

TRATAMENTO SUPERFICIAL A LASER DO AÇO 1045 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DA ZONA TRATADA

Evaldo Júlio Ferreira Soares, Maria Aparecida Pinto, Noé Cheung, Maria Clara Filippini Ierardi, Amauri Garcia.

Departamento de Engenharia de Materiais - Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP - Caixa Postal 6122
13083-970 - Campinas - SP

e-mail: clara1@fem.unicamp.br

fax: (0xx19) 3289-3722

Resumo. *Os tratamentos superficiais dos materiais, sobretudo de metais, têm desempenhado um papel de grande importância no aumento da dureza e resistência ao desgaste da superfície. Vários processos existentes visam a transformação microestrutural ou química de uma camada da superfície, da ordem de milímetros ou micrômetros dependendo do tipo de processo empregado. Em particular, o tratamento superficial por laser tem aumentado sua aplicação devido a uma série de vantagens não proporcionadas pelos métodos convencionais. Os tratamentos superficiais a laser constituem em um meio eficiente de modificação localizada das propriedades mecânicas ou químicas, sem haver a necessidade de reprocessamento do material como um todo, ou seja, mantendo as características geométricas originais da amostra ou peça submetida ao tratamento. O presente trabalho tem como objetivos a aplicação da modelagem matemática do processo de tratamento superficial a laser, com e sem a fusão superficial, em amostras do aço AISI 1045, confrontando os resultados experimentais com os de simulação matemática na previsão das camadas refundida e tratada termicamente, e avaliar a influência da velocidade de deslocamento do feixe de laser sobre os aspectos microestruturais e as dimensões da zona tratada.*

Palavras-chave: *laser, tratamento superficial, modelagem matemática, microestrutura.*

1. INTRODUÇÃO

O processamento de materiais com utilização do laser tem sido, nos últimos tempos, uma importante área de pesquisa e seus avanços têm encontrado aplicações em diferentes setores industriais. Os tratamentos superficiais por laser são aplicados na transformação microestrutural ou química da camada superficial dos materiais, com uma série de vantagens em relação a outros métodos convencionais, sendo um meio eficiente de modificação localizada das propriedades mecânicas e químicas, sem que haja a necessidade de submeter todo material ao reprocessamento (Monson, 1990; Yang, 1994; Steen, 1994). Outras vantagens dos tratamentos superficiais por laser são a facilidade de automação, precisão e limpeza o que vem a torná-los extremamente competitivos em certas áreas industriais. Devido a necessidade de melhorar o desempenho dos componentes industriais e para que se tenha um maior controle dos métodos de produção, tem-se buscado, continuamente, uma otimização dos processos de tratamento superficial por laser. O

modelamento matemático tem-se mostrado uma ferramenta poderosa no relacionamento das variáveis de processo com a obtenção do tratamento pretendido. Porém, só através do conhecimento e controle do conjunto de variáveis de processo tais como: tempo de interação da radiação com o material, perfil de intensidade do feixe, absorção óptica, condução de calor e formação microestrutural é que se alcançará uma formulação física real do processo.

O presente trabalho tem como objetivos a aplicação de modelagem matemática do processo de tratamento superficial a laser, com e sem fusão superficial, em amostras do aço AISI 1045, confrontando estudos experimentais com os de simulação matemática, na previsão da camada refundida e tratada termicamente e a avaliação da influência da velocidade de deslocamento do feixe de laser sobre os aspectos microestruturais e as dimensões da zona tratada.

2. DESENVOLVIMENTO DO MODELAMENTO MATEMÁTICO

O modelo matemático é baseado na equação geral da condução de calor em coordenadas cilíndricas (Incropera, 1990):

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde:

- r, z e ϕ são coordenadas cilíndricas;
- k = condutividade térmica [W/m.K];
- c = calor específico [J/kg.K];
- ρ = densidade [kg/m³];
- \dot{q} = geração de calor [W/m³];
- T = temperatura [K];
- t = tempo [s];

A Fig. (1) ilustra as condições de contorno necessárias à estruturação do modelo matemático bidimensional em coordenadas cilíndricas. Devido à simetria, modela-se somente a metade do substrato.

