilizando-se para esta finalidade a simulação numéricas através dos softwares Comsol Multiphysics e Thermo-Calc. A simulação foi aferida com o resultado experimental obtido pelas técnicas de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

Palavras-chave: Elementos finitos; Ligas Al-Fe, Microscopia eletrônica de varredura; Refusão a laser.

THERMAL STRESS AVALIATION OF LASER SUPERFICIAL TREATMENT OF Al-1.5wt%Fe ALLOY TROUGH FINITE ELEMENT TECHNIQUE

Abstract

Laser superficial treatment is carried out in an aeronautic aluminum alloy (Al-1.5%Fe). The residual stress developed in the heated region display an important role in the mechanical properties quality of the treated plate. In this case, the metal plate was heated above the melting temperature in the irradiated region by laser refusion, witch suffers high gradients of temperature during all process of heating, cooling and solidification. As a result, it has been investigated the thermal stress formed by the laser treatment, as the variations of temperature in the molten pool and thermally affected zone using numerical simulations of Comsol Multiphysics and Thermo-Calc softwares. The simulation was compared with the experimental results, it was obtained by techniques of optical microscopy and scanning electron microscopy.

Key-words: Finite elements; Al-Fe alloys; MEV; Laser refusion.

¹ *Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Tecnóloga em Processos de Fabricação Mecânica, aluna de Mestrado do Departamento de Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG.*

³ *Professor Doutor do Departamento de Física do Instituto Tecnológico da Aeronáutica.*

⁴ *Professor Doutor da Pós Graduação de Engenharia e Ciência de Materiais da UEPG.*

1 INTRODUÇÃO

Simulações numéricas dos processos de manufatura vêm sendo amplamente utilizadas, não apenas em atividades de pesquisa, mas também na indústria, pois através de previsões de resultados do modelo numérico torna-se possível reduzir tempo de processo e custos.⁽¹⁾ Além disso, outras razões também mostram a importância da simulação numérica: um maior conhecimento físico da técnica empregada, extensão segura da aplicabilidade dos processos para as modernas aplicações industriais, proporciona definições adequadas dos parâmetros de processo com maior eficiência e também propicia economia de custos adicionais elevados.⁽²⁾ O endurecimento superficial a laser, inicialmente reportado no início da década de 70 se tornou uma tecnologia estabelecida nos processos de manufatura industrial para melhorar características em áreas específicas de diversos componentes de engenharia. Isso revolucionou a indústria automotiva e aeroespacial para o endurecimento de partes como camas superficiais de turbinas, ranhuras de anéis de pistões, elementos de tração do motor, etc. Os processamentos a laser tornam a superfície endurecida extensivamente mais resistente ao desgaste, o que torna sua vida útil mais longa.⁽³⁾

O processamento a laser envolve altas temperaturas, os gradientes de temperatura desenvolvidos na região processada atingem elevados valores, que resulta naturalmente a presença do estresse térmico gerado na região irradiada. Além disso, altas taxa de resfriamento que ocorrem durante o processamento contribuem para a formação de estresse térmico na região tratada. Transformações de fases ou síntese de óxidos ou outros constituintes podem também gerar a liberação de energia de formação, podendo aumentar localmente a temperatura.⁽⁴⁾

Atualmente, muitos trabalhos envolvendo os diversos processamentos a laser vem ganhando uma nova abordagem, contando com novas e mais precisas técnicas de simulação numérica.⁽⁵⁾ Experimentalmente, técnicas mais avançadas de caracterização quanto a diversas propriedades envolvendo, por exemplo, corrosão e desgaste, vêm sendo utilizadas.⁽⁶⁻⁹⁾ Isso abre novas perspectivas de aplicações na indústria moderna.

O propósito deste trabalho foi simular o processo de refusão superficial a laser através da aplicação do método de elementos finitos. Avaliar o estresse térmico gerado e a transferência de calor envolvida. Finalmente, o modelo matemático foi comparado ao resultado experimental obtido.

