

A UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA NA COMPARAÇÃO DA SOLDABILIDADE ENTRE OS AÇOS AISI-1045 E AISI-4340¹

*Carlos Roberto Xavier²
José Adilson de Castro³
Paulo Roberto Fogaça Ribas³
Alexandre José da Silva³*

Resumo

Neste trabalho foi utilizado um modelo tridimensional transiente baseado no método numérico dos volumes finitos a fim de simular o comportamento térmico e a evolução microestrutural dos aços AISI-1045 e AISI-4340 durante a soldagem. A solução das equações de energia e da cinética de formação de fases foi efetuada de maneira acoplada, levando-se em consideração as não-linearidades presentes. Foi simulado o processo de soldagem MIG e o método utilizado foi o da deposição de um cordão de solda sobre placas dos aços AISI-1045 e AISI-4340. Os parâmetros de soldagem utilizados na simulação foram obtidos do procedimento experimental conduzido paralelamente e que serviu ainda para a validação do modelo numérico utilizado. Os resultados simulados e experimentais aqui apresentados correspondem à avaliação efetuada utilizando-se uma única velocidade e potência de soldagem, sendo que os mesmos demonstraram uma boa concordância entre si.

Palavras-chave: Soldagem MIG; Simulação numérica; Microestrutura, Temperatura.

THE USE OF THE NUMERICAL SIMULATION AT THE WELDABILITY COMPARISON BETWEEN AISI-1045 AND AISI-4340 STEELS

Abstract

In this work a three-dimensional and transient model based on finite volume method was used to simulate the thermal behavior and the microstructural evolution during the welding of the AISI-1045 and AISI-4340 steels. The solutions of the energy and phase transformations equations were coupled in order to taking into consideration the non-linearity of properties, boundary conditions and influence of phase transformations into the thermophysical properties. It was simulated the MIG welding process with deposition of a weld single fillet on AISI-1045 and AISI-4340 steel plates. Welding parameters used in the model were obtained from experimental procedures. A single welding speed and power was evaluated in this study and the experimental results were used to validate the present mathematical model. A good agreement was observed between experimental and simulated results.

Key words: MIG welding process; Numerical simulation; Microstructure; Temperature.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Universidade Federal Fluminense / Centro Universitário de Volta Redonda (UNIFOA) – Doutor.*

³ *Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica / Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ – Doutor.*

1 INTRODUÇÃO

Vários segmentos da engenharia empregam a soldagem por fusão como processo de fabricação, podendo-se citar dentre eles o aeroespacial, o automotivo e o naval. Dentre os processos de soldagem por fusão temos o MIG (*Metal Inert Gas*), onde uma fonte de calor transiente dá origem a uma zona de fusão localizada, levando o metal ao aquecimento, fusão e solidificação. Entretanto, os ciclos térmicos produzidos pelo movimento da fonte de calor durante a soldagem 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, ainda, distorções e tensões residuais que são conseqüências da existência de deformações plásticas incompatíveis.

Devido à importância da soldagem no contexto tecnológico atual, muitas pesquisas têm sido realizadas objetivando um melhor entendimento dos complexos fenômenos envolvidos durante a sua realização a fim de se prever, principalmente, as propriedades do material e, por conseguinte, o seu comportamento quando em trabalho. Dessa forma, novas técnicas e ferramentas têm sido vislumbradas, podendo-se citar entre elas o modelamento e a simulação computacional⁽¹⁻⁹⁾ dos fenômenos envolvidos na soldagem e as conseqüentes transformações mecânicas e metalúrgicas a que são submetidas as regiões envolvidas e afetadas pela mesma.

Neste trabalho utilizou-se a simulação numérica a fim de estudar e comparar o comportamento térmico e as transformações metalúrgicas que ocorrem durante a soldagem dos aços AISI-1045 e AISI-4340. O objetivo foi o de levantar informações sobre a influência dos parâmetros de soldagem sobre a soldabilidade dos aços AISI-4340 e AISI-1045 com o objetivo de obter conjuntos metálicos soldados daqueles aços com propriedades adequadas para aplicação.

2 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Placas dos aços AISI-1045 e 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.