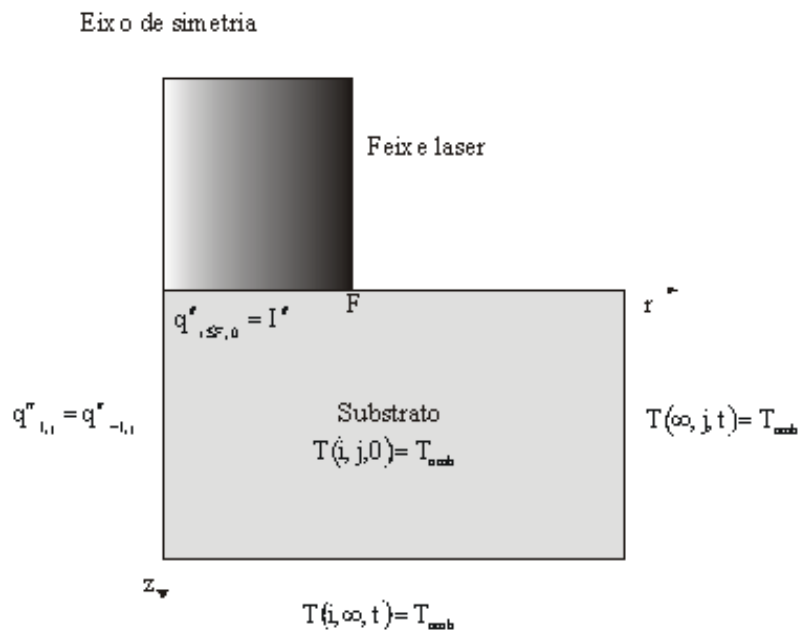


Figura 1 – Condições de contorno para a modelagem bidimensional do processo de refusão superficial a laser

Reduzindo a equação (1) para a forma bidimensional segundo o raio, isto é, considerando que o sistema apresenta simetria em relação à coordenada ϕ :

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

A condição de simetria ainda implica que os fluxos de calor na direção (r) imediatamente à esquerda e à direita do eixo de simetria sejam iguais isto é:

$$q_{1,j}'' = q_{-1,j}'' \quad (3)$$

onde: os subscritos \square_1 e \square_{-1} representam respectivamente posições em r imediatamente à esquerda e à direita do eixo de simetria;

o subscrito \square_j representa posições segundo o eixo z;

Para regiões afastadas da ação do feixe laser, é utilizada a condição de sólido infinito, permanecendo na temperatura ambiente:

$$T(i, \infty, t) = T(\infty, j, t) = T_{amb} \quad (4)$$

onde: i = posição no eixo r;

t = instante de tempo;

T_{amb} = temperatura ambiente;

A energia do feixe laser é absorvida pela superfície do material e transmitida por condução para o seu interior:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{i,0} = I'' \quad (5)$$

onde: I'' = energia do *laser* absorvida pela superfície do material [W/m^2];

A distribuição de potência gaussiana de um feixe laser é dada pela expressão (Hsu, 1980):

$$I_G'' = I_0'' \cdot e^{\frac{-2 \cdot r^2}{a^2}} \quad (6)$$

Outra condição de contorno necessária nos fenômenos de transformação de fase é o tratamento do avanço da fronteira líquido/sólido. A maioria dos modelos matemáticos desenvolvidos para a simulação de refusão a laser em ligas despreza a existência da zona pastosa e trata o problema como tendo somente uma fronteira móvel de deslocamento da isoterma de temperatura de fusão devido às altas velocidades de solidificação (Basu, 1990; Berjeza, 1995; Maier, 1992). Uma das formas de incorporar o efeito do calor latente é apresentada pelo Método de Dusimberre (Ruddle, 1957). O Método de Dusimberre define a constante (λ), que controla o avanço da interface sólido/líquido. Esta constante é dada por:

$$\lambda = \frac{L}{c} \quad (7)$$

onde: L = calor latente [J/kg]

c = calor específico [$J/kg \cdot K$]

Fisicamente, (λ) significa a variação de temperatura do material equivalente ao calor latente. A incorporação do Método de Dusimberre no modelo matemático demanda a retirada do termo de geração de calor da equação (2):

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

Para o caso em que se restringe à transformação no estado sólido, isto é, à transformação martensítica, o modelo não utiliza o Método de Dusimberre, e se restringe às condições de contorno apresentadas e à Equação (8). O mapeamento térmico juntamente com a taxa de resfriamento provê a dimensão da zona que sofre transformação martensítica.