2 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Foi utilizado o software COMSOL Multiphysics 4.2a⁽¹⁰⁾ para as simulações através do método de elementos finitos. A equação de transferência de calor pode ser escrita para um sistema de coordenadas cartesianas tridimensional como mostra a equação (1):

$$\rho \frac{\partial (C_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

onde x é a direção de movimento do feixe laser com velocidade v , z é a espessura da peça e Q é a fonte de calor. Os outros termos da equação e seus respectivos valores estão descritos na Tabela 1.

A equação que define a fonte de calor (Q) do feixe laser da equação (1), tem um comportamento gaussiano, como é mostrada na equação (2).⁽¹⁰⁾

$$Q = \left\{ \left[(1 - rf) I_0 \exp\left(-\frac{(\pi a^2)^2}{a^2}\right) \right] \text{delta} \right\} / 2 \quad (2)$$

Tabela 1 - Propriedades do material^(10,11)

Propriedade	Descrição	Função	Unidade
Cp	Capacidade térmica (Figura 1)	Função interpolação	J/kgK
E	Módulo de Young	68e9	Pa
α	Coefficiente de expansão térmica	24e-6	1/K
ρ	Densidade (Figura 1)	Função interpolação	kg/m ³
k	Condutividade térmica (Figura 1)	Função interpolação	W/mK
ε	Emissividade superficial	0.3	
I ₀	Densidade de potência pico do laser	1,81e10	W/m ²
t	Tempo	0,01	s
a	Diâmetro do laser na superfície	3e-3	m
h _{upside}	Coefficiente de transferência de calor na superfície superior	12,25	W/m ² K
h _{downside}	Coefficiente de transferência de calor na superfície inferior	6,25	W/m ² K
T _{amb}	Temperatura ambiente	300	K
T	Temperatura		K
x, y, z	Coordenadas cartesianas		
u	Deslocamento desenvolvido devido ao estresse térmico		m/s
v	Velocidade de varredura do feixe laser	0,04	m/s
rf	Refletividade	0,63	
delta	Absorbância	0,37	

As propriedades densidade (ρ), capacidade térmica (Cp) e condutividade térmica (k) variam de acordo com a temperatura. Essas propriedades foram obtidas pelo software Thermo-Calc,⁽¹¹⁾ tais propriedades termofísicas são mostradas na Figura 1.

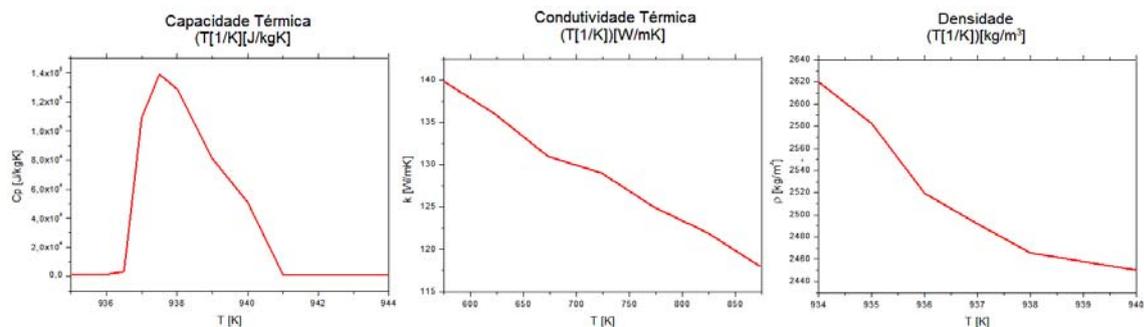


Figura 1. Propriedades termofísicas da liga Al-1,5%Fe: Cp, k e ρ.⁽¹¹⁾

A geometria utilizada e as condições de contorno que foram estabelecidas para a análise de transferência de calor são mostradas na Figura 2. Neste trabalho utilizou-se um modelo de simetria.

