

UMA FERRAMENTA NA ABORDAGEM DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DAS TRANSFORMAÇÕES METALÚRGICAS QUE OCORREM NA SOLDAGEM DE AÇOS¹

*Carlos Roberto Xavier²
José Adilson de Castro²
Paulo Roberto Fogaça Ribas²
Alexandre José da Silva²*

Resumo

Devido à importância da soldagem no contexto produtivo e tecnológico, torna-se interessante o estabelecimento de uma ferramenta para avaliar os fenômenos e transformações envolvidas quando da sua utilização. Dessa forma foi desenvolvida uma ferramenta de simulação a partir de dois diferentes enfoques que se complementam. Esses enfoques consistem na simulação computacional e na realização experimental da solda utilizando um aparato automatizado. A simulação computacional utilizou um modelo 3D transiente, resolvido através do método numérico de volumes finitos, a fim de prever a história térmica e a transformação de fases na soldagem de aços. A metodologia foi aplicada no estudo do comportamento de placas de aço AISI-4340 durante a deposição de um cordão de solda através do processo MIG. A temperatura das placas foi monitorada por termopares. Resultados experimentais incluíram a distribuição de fases devido às transformações metalúrgicas sofridas pelo metal base. Observou-se uma boa concordância entre os resultados simulados e os experimentais sob diferentes condições de soldagem.

Palavras-chave: Soldagem, Simulação, Transformação de Fases, Temperatura.

A TOOL IN THE EVALUATION OF THE THERMAL BEHAVIOR AND METALLURGICAL TRANSFORMATIONS THAT OCCUR IN THE STEELS WELDING

Abstract

Due to the importance of welding in the technologic and productive context, it is interesting the development of a simulation tool to evaluate the phenomena and metallurgical transformations taking place during welding processes. The simulation tool was based on two different and complementary approaches. The first approach is based on the numerical simulation of a 3D transient model solved with help of the finite volumes method in order to predict the thermal history and phases transformation. The second approach consists in the experimental accomplishment of the welding process. This methodology was applied to study the behavior of a weld fillet deposited by the MIG process on a AISI-4340 steel plate. The temperature in some plate points was monitored by thermocouples. Experimental results include the measurements of phase fractions distribution due to metallurgical transformations measured in the welded plate. Results showed a good agreement between the simulated and experimental results under different welding conditions.

Key words: Welding; Simulation; Phase transformation; Temperature.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal Fluminense – UFF, Volta Redonda, RJ. – Doutor.*

1 INTRODUÇÃO

Além de sua ampla utilização no campo de fabricação metálica, a soldagem tem sido muito utilizada também em segmentos como manutenção industrial e na aplicação de revestimentos protetores sobre superfícies metálicas com a finalidade de lhes conferir certas características especiais como resistência à corrosão e ao desgaste.

No entanto, durante a soldagem, os ciclos térmicos produzidos pelo movimento da fonte de calor causam mudanças de estado físico e transformações metalúrgicas bem como tensões térmicas transientes e fluxo de metal. Após a soldagem, o metal pode conter descontinuidades físicas devidas à solidificação excessivamente rápida ou microestruturas adversas que são oriundas de um resfriamento não adequado ou distorções e tensões residuais que são conseqüências da existência de deformações plásticas incompatíveis.

A fim de avaliar alguns desses fenômenos, foi realizado neste trabalho um estudo sobre o comportamento térmico e a transformação de fases no metal base durante a soldagem. Para isso foi depositado um cordão de solda sobre placas de aço AISI 4340 através do processo MIG (Metal Inert Gas), sendo que o estudo se dividiu em duas partes que se complementaram. Uma delas foi dedicada à simulação computacional do processo, a qual envolveu modelos matemáticos para a transferência de calor e a transformação de fases utilizando-se um código aberto que foi elaborado a partir da técnica de volumes finitos, e a outra ao desenvolvimento experimental com o objetivo de validar o modelo utilizado. Para o desenvolvimento da parte experimental foi automatizado o processo MIG e efetuado o monitoramento da temperatura do metal base através de termopares durante a soldagem.