Aplicando à equação (8) o Método das Diferenças Finitas no modo explícito de trabalho tem-se a expressão para determinação do campo térmico:

$$T_{i,j}^{n+1} = \frac{\Delta t}{\rho_{i,j} \cdot c_{i,j}} \cdot \left[\frac{ke_{i-1,j} \cdot (r_{i,j} - 0,5 \cdot \Delta r) \cdot (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + ke_{i+1,j} \cdot (r_{i,j} + 0,5 \cdot \Delta r) \cdot (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n)}{r_{i,j} \cdot \Delta r^2} + \dots \right. \\ \left. \dots + ke_{i,j+1} \cdot \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta z^2} + ke_{i,j-1} \cdot \frac{T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta z^2} \right] + T_{i,j}^n \quad (9)$$

onde n = número de iterações de intervalos de tempo (Δt) ;

ke = condutividade térmica equivalente, que representa a condutividade térmica equivalente entre o elemento (i,j) com o elemento vizinho. Por exemplo, ke_{i+1} representa a condutividade térmica entre o elemento (i,j) com o elemento de malha $(i+1,j)$ [6]:

$$ke_{i+1,j} = \frac{2 \cdot k_{i,j} \cdot k_{i+1,j}}{k_{i,j} + k_{i+1,j}} \quad (10)$$

As propriedades termofísicas do aço AISI 1045 utilizadas no modelo matemático, em função da temperatura foram retiradas da referência (Dardel, 1964). O diagrama das curvas de resfriamento do aço AISI 1045 para a taxa de resfriamento mínima que proporciona transformação martensítica se encontra na referência (Atkins, 1980).

A Fig. (2) mostra a configuração dos elementos de diferenças finitas ilustrando o acoplamento de uma malha fina com uma malha grossa. O objetivo de utilizar este acoplamento de malhas está na otimização do número de variáveis a ser utilizado no programa computacional. Como o modelo matemático é bidimensional, a matriz empregada nos cálculos das temperaturas é também bidimensional. Outro fator agravante é a necessidade de se trabalhar com dimensões reduzidas (ordem de micrômetros) de elementos para se obter uma adequada precisão nos resultados. Neste sentido, por exemplo, para um meio físico que possui uma área a ser modelada de 1mm^2 utilizando uma malha regular de $1\text{ }\mu\text{m}$ tem-se um milhão de elementos, o que torna os cálculos computacionais custosos em relação ao tempo de processamento. Trabalhando-se com diferentes tamanhos de malhas, o refinamento da malha pode ser utilizado somente na região de influência do feixe *laser* enquanto em regiões mais distantes uma malha mais grossa é empregada.

A validação do modelo matemático desenvolvido foi realizada comparando-se isotermas simuladas com as geradas pelo modelo desenvolvido por Hsu e outros (Hsu, 1980) para o caso da fusão de alumínio puro sob ação de um feixe *laser* de distribuição gaussiana, sendo que houve boa concordância entre as isotermas.