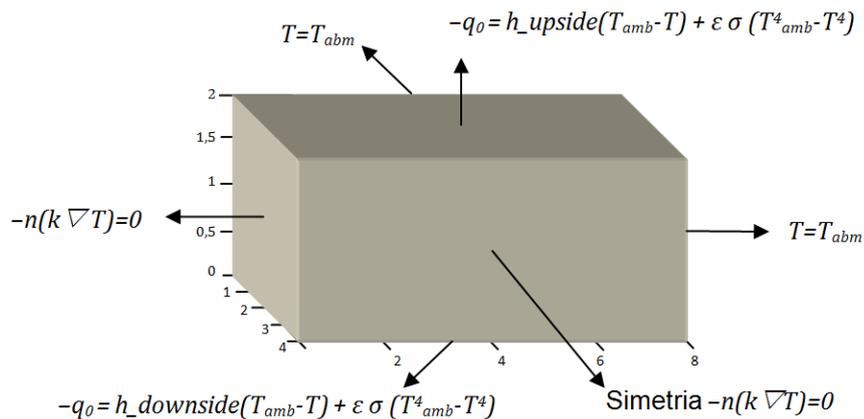


Figura 2. Esquema das condições de contorno para análise de transferência de calor.

O elemento de malha de elementos finitos utilizado foi do tipo triangular, com refinamento na região onde o laser foi irradiado. O número total de elementos da malha foi 55924.

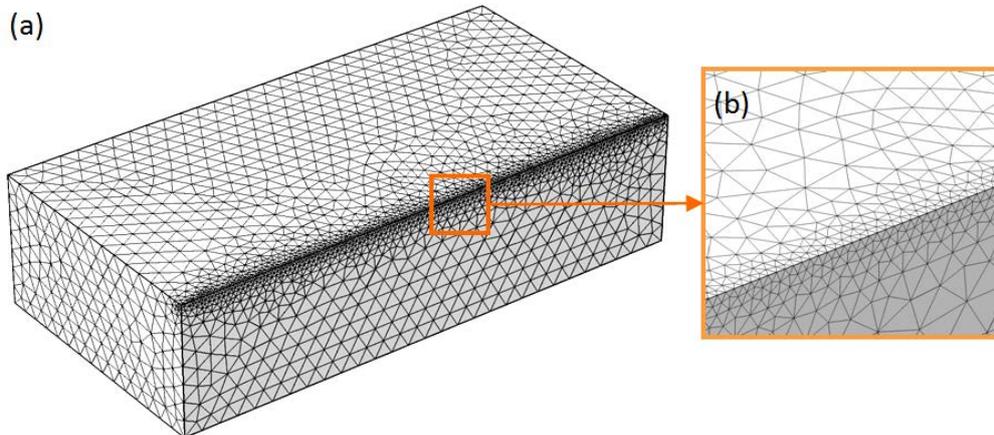


Figura 3. Elemento de malha de elementos finitos triangular onde (a) mostra a visão geral e (b) uma ampliação da região mais refinada.

3 ANÁLISE DO ESTRESSE TÉRMICO

Em situações práticas os fenômenos que ocorrem não são isolados, ocorrendo simultaneamente a outros. Como neste caso há uma brusca elevação de temperatura em regiões localizadas, seguindo de resfriamento extremamente rápido, gera-se o estresse térmico, produzindo elevadas tensões e deformações no material tratado. A simulação numérica para este tipo de problema, utilizando a técnica de elementos finitos é resolvida em forma transiente. Para que haja maior proximidade com a realidade, é necessário considerar as propriedades termofísicas em função da temperatura para propriedades como o módulo de elasticidade (E) e coeficiente de expansão térmica (α), além da densidade (ρ), capacidade térmica (Cp) e condutividade térmica (k).

Para a resolução deste problema, as condições de contorno iniciais são as mesmas das condições para a transferência de calor, mostradas na Figura 2, seguidas das condições de contorno mecânicas. Para isto fixa-se a amostra na face inferior e as outras faces são consideradas livres. Também deve ser estabelecido que o material

da amostra possui comportamento isotrópico, ou seja, suas propriedades não variam para diferentes direções.