1.1 Modelamento e Simulação Computacional na Soldagem

Alguns autores⁽¹⁻⁷⁾ têm usado a simulação computacional como uma importante ferramenta na obtenção de informações detalhadas sobre as características da soldagem e a influência dos parâmetros sobre as mesmas.

De acordo com Zacharia et al.,⁽⁸⁾ a soldagem tem evoluído nas últimas poucas décadas de uma arte empírica para uma atividade incorporando as mais avançadas ferramentas das várias ciências básicas e aplicadas, sendo que um progresso significativo tem sido alcançado no entendimento do processo e sobre os materiais soldados. Em função de um grande número de variáveis envolvidas, o que gera uma grande base de dados experimental, o entendimento e o controle do processo de soldagem tornam-se caros e demorados ou, até mesmo, impraticáveis.

Nesse caso, os autores⁽⁸⁾ afirmaram que um importante recurso é a simulação computacional da soldagem através do estabelecimento de um conjunto de equações representando os processos físicos essenciais do processo, sendo que os resultados obtidos a partir dos modelos fenomenológicos dependem primordialmente da qualidade das relações físicas contidas nos modelos e da fidedignidade dos dados fornecidos aos mesmos.

Ronda e Oliver⁽⁹⁾ propuseram um modelo Termo-Mecânico-Metalúrgico (TMM) para a soldagem, sendo que o modelo numérico do processo consiste de dois princípios que expressam o equilíbrio mecânico e o térmico, ou seja, o balanço de energia interna e o balanço de momento, os quais são complementados pelas leis de evolução das fases. Segundo os autores,⁽⁹⁾ estes princípios foram deduzidos a fim de levar em conta o acoplamento dos efeitos térmicos, mecânicos e metalúrgicos para um corpo termo-inelástico com transformação de fases no estado sólido.

Pode ser encontrada no quadro a seguir a origem das equações diferenciais para as transformações propostas pelos citados autores.

LEI	FRAÇÃO	RELAÇÃO:
Johnson- Mehl -Avrami (transformação difusional)	Ferrita ou Perlita	Taxa de tensão interna, Taxa de temperatura, Tempo
Koistinen-Marburger (estendido para transformação difusional modificado por pressão e tensão)	Martensita	Taxa de tensão equivalente, Taxa de temperatura
Generalização tri-dimensional da estatística termodinâmica	Martensita	Taxa de energia de deformação, Taxa de temperatura

2 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Placas de aço AISI 4340 (Tabela 1) foram confeccionadas nas dimensões de 9,5 x 60 x 220 mm (Figura 1) para receberem o cordão de solda. O consumível utilizado no processo foi um arame eletrodo de um milímetro de diâmetro destinado à soldagem pelo processo MIG e especificado como AWS-ER-70S-6. O gás de proteção utilizado foi uma mistura de 80% de argônio e 20% de CO₂.

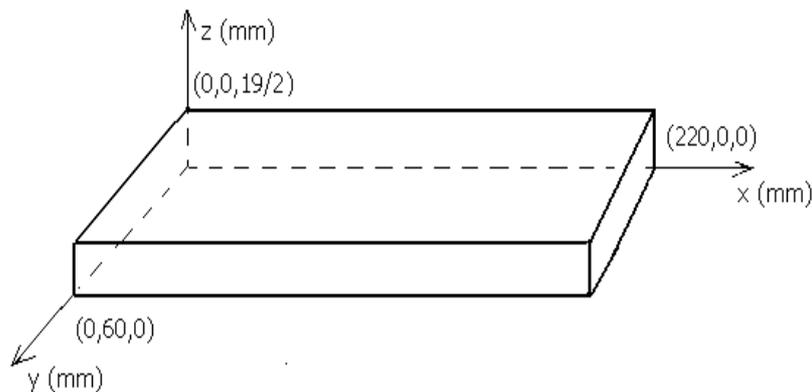


Figura 1 - Dimensões da placa.

Tabela 1 - Análise química do aço (% em peso).