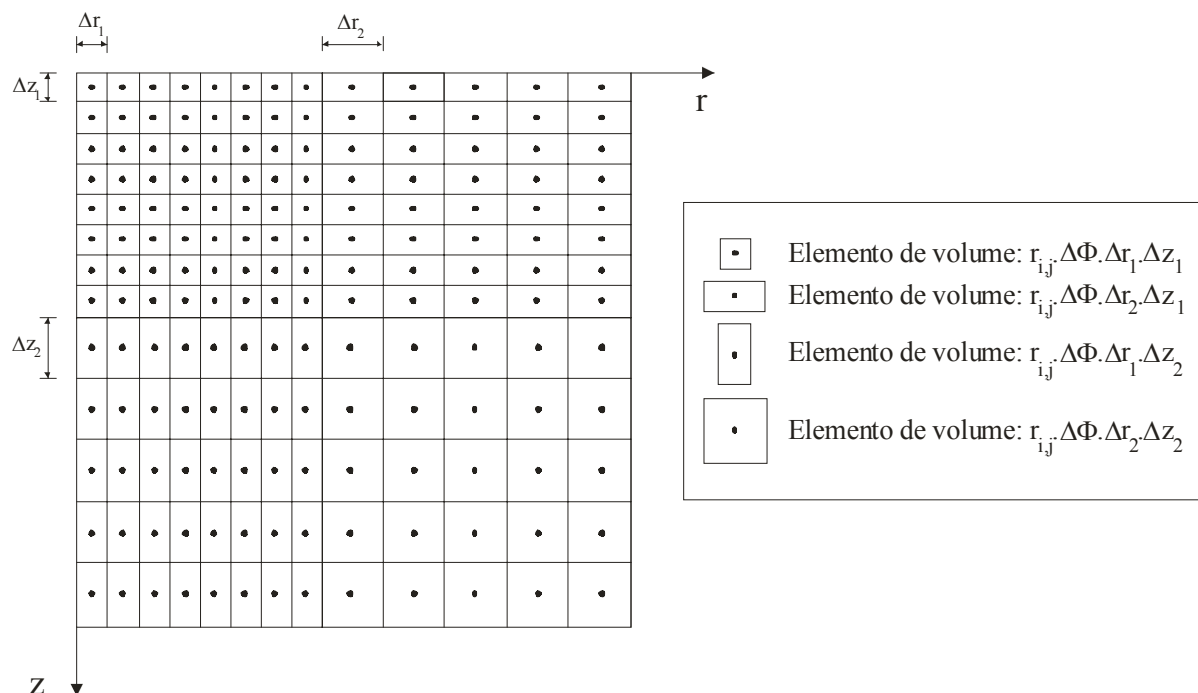


Figura 2 – Esquema ilustrativo de quatro diferentes tipos de malhas geradas em função do emprego de diferentes tamanhos de Δr e Δz

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O Laser utilizado nos tratamentos de superfície foi o Laser de CO₂ do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron com potência nominal de 1000W, trabalhando no modo contínuo. O ensaio consistiu em deslocar o feixe de laser sobre a superfície de uma chapa de aço AISI 1045 cuja superfície teve o acabamento por jateamento de areia. As trilhas na superfície da chapa foram realizadas nas condições: potência de feixe de 160W, diâmetro do feixe de 300μm e velocidade variando de 500mm/min a 20000mm/min.

Para análise metalográfica as amostras foram cortadas na secção transversal à direção de deslocamento do feixe, lixadas e polidas. As amostras foram atacadas com reagente Fry para observação em microscopia ótica e eletrônica de varredura. Foram feitas medições da largura e profundidade da região tratada, usando o microscópio ótico Neophot 32 com sistema de análise de imagem Leica Q500MC.

4. RESULTADOS E DISCUSÃO

4.1 Simulação matemática na previsão da camada refundida e tratada termicamente

A Fig. (3) mostra a comparação entre os resultados experimentais e simulados para o caso da transformação no estado sólido. Pode-se observar que existe uma redução na zona afetada pelo calor quando a velocidade aumenta de 7600 mm/min para 18000 mm/min. Este fato se deve a um menor tempo de interação laser/matéria e portanto uma quantidade menor de energia é liberada ao material. A fronteira entre a zona afetada pelo calor e o substrato observada nas Fig. (3 a) e (3 b) é dada pela isoterma eutetóide. Devido ao aumento das temperaturas em direção à superfície, as colônias de perlita vão se transformando em austenita. Na vizinhança da fronteira substrato/zona afetada pelo calor, estas colônias de perlita não tiveram tempo suficiente de interagir com a ferrita ao seu redor e portanto, sua concentração de carbono permaneceu a mesma. Na zona afetada pelo calor observam-se duas fases: uma clara e outra escura. A fase clara é martensita proveniente das regiões ferríticas enquanto a escura é proveniente da perlita. O tempo em que esta zona permaneceu acima da temperatura eutetóide não foi suficiente para que houvesse difusão do carbono a partir da austenita rica em carbono (proveniente da perlita) para a austenita formada a partir da perlita.

Comparando-se as zonas afetadas pelo calor das duas amostras, a que foi submetida à velocidade de 7600 mm/min apresentou uma quantidade de fases escuras (martensita rica em carbono) maior do que a de 18000 mm/min. Tal fato é explicado pelo maior tempo de interação do feixe laser que permitiu uma difusão maior do carbono entre as fases de austenitas rica e pobre em carbono. Na zona martensítica observa-se uma homogeneidade indicando que a concentração de carbono é praticamente uniforme pelo fato desta zona apresentar as maiores temperaturas, influenciando diretamente no aumento do coeficiente de difusão.