A equação geral para o estresse térmico é dada pela equação (3):⁽¹⁰⁾

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u_{trans} \nabla T = \nabla (k \nabla T) + Q \quad (3)$$

A relação tensão deformação pode ser obtida através da equação (4):⁽¹²⁾

$$\{\sigma\} = E(\{\epsilon\} - \alpha \{\Delta T\}) \quad (4)$$

Onde $\{\sigma\}$ é o tensor da tensão, $\{\epsilon\}$ é o tensor da deformação e ΔT é o gradiente de temperatura. O comportamento do material de tensão-deformação foi considerado elásto-plástico, assim, a forma incremental da deformação é escrita como mostra a equação (5):⁽¹³⁾

$$ds = [B]\{dw\} \quad (5)$$

Onde B é a matriz deformação-deslocamento e dw é o incremento do deslocamento. A equação constitutiva do material na forma incremental fica então escrita como:^(13, 14)

$$\{d\sigma\} = [D_d]\{d\epsilon\} - \{C\}dT \quad (6)$$

onde $[D_d]$ é a matriz elasto-plástica que envolve $[D_e^*]$ a parte elástica e $[D_p^*]$ parte plástica. O parâmetro $\{C\}$ que relaciona o incremento da tensão devido à dependência das propriedades termofísicas em função da temperatura e mecânicas do material é mostrado na equação (7):⁽¹⁴⁾

$$\{C\} = -[D_e^*] \left(\{\alpha\} + \frac{\partial [D_e^*]}{\partial T} \{\sigma\} \right) \quad (7)$$

A taxa total de deformação ($\dot{\epsilon}$) pode ser escrita como a soma das componentes individuais da taxa de deformação, como segue na equação (8):⁽¹⁵⁾

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_p + \dot{\epsilon}_T \quad (8)$$

Os componentes desta equação representam a taxa de deformação devido à deformação elástica, plástica e térmica. A tensão é representada pela tensão equivalente de von-Misses (σ_m), dada pela equação (9):⁽¹⁵⁾

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (9)$$

onde σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A liga Al-1,5%Fe em estudo foi preparada no laboratório de Engenharia de Materiais da Unicamp a partir de matérias-primas comercialmente puras, em forno à indução,

onde um lingote cilíndrico foi obtido. Amostras foram cortadas em forma de chapas de dimensões 80x40x6mm. Depois, as chapas foram jateadas com areia e em seguida submetidas ao tratamento de refusão superficial a laser, que foi realizado no laboratório do Instituto de Estudos Avançados do Centro Tecnológico da Aeronáutica CTA-ITA, em São José dos Campos – SP, utilizando um laser de fibra dopada com Itérbio (Yb:YAG), com potência nominal de 600 W. O esquema de como o laser varreu a superfície da chapa é mostrado na Figura 4.



Figura 4. Esquema do tratamento superficial a laser: formação das trilhas de refusão.

As caracterizações das amostras e a simulação numérica foram realizadas no laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa. As observações microestruturais foram realizadas em um microscópio óptico (Olympus BX51) e em microscópio eletrônico de varredura (Shimadzu, modelo SSX-550). Na secção transversal das amostras, foi realizada a preparação metalográfica com lixas 600# e 1200 #, polimento com sílica coloidal (0,04 μm) e ataque químico (HF 0,5%), sendo posteriormente lavadas em álcool e secas em ar quente.

5 RESULTADOS E DISCUSÕES

O material tratado foi analisado através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Observou-se na secção transversal do material uma acentuada diferença entre a região tratada (trilha) e a região não tratada. Na Figura 5 pode-se observar que a distância aproximada entre as trilhas foi de 300 μm .