AÇO	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI-4340	0,39	0,69	0,015	0,011	0,26	0,78	2,08	0,25

2.2 Equipamentos

O processo de soldagem foi automatizado, sendo a aquisição dos dados feita através do equipamento marca GOULD modelo DAstar e do equipamento de soldagem marca MERKLE modelo PU-250K. A Figura 2 fornece uma visão geral do sistema.



Figura 2 - Sistema automatizado de soldagem em operação.

2.3 Métodos

As placas de aço receberam um único cordão de solda através do processo MIG (Metal Inert Gás) pulsado, utilizando corrente CC^+ . O cordão ficou localizado na metade da largura das placas, sendo que duas velocidades para um único nível de potência de soldagem foram utilizadas (tabela 3). A direção do cordão foi paralela ao comprimento das placas, tendo o mesmo uma extensão de 200 mm. Dois termopares do tipo K, localizados a 70 mm de cada extremidade das placas de aço, serviram para auxiliar no monitoramento da temperatura durante o experimento. Esses termopares foram inseridos em furos perpendiculares ao eixo longitudinal das placas de aço, a uma distância de 3,5 mm da superfície que recebeu o cordão de solda. A profundidade dos furos na placa coincidiu com a metade da sua largura, fazendo com que a extremidade final dos termopares ficasse localizada exatamente embaixo do cordão de solda. Um aspecto geral do que foi mencionado pode ser visto na Figura 3.



Figura 3 - Placa com o cordão de solda depositado.

3 MODELAGEM DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Na elaboração do modelo para simulação computacional considerou-se o seguinte:

- a) Velocidade de soldagem constante;
- b) Propriedades físicas do metal de adição e dos metais de base como funções da temperatura;
- c) Radiação e convecção de calor uniforme em todas as faces da placa;
- d) Deposição de somente um cordão de solda;
- e) Tocha de soldagem percorrendo a placa;
- f) Distância da tocha de soldagem à placa constante;
- g) Sem difusão de elementos químicos entre o metal de adição e o metal base;
- h) A composição química do metal base permaneceu inalterada.

3.1 Modelamento Térmico

A equação diferencial para transferência de calor é escrita como

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \text{div}[\rho(\vec{u})T] = \text{div}[\Gamma(\text{grad}(T))] + S \quad (1)$$

onde Γ é a difusividade e S o termo fonte.

3.2 Condição Térmica de Contorno

- a) A energia adicionada à placa foi calculada através do produto da corrente pela tensão de soldagem obtidos do procedimento experimental (Tabela 3).
- b) Adotou-se um coeficiente global h para toda a placa, o qual envolveu a perda de calor por convecção e radiação e cujo valor estimado foi de 150 W/m²K.

3.3 Condição Inicial

- a) Temperatura: 25°C em todas as faces da placa;
- b) Concentração: correspondente à composição química do aço (Tabela 1).

3.4 Modelamento da Cinética de Transformação de Fases

Neste trabalho utilizou-se um modelo estendido da lei cinética de Avrami proposto por Reti et al.,⁽¹⁰⁾ a fim de prever a formação de ferrita, perlita e bainita durante o resfriamento contínuo após a austenitização de aços hipoeutetóides de baixa-liga,

$$\frac{dy_i}{dt} = (1 - y_1 - y_2, \dots, y_n) \frac{dB_i t^m}{dt} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

onde

- y_1, y_2, \dots, y_n correspondem às frações volumétricas das fases;
- m é o coeficiente de Avrami;
- $B_i = B_i(T)$ são parâmetros caracterizando as taxas de nucleação e processos de crescimento (obtidos das curvas TTT), os quais são redefinidos para se levar em consideração também o efeito do tamanho de grão austenítico na transformações.

Já a formação da martensita foi considerada como dependente exclusivamente da temperatura, de acordo com a equação de Koistinen-Marburger:⁽¹¹⁾

$$f = 1 - \exp(-0,011(M_s - T)) \quad T \leq M_s \quad (3)$$

onde f corresponde à fração volumétrica da martensita formada e M_s corresponde à temperatura de início de sua transformação (obtida da curva TTT).