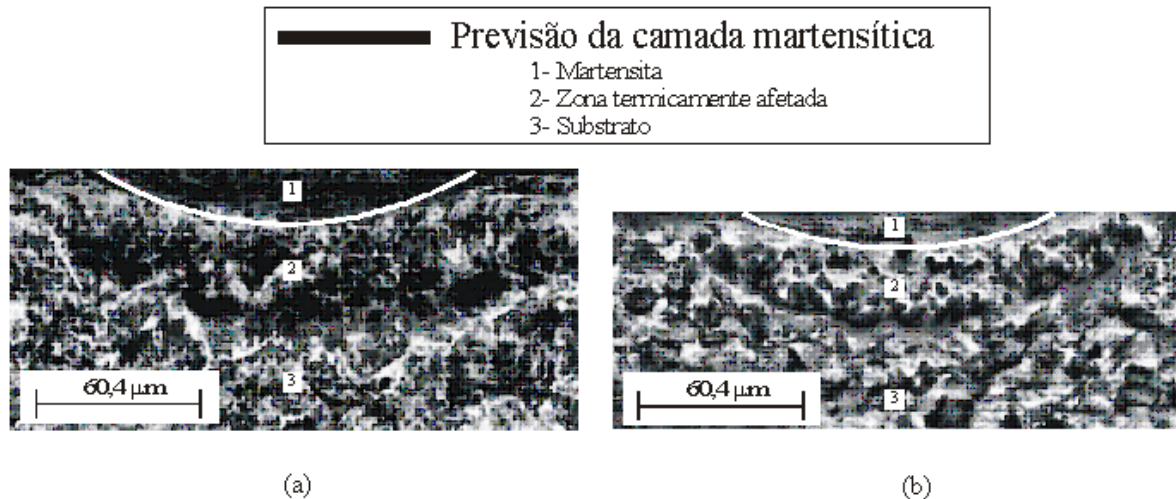


Figura 3– Previsão da camada martensítica para potência= 160 W
 a) velocidade do feixe = 7600 mm/min; b) velocidade do feixe = 18000 mm/s;

A comparação entre as microestruturas e a previsão da delimitação da poça fundida é mostrada na Fig. (4). A microestrutura revelou três zonas distintas: poça fundida, martensita e zona termicamente afetada. Observa-se que a concordância entre os resultados de simulação e experimentais é boa. Para as duas velocidades de deslocamento do feixe *laser*, a diferença entre os tamanhos das três zonas é nítida, havendo uma redução quando a velocidade aumenta de 500 para 2000 mm/min. Este fato é explicado pelo menor tempo de interação *laser*/matéria e portanto, uma menor quantidade de energia é dispensada na superfície do material. No mesmo sentido, a influência da velocidade também é observada no deslocamento das isothermas conforme mostra a Fig. (5) em que há maior aquecimento do material para a menor velocidade de deslocamento do feixe.