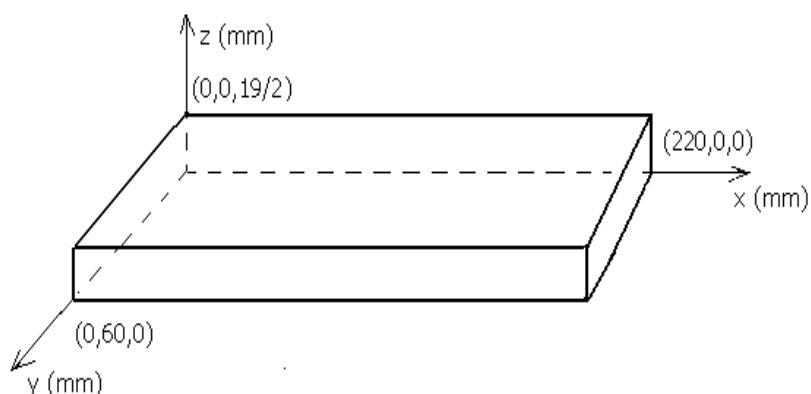


Figura 1. Dimensões da placa.

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

AÇO	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI-1045	0,42	0,6	0,011	0,009	0,179	-	-	-
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 Gas*) pulsado, utilizando corrente CC^+ . O cordão ficou localizado na metade da largura das placas, sendo que uma única velocidade e 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 (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 $150 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3.3 Condição Inicial

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

3.4 Modelamento da Cinética de Transformação de Fases

Neste trabalho utilizou-se o 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 dos aços utilizados no trabalho 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-1045	$546,2 - 0,882T + 0,0038T^2 - 3,3 \times 10^{-6}T^3$	$51,1 + 0,01T - 1,18 \times 10^{-4}T^2 + 8,3 \times 10^{-8}T^3$
Aço AISI-4340	$579,2 - 1,32T + 0,0055T^2 - 4,72 \times 10^{-6}T^3$	$31,3 + 0,04T - 1,16 \times 10^{-4}T^2 + 6,9 \times 10^{-8}T^3$
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.

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

4.1 Evolução Térmica

Pode ser vista, respectivamente, nas Figuras 4 e 5 a evolução da temperatura das placas correspondentes aos aços AISI-1045 e AISI-4340 na velocidade de soldagem utilizada neste trabalho (Tabela 3). Nota-se uma boa concordância entre as temperaturas medidas com o auxílio dos termopares e os valores simulados.

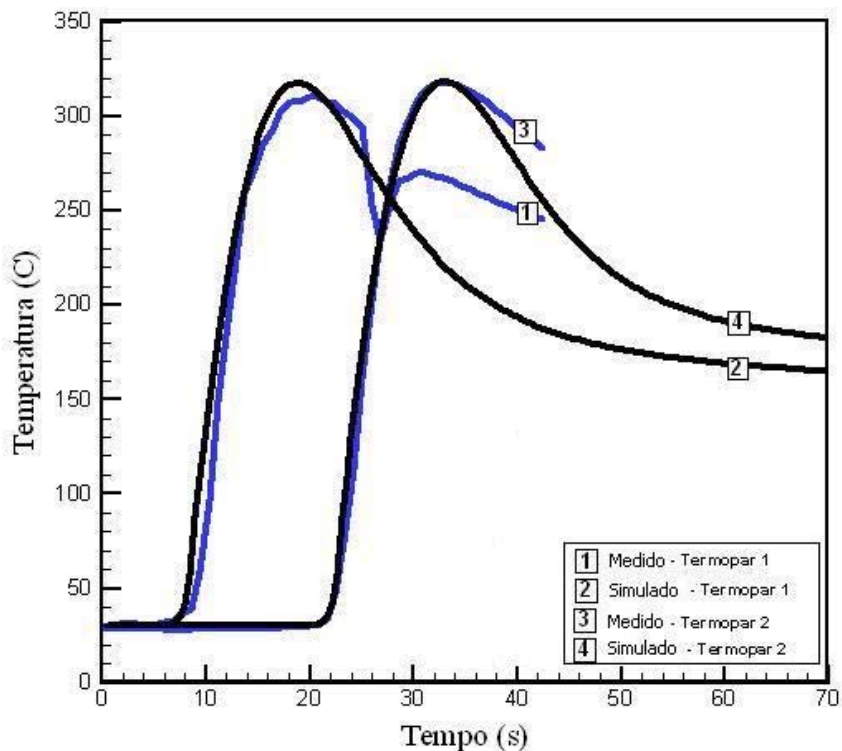


Figura 4. Temperatura simulada e medida (aço AISI-1045 / $v = 35$ cm/min).