3.5 Solução Numérica

A simulação numérica foi baseada no método de volumes finitos utilizando a técnica de malhas adaptativas com o objetivo de rastrear a formação do cordão de solda. O método de volumes finitos foi adaptado para um sistema de coordenadas generalizadas (não ortogonal), o que possibilitou representar de forma precisa a geometria final da placa soldada. A solução das equações discretizadas foi obtida através do método linha por linha descrito em Patankar⁽¹²⁾ e baseado no algoritmo tri-diagonal. A solução das equações foi efetuada de forma acoplada representando as interações dos campos de temperatura e transformações de fases, além de considerar as não linearidades das propriedades dos aços em função da temperatura e das fases presentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 encontram-se as expressões matemáticas referentes às propriedades físicas do aço e do consumível e na Tabela 3 os valores dos parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho.

Tabela 2 - Propriedades físicas do aço e do consumível.⁽¹³⁾

Material	Calor específico (J/kgK)	Condutividade térmica (W/mK)
Aço AISI-4340	$579,2 - 1,32T + 0,0055T^2 - 4,72 \times 10^{-6}T^3$	$31,3 + 0,04T - 1,16 \times 10^{-4}T^2 + 6,9 \times 10^{-8}T$
Consumível AWS-ER-70S-6	$[411,49 - 2581]/[1 + \exp(T - 1140,7)/313] + 2581$	$[63,2 - 15,7]/[1 + \exp(T - 740,2)/260] + 15,7$

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem utilizados no trabalho.

Velocidade (cm/min)	Potência (W)	Aporte Térmico (J/cm)	Rendimento (%)
35	3529	6050	80
14	3529	15124	80

4.1 Evolução Térmica

Nas Figuras 4 e 5 é apresentada a evolução da temperatura da placa nas duas velocidades de soldagem utilizadas, ou seja, 35 e 14 cm/min respectivamente (Tabela 3). Nota-se uma boa concordância entre as temperaturas medidas com o auxílio dos termopares e os valores calculados, ocorrendo um ligeiro desvio em temperaturas mais elevadas no caso da velocidade de 14 cm/min.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os resultados da simulação computacional referentes à formação do cordão de solda ao longo do tempo e às respectivas distribuições 3D de temperatura na placa nas velocidades de soldagem de 35 e 14 cm/min. Conforme era esperado foram constatadas, devido ao maior aporte térmico, temperaturas mais elevadas para a menor velocidade de soldagem ao se manterem constantes os demais parâmetros do processo.

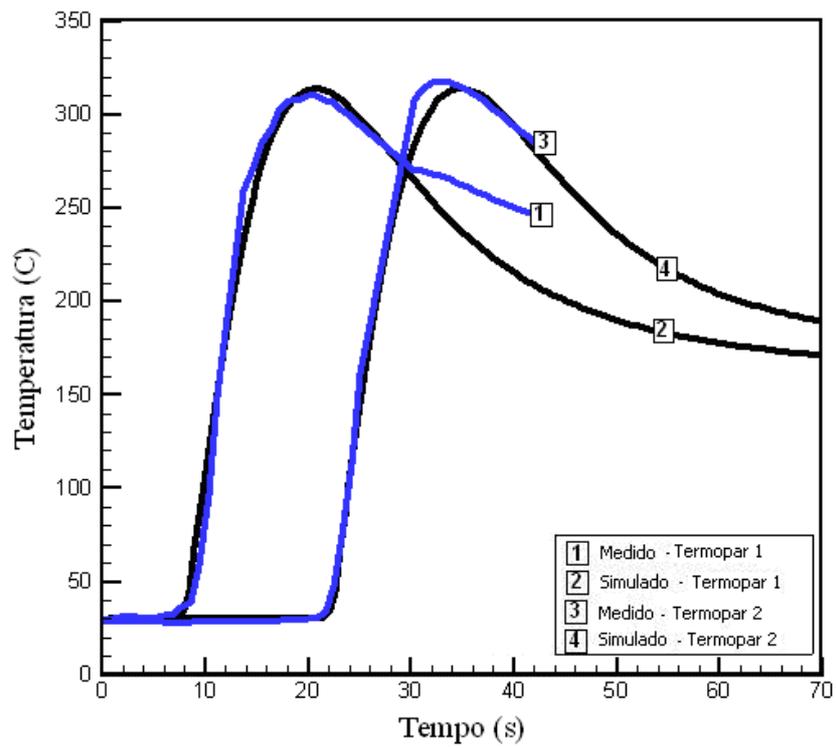


Figura 4 - Temperatura calculada e medida ($V = 35 \text{ cm/min}$).