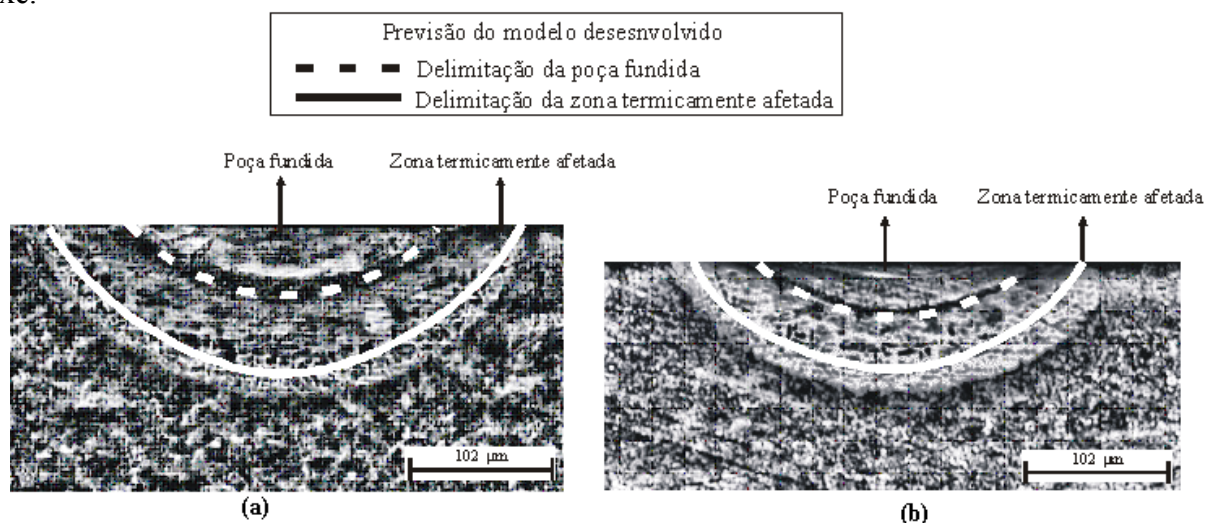


Figura 4 – Comparação entre as delimitações das poças fundidas microestrutura/simulação para P = 160 W, diâmetro de feixe 0,3 mm: (a) velocidade do feixe = 500 mm/min; (b) velocidade do feixe = 2000 mm/min

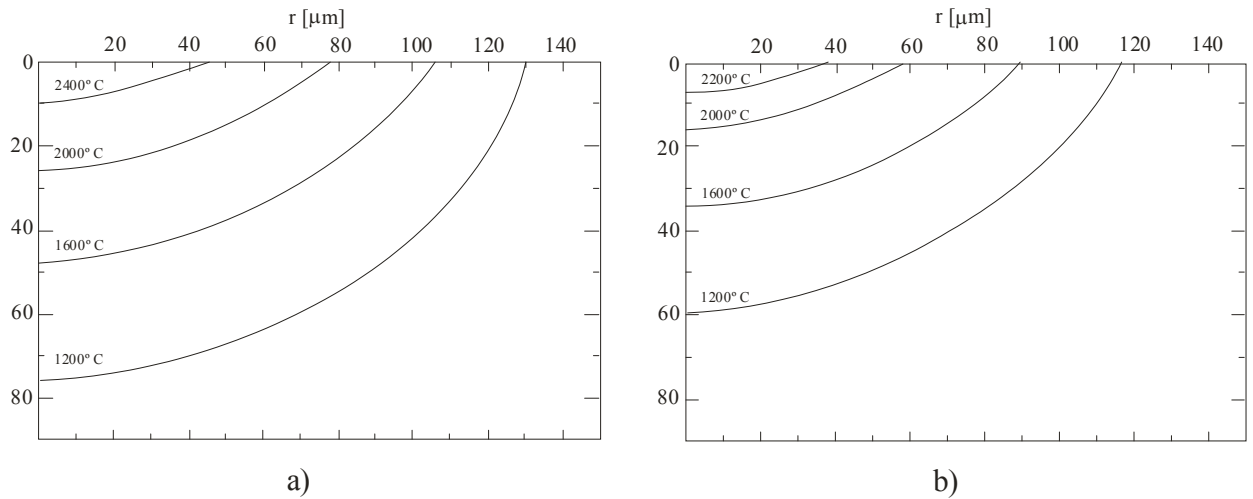


Figura 5 – Isotermas geradas para P = 160 W, diâmetro de feixe 0,3 mm

a) velocidade do feixe = 500 mm/min

b) velocidade do feixe = 2000 mm/min

4.2 Influência da velocidade de deslocamento do feixe do laser sobre as dimensões da zona tratada.

Com a finalidade de conhecer a influência da velocidade de feixe de laser sobre a zona tratada foram feitas medições da largura e profundidade da região tratada, usando o microscópio ótico Neophot 32 com sistema de análise de imagem Leica Q500MC. Foram plotados gráficos largura x velocidade e profundidade x velocidade da região tratada, com a velocidade variando de 500 mm/min ate 20000 mm/min. Os resultados são apresentados nas Fig. 6 e 7 mostrando um decaimento monotônico que segue um comportamento conforme uma lei exponencial. Esta lei foi obtida, a partir dos dados experimentais, através do método dos mínimos quadrados. Observa-se que a profundidade é mais afetada, percentualmente, pelo aumento da velocidade do deslocamento do feixe do que a largura. As funções que correlacionam as dimensões da zona tratada em função da velocidade de deslocamento do feixe são mostradas nas Equações (11) e (12), sendo útil para a programação da velocidade em função do tamanho da zona tratada desejada.