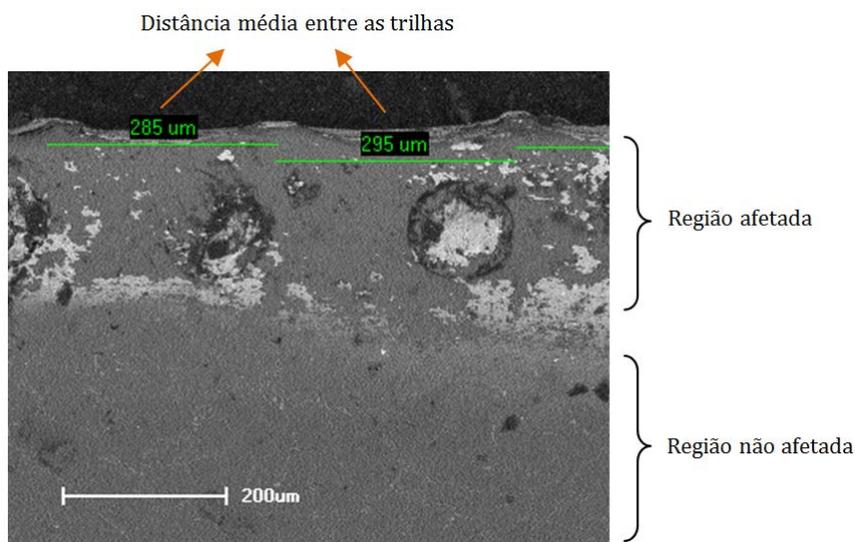


Figura 5. Imagem da secção transversal da amostra tratada, mostrando as regiões afetadas e não afetadas pelo laser e a distância aproximada entre as trilhas, obtida através de elétrons retroespalhados, com aceleração de 40 kV, probe size 4.0 e distância de trabalho 18 mm, sem recobrimento.

Na região da superfície observa-se a formação de abaulamentos. Segundo Pariona et al.⁽⁶⁾ e Bertelli et al.,⁽¹⁶⁾ isso ocorre devido à baixa velocidade de varredura do feixe laser, o que aumenta o tempo de interação do calor com o substrato. A Figura 6a mostra a secção transversal da amostra tratada, sendo que na Figura 6b estão destacadas as poças de refusão, que são formadas durante a exposição ao laser.

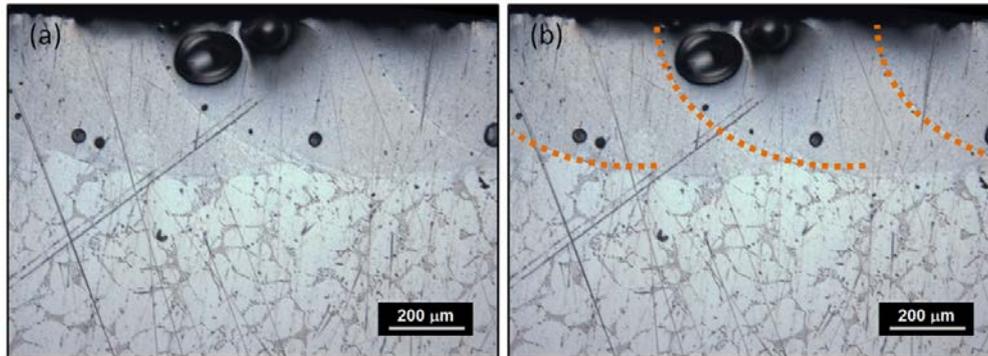


Figura 6. (a) Microscopia óptica da secção transversal da amostra e (b) destaca as poças formadas pelo feixe laser.

Neste trabalho foi realizada uma análise híbrida de transferência de calor e de estresse térmico. Estes fenômenos ocorrem em escala da ordem de micros, como pode ser observado nas Figuras 5 e 6. O resultado da simulação numérica da transferência de calor e deformações resultantes do estresse térmico é mostrado na Figura 6. Para a análise deste trabalho foi escolhido o tempo de 0,01 segundos após a incidência do feixe laser.