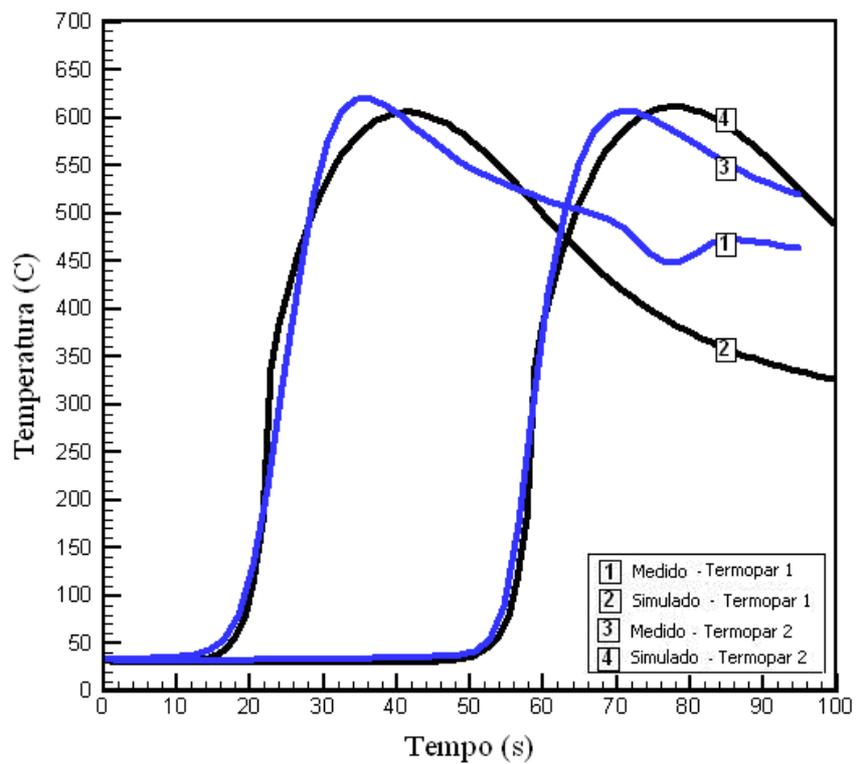


Figura 5 - Temperatura calculada e medida ($V = 14 \text{ cm/min}$).

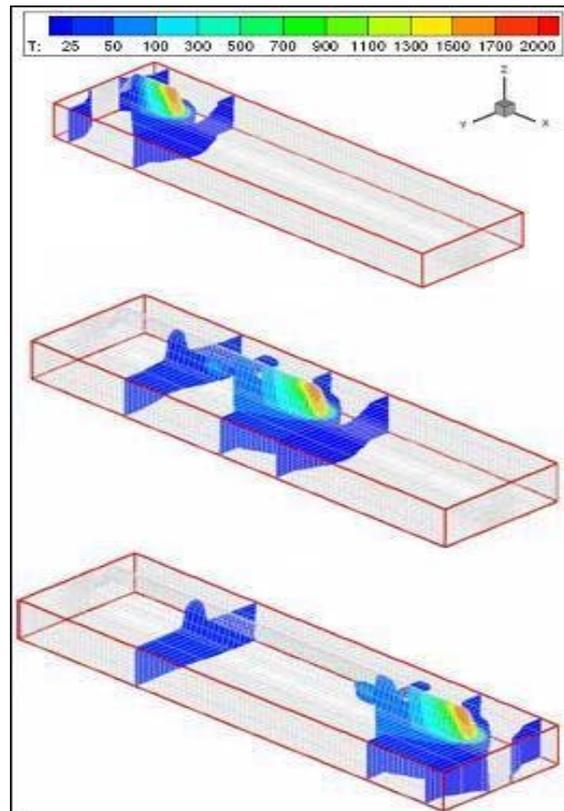


Figura 6 - Resultados da simulação computacional da formação do cordão de solda e distribuição de temperatura ($V = 35 \text{ cm/min}$).