$$Largura = 231,9544 + (114,74583) \cdot e^{\left[\frac{-(V-500)}{4159,41673} \right]} \quad (11)$$

$$Profundidade = 61,15526 + (58,93867) \cdot e^{\left[\frac{-(V-500)}{2109,2492} \right]} \quad (12)$$

onde velocidade é dada em mm/min e largura e profundidade em μm

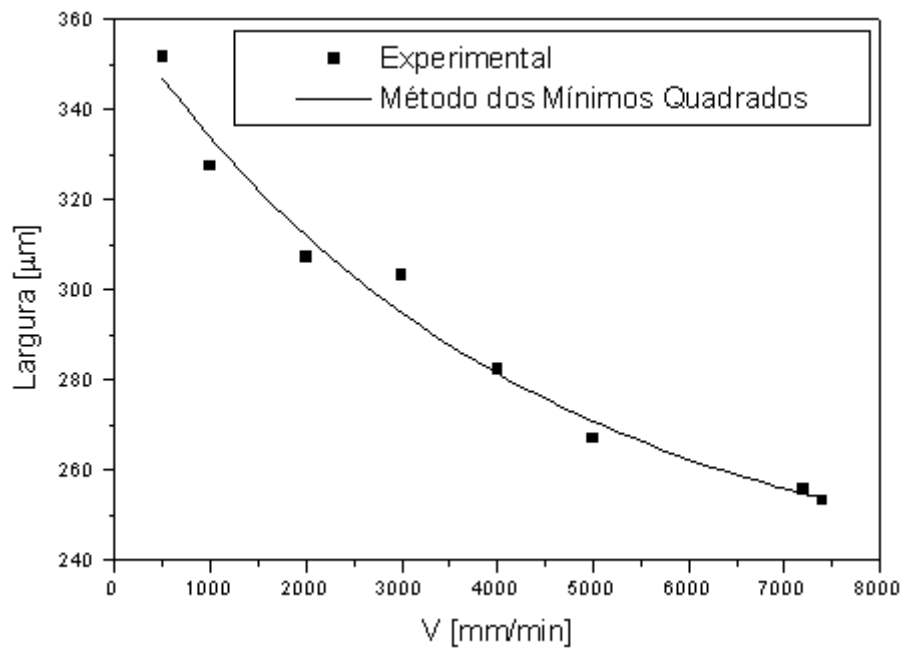


Figura 6 - Variação da largura da zona tratada em função da velocidade de deslocamento do feixe de laser

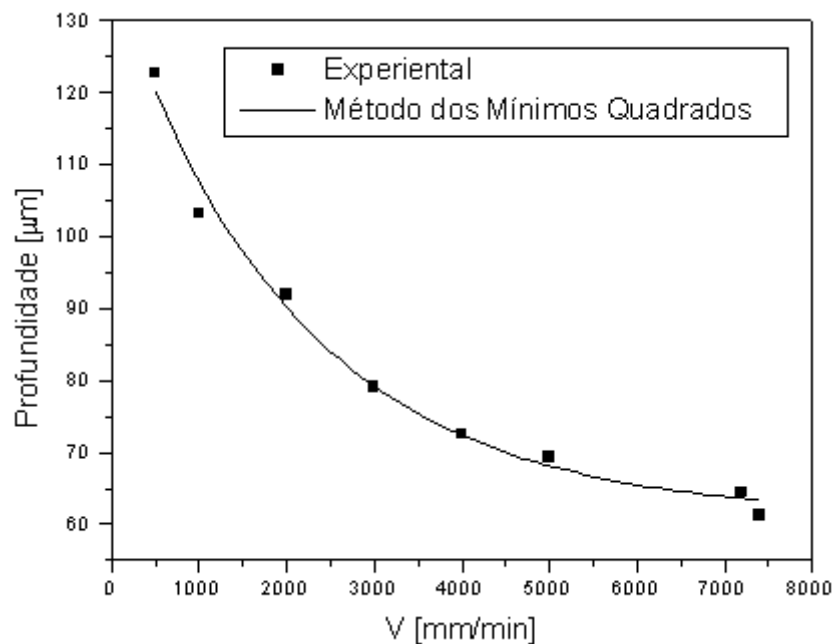


Figura 7 - Variação da profundidade da zona tratada em função da velocidade de deslocamento do feixe de laser