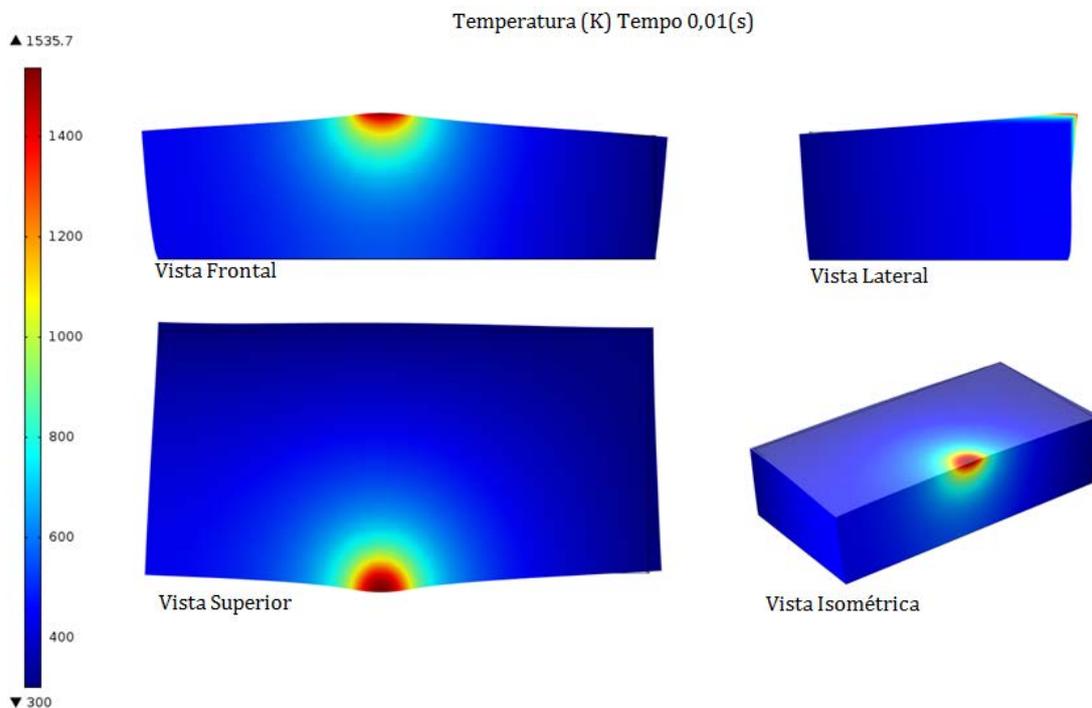


Figura 7. Resultado da simulação numérica para a transferência de calor acompanhada das deformações causadas pelo estresse térmico.

Nesta figura, observa-se a formação abaulamento na região da trilha e a deformação geral da peça. Nesta figura não estão sendo considerados os resultados do estresse térmico, apenas a sua consequência na deformação.

O resultado da simulação numérica foi aferido com o resultado experimental, mostrando o abaulamento na trilha na superfície da amostra tratada. Comparando-se a profundidade da poça formada experimentalmente durante a exposição ao laser (Figura 6) com as isotermas geradas pela simulação numérica, percebe-se que o modelo matemático foi preciso quanto a isso.

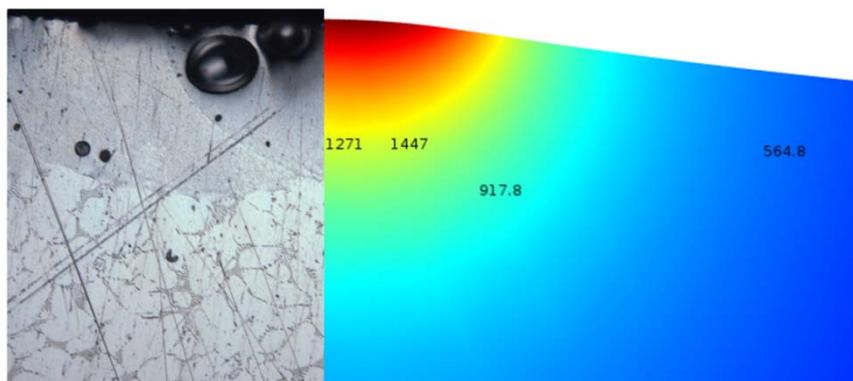


Figura 8. Comparação do modelo experimental com o modelo matemático da transferência de calor.

Como consequência do estresse térmico é produzida uma tensão-deformação na região tratada. A Figura 9 mostra o resultado do estresse térmico na peça. Observa-se nesta figura que as maiores tensões foram desenvolvidas na parte inferior da peça, pois esta foi definida nas condições de contorno como sendo fixa. Deste modo, como a região é impossibilitada de deformação, concentram-se tensões.