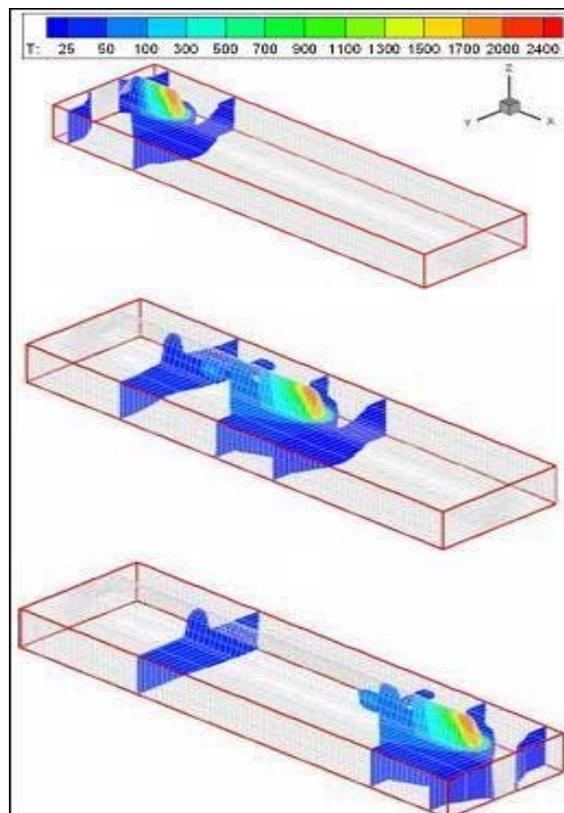


Figura 7 - Resultados da simulação computacional da formação do cordão de solda e distribuição de temperatura ($V = 14 \text{ cm/min}$).

4.2 Transformação de Fases

Somente dois constituintes, bainita e martensita, foram observados na zona afetada pelo calor (ZAC) do metal base e para as duas velocidades de soldagem utilizadas nesse trabalho. Nas micrografias, figuras 8.a e 9.a, a bainita apresenta-se com uma tonalidade marrom tendendo para escura enquanto que a martensita com uma tonalidade clara. As Figuras 8 e 8.a correspondem, respectivamente, ao resultado geral da simulação computacional para a fração volumétrica de bainita formada e uma micrografia representativa da ZAC do metal base na velocidade de soldagem de 14 cm/min.

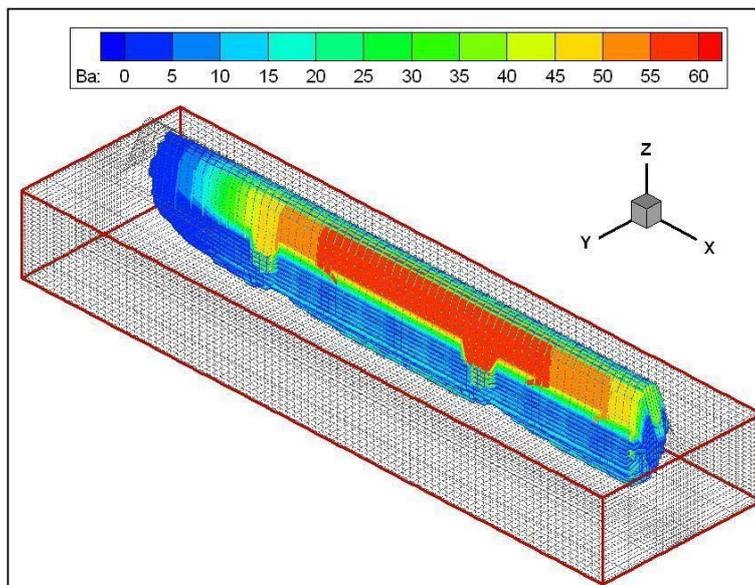


Figura 8 - Simulação computacional mostrando a fração volumétrica de bainita após a deposição do cordão de solda ($V = 14$ cm/min)