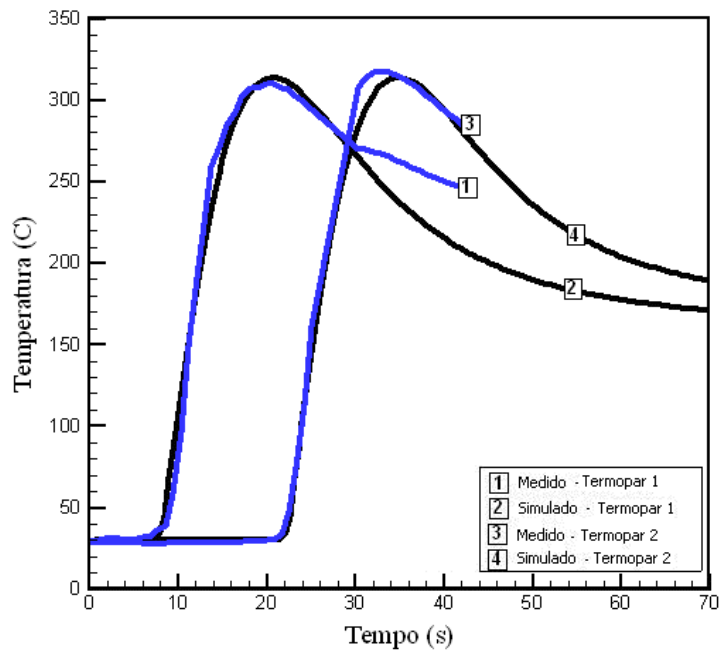


Figura 5. Temperatura simulada e medida (aço AISI-4340 / $v = 35$ cm/min).

Na Figura 6 são apresentados os resultados da simulação numérica referentes à formação do cordão de solda ao longo do tempo e às respectivas distribuições 3D de temperatura nas placas.

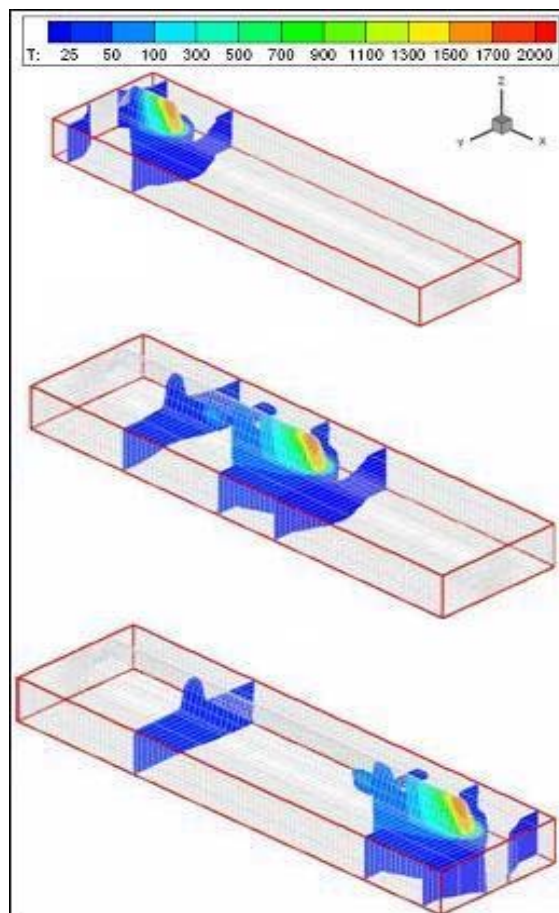


Figura 6. Simulação numérica da formação do cordão de solda e da distribuição de temperatura ($