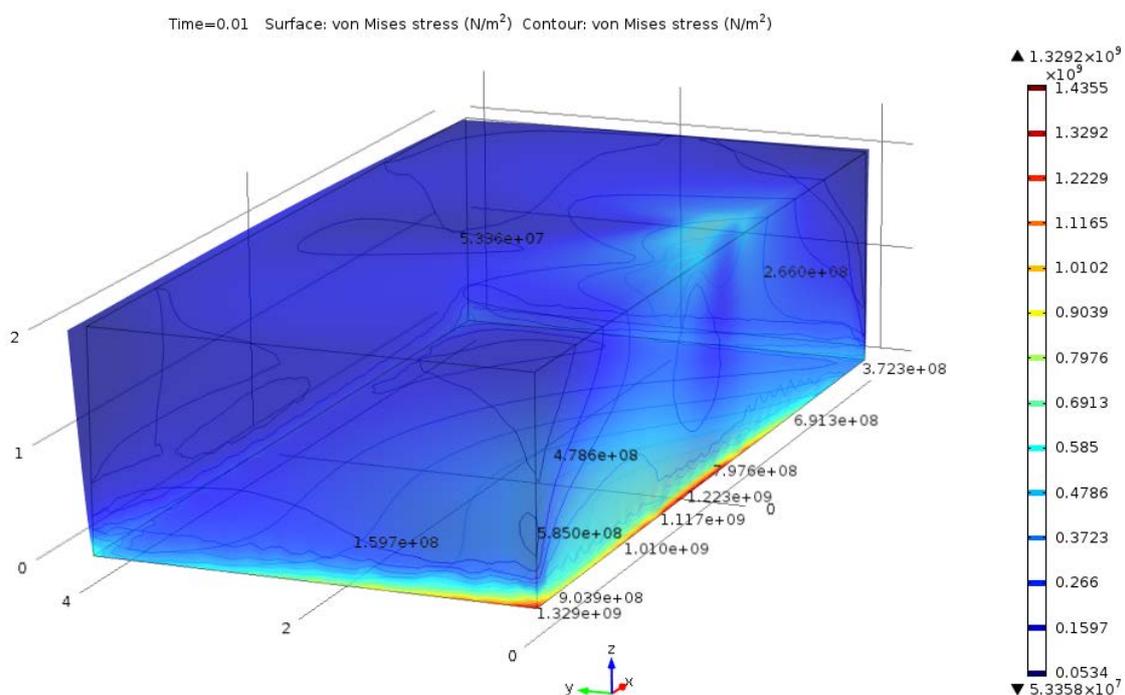


Figura 9. Resultado da simulação numérica para a tensão Von-Mises do estresse térmico.

Na região base da peça, abaixo do local de incidência do feixe laser e na extremidade da peça estão localizadas as maiores tensões, atingido o máximo

observado de $1,3292 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. No local de irradiação do laser, entretanto, as tensões são mais baixas devido à grande deformação que ocorreu, aliviando as tensões e formando o abaulamento, já mostrados nos experimentos na Figura 5.

Embora a simulação numérica seja referente há um tempo específico de 0,01 segundos após a incidência do feixe laser, no experimento foram realizadas diversas trilhas de refusão. Consequentemente, no momento em que o feixe laser varre as proximidades de uma região já deformada outras deformações e transferências de calor ocorrem. Para que se tenha uma visão generalizada das deformações totais sofridas pelo espécime, a simulação numérica deverá contemplar as diversas trilhas de refusão realizadas.

6 CONCLUSÕES

Através da simulação numérica da transferência de calor e do estresse térmico foi observada a distribuição das isotermas nas diferentes regiões da zona tratada, a formação de um abaulamento na região da trilha e a distribuição de tensão-deformação. Atribui-se à formação de tensões e deformações as bruscas mudanças de temperatura durante o aquecimento e resfriamento. O resultado da simulação numérica foi comparado ao resultado experimental, havendo coerência com o resultado observado por MEV e microscopia óptica. Este resultado ainda precisa um estudo mais refinado para ter uma aferição maior com a realidade. O estudo da simulação numérica proporciona resultados qualitativos e quantitativos, procurando aperfeiçoar os parâmetros envolvidos e dessa forma otimizar o processamento em estudo, propiciando economia nos investimentos, tempo e mão de obra dos projetos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à Fundação Araucária (FA) que financiam esta pesquisa e ao Instituto Estudos Avançados (IEAv) do Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA.