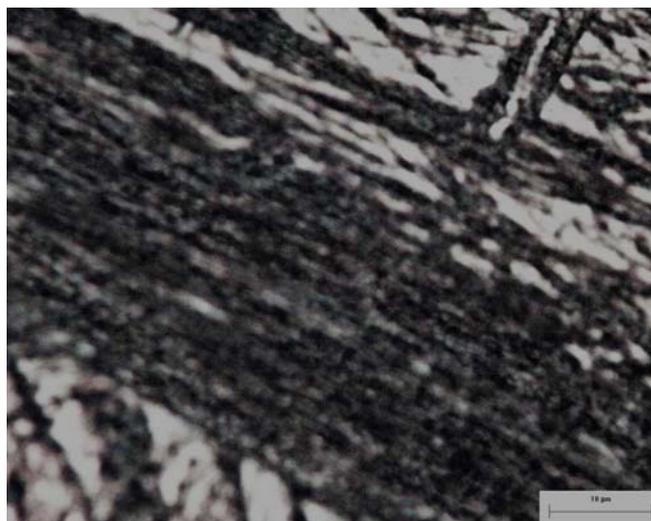


Figura 8.a - Micrografia representativa da ZAC ($V = 14$ cm/min)

As Figuras 9 e 9.a correspondem, respectivamente, à simulação computacional da fração volumétrica da martensita formada e à micrografia representativa da ZAC do metal base na velocidade de soldagem de 35 cm/min.

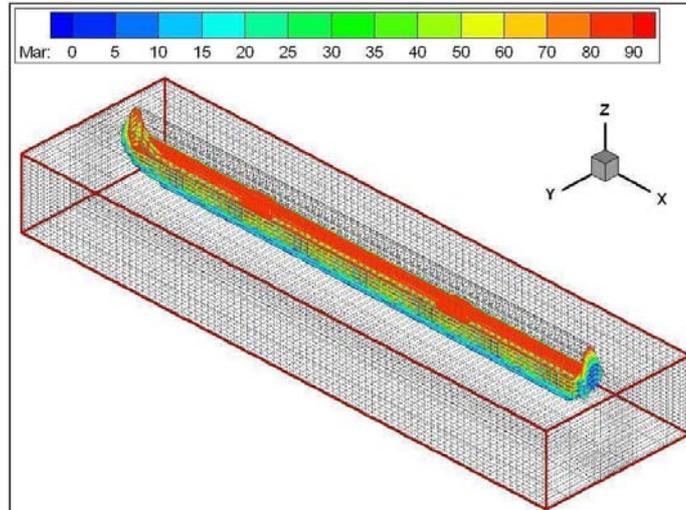


Figura 9 - Simulação computacional mostrando a fração volumétrica de martensita após a deposição do cordão de solda ($V = 35 \text{ cm/min}$)

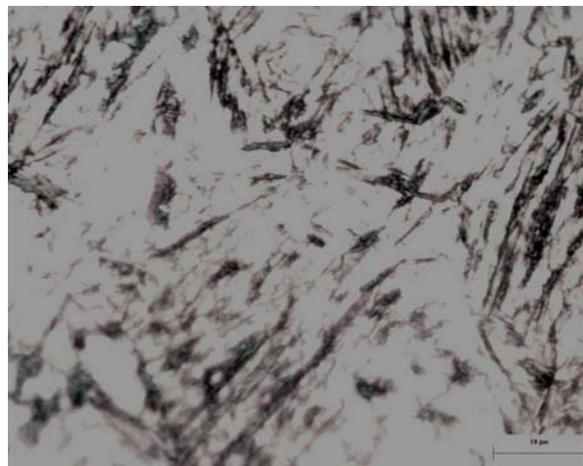


Figura 9.a - Micrografia representativa da ZAC ($V = 35 \text{ cm/min}$)

Os resultados das Figuras 9 e 10 indicam uma diminuição da fração de bainita formada após a deposição do cordão de solda, com conseqüente aumento na fração de martensita ao se aumentar a velocidade de soldagem. Este resultado está de acordo com os efeitos de uma velocidade de soldagem mais alta sobre as taxas de resfriamento, a qual, ao se elevar com o aumento da velocidade, favorece a formação da martensita em detrimento da bainita.