5. CONCLUSÃO

A concordância entre os resultados simulados e experimentais permite concluir que a modelagem matemática do processo de tratamento superficial a laser é uma ferramenta útil na determinação de parâmetros operacionais do laser com o objetivo de se programar a microestrutura, visando propriedades mecânicas pre-estabelecidas. Pode-se concluir ainda que o aumento da velocidade de deslocamento do feixe laser exerce uma influência caracterizada por uma lei exponencial sobre a profundidade e largura da zona tratada.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho. Os autores ainda agradecem o **Laboratório Nacional de Luz Sincrotron** nas pessoas do Sr. Eli Wenzel de Siqueira e Sr. Giancarlo Tosin pelo processamento das amostras por laser.

REFERÊNCIAS

Atkins, M., 1980, "Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels", British Steel Corp., ASM, Metals Park.

Basu, B., 1990, "Numerical Study of Steady State and Transient Laser Melting Problems – I. Characteristics of Flow Field and Heat Transfer", International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 33, n. 6, pp. 1149-1163.

Berjeza, N. A. et al., 1995, "Influence of Temperature Gradient to Solidification Velocity Ratio on the Structure Transformation in Pulsed and CW Laser Surface Treatment", Applied Surface Science, v. 86, pp. 303-309.

Dardel, Y., 1964, "La Transmission de la Chaleur au Cours de la Solidification du Rechauffage e de la Trempe L'acier", *Revue de Metalurgie*, .

Hsu, S. C.; Kou S.; Merrabian, R., 1980, "Rapid Melting and Solidification of a Surface Due to a Stationary Heat Flux" Metallurgical Transactions, v. 29 B, pp. 29-38.

Incropera, F. P.; Dewitt, D. P., 1990, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" John Wiley, New York.

Maier, C. et al., 1992, "Calculation of the Temperature Profile for Laser Treatment of Metallic Samples", Materials Science and Engineering A, v. 150, pp. 271-280.

Monson, P.J.E.; Steen, W.M., 1990, "Comparison of laser hardfacing with conventional process", Surface Engineering, v. 6, n. 3, pp. 185-193.

Ruddle, R. W., 1957, "The Solidification of Castings", 2. ed., Institute of Metals, Series No. 7.

Steen, P.H.; Ehrhard, P.; Schüssler, A., 1994, "Depth of melt-pool and heat-affected zone in laser surface treatments", Metallurgical and Materials Transactions, v. 25A, pp. 427-435.

Yang, L.J. et al., 1994, "The effects of process variables on the case depth of laser transformation hardened AISI 01 tool steel specimens", Materials and Manufacturing Process, v. 9, n. 3, pp. 475-492.

LASER SURFACE TREATMENT OF THE 1045 STEEL - NUMERICAL SIMULATION AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE TREATED ZONE

Evaldo Júlio Ferreira Soares, Maria Aparecida Pinto, Noé Cheung, Maria Clara
Filippini Ierardi, Amauri Garcia.

Department of Materials Engineering - Faculty of Mechanical Engineering
State University of Campinas – UNICAMP - P.O. Box 6122
13083-970 - Campinas - SP - Brazil

e-mail: clara1@fem.unicamp.br

fax: (0xx19) 3289-3722

Abstract.. *Surface treatments, particularly on metallic surfaces, has played an important role in the increase of hardness and wear resistance on surface of components. The different existing processes aim to achieve a microstructural or chemical transformation of the surface layer of the order of millimeters or micrometers, depending on the purpose of the used process. Particularly, the use of laser surface treatments has increased due to a series of advantages not provided by conventional methods. Laser surface treatments are an efficient means of local transformation of the mechanical or chemical properties, without any need of reprocessing the material as a whole, that is, of keeping the original geometrical features of the samples or parts undergoing the treatment. The aim of this paper is to develop a mathematical model in order to simulate a laser surface melting treatment process and a laser transformation hardening process in AISI 1045 steel samples. The simulations performed with the developed model are used in the delimitation of the melted and heat affected zones and compared with experimental results. The influence of the laser beam speed on the resulting microstructure and on the size of the treated region is also investigated.*

Keywords: *laser, surface treatment, mathematical model, microstructure*