REFERÊNCIAS

- 1 FORTUNATO, A.; ASCARI, A.; ORAZI, L.; CAMPANA, G.; CUCCOLINI. **Numerical evaluation of the reflectivity coefficient in laser surface hardening simulation**. Surface and Coatings Technology. V. 206, p. 3179-3185, 2012.
- 2 MORAITIS, G.A.; LABEAS, G.N. **Residual stress and distortion calculation of laser beam welding aluminum lap joints**. Journal of Materials Processing Technology. V. 198, p. 260-269, 2008.
- 3 NATH, A.K.; GUPTA, A.; BENNY, F. **Theoretical and experimental study on laser surface hardening by repetitive laser pulses**. Surface and Coatings Technology. V. 206, p. 2602-2615, 2012.
- 4 YILBAS, B.S.; ARIF, A.F.M.; KARATAS, C.; RAZA, K. **Laser treatment of aluminum surface: analysis of thermal stress fields in the irradiated region**. Journal of Materials Processing Technology. V. 209, p. 77-88, 2009.
- 5 CHEUNG, N.; CRUZ, K.A.S.; KHAN, N.H.; GARCIA, A. **Numerical and Experimental Analysis of Laser Surface Remelting of Al-15Cu Alloy Samples**. Surface Engineering, v. 21, p. 473-479, 2005.
- 6 PARIONA, M.M.; TELEGINSKI, V.; SANTOS, K. DOS; MACHADO, S.; ZARA, A.J.; ZURBA, N.K.; RIVA, R. **Yb-fiber laser beam effects on the surface modification of Al-Fe aerospace alloy obtaining weld fillet structures, low fine porosity and corrosion resistance**. Surface and Coatings Technology, v.206, p. 2293-2301, 2012.

- 7 YILBAS, B. S.; KHALED, M.; KARATAS, C. **Corrosion properties and morphology of laser melted aluminum alloy 8022 surface.** Journal of Materials Engineering and Performance, v. 18, p. 1-7, 2009.
- 8 PINTO, M. A.; CHEUNG, N.; LENARDI, M.C.F.; GARCIA, A. **Microstructural and hardness investigation of an Al-Cu alloy processed by laser surface melting.** Materials Characterization, v. 50, p. 249-253, 2003.
- 9 Yue, T. M.; YAN, L.J.; CHAN, C.P.; DONG, C.F.; MAN, H.C.; PANG, G.K.H. **Excimer laser surface treatment of aluminum alloy AA7075 to improve corrosion resistance.** Surface and Coatings Technology, v. 179, p. 158-164, 2004.
- 10 Users Handbook COMSOL Multiphysics. v. 4.2a, 2012.
- 11 THERMO CALC software, Stockholm, Sweden, 2010.
- 12 M. TOPARLI, M.; SAHIN, S.; OZKAYA, E.; SASAKI, S. **Residual thermal stress analysis in cylindrical steel bars using finite element method and artificial neural networks.** Computers and Structures, V. 80, p. 1763–1770, 2002.
- 13 LEE, C.-H.; CHANG, K.-H. **Numerical analysis of residual stresses in welds of similar or dissimilar steel weldments under superimposed tensile loads.** Computational Materials Science, V. 40, p. 548–556, 2007.
- 14 Z. Hou, Z.; Kim, I.S.; Wang, Y.; Li, C.; Chen, C. **Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process.** Journal of Materials Process Technology, V. 185, p. 160–165, 2007.
- 15 PARIONA, M.M.; RUGENSKI, J.K.; CANTÉ, M.V.; SPINELLI, J.E.; GARCIA, A. **Thermal stress analysis of a directionally solidified Al–1 wt%Ni alloy casting.** Finite Elements in Analysis and Design, V. 46, p. 889–895, 2010.
- 16 BERTELLI, F.; MEZA, E.S.; GOULART, P.R.; CHEUNG, N.; RIVA, R; GARCIA, A. **Laser remelting of Al-1.5%Fe alloy surfaces: Numerical and experimental analyses.** Optics and Lasers in Engineering. V. 49, p. 490-497, 2011.