5 CONCLUSÃO

Houve uma boa concordância entre os resultados medidos e simulados ao se comparar as curvas características de evolução da temperatura durante a deposição de um cordão de solda em uma placa de aço, demonstrando a influência da velocidade de soldagem sobre os picos de temperatura, os quais afetam a distribuição desta na placa soldada.

Velocidades de soldagem mais altas conduziram a uma maior fração de martensita formada quando comparada à bainita, devido às maiores taxas de resfriamento experimentadas pelo metal base. Estes resultados se confirmaram de forma qualitativa e quantitativa ao se comparar os resultados simulados com os obtidos experimentalmente.

Agradecimentos

À FAPERJ e à Universidade Federal Fluminense, pelo apoio financeiro e a infra-estrutura necessária para a realização deste trabalho. À ABM por tornar possível a divulgação do mesmo.

REFERÊNCIAS

- 1 TALJAT, B., RADAKRISHMAN, B., ZACHARIA, T. Numerical analysis of GTA welding process with emphasis on post-solidification phase transformation effects on residual stresses. **Materials Science and Engineering A**, v. A246, p. 45-54, May 1998.
- 2 SILVA, R. M. B., PACHECO, P. M. C. L. Modeling residual stresses in welded steel plates using a constitutive model with phase transformation. In: 18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005, Ouro Preto, **Proceedings of COBEM 2005**.
- 3 YANG, Q. X., Yao, M., PARK, J. K. Numerical simulation and measurements of temperature and stress field in medium-high carbon steel specimen after hard-face-welding. **Computational Materials Science**, v. 29, p. 37-42, Jan. 2004.
- 4 TSIRKAS, S. A., PAPANIKOS, P., KERMANIDIS, TH. Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 134, p. 59-69, Mar. 2003.
- 5 BANG, I. W., SON, Y. P., OH, K. H., KIM, Y. P., KIM, W. S. Numerical simulation of sleeve repair welding of in-service gas pipelines. **Welding Journal**, v. 81, n. 12, p. 273-282, Dec. 2002.
- 6 ELMER, J. W., PALMER, T. A., ZANG, W., WOOD, B., DEBROY, T. Kinetic modeling of phase transformations occurring in the HAZ of C-Mn steel welds based on direct observations. **Acta Materialia**, v. 51, n. 12, p. 3333-3349, July 2003.
- 7 ZHANG, W., ELMER, J. W., DEBROY, T. Modeling and real time mapping of phases during GTA welding of 1005 steel. **Materials Science and Engineering A**, v. A333, p. 320-335, Aug. 2002.
- 8 ZACHARIA, T., VITEK, J. M., GOLDAK, J. A., DEBROY, T. A., RAPPAS, M., BHADESHIA, H. K. D. H. Modeling of Fundamental Phenomena in Welds. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 3, n. 2, p. 265-288, Mar. 1995.
- 9 RONDA, J., OLIVIER, G. J. Consistent Thermo-Mechano-Metallurgical Model of Welded Steel With Unified Approach to Derivation of Phase Evolution Laws and Transformation-Induced Plasticity. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 189, n. 2, p. 361-417, Sep. 2000.
- 10 RETI, T., FRIED, Z., FELDE, I. Computer Simulation of Steel Quenching Process Using a Multi-Phase Transformation Model. **Computational Materials Science**, v. 22, p. 261-278, June 2001.
- 11 AHLSTRÖM J., KARLSSON, B. Modelling of Heat Conduction and Phase Transformations During Sliding of Railway Wheels. **Wear**, v. 253, p. 291-300, July 2002.
- 12 PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, USA, McGraw-Hill, 1979.
- 13 SMITHELLS, C. J., **Metals Reference Book**, U.K, Fifth Edition, Butterworths, 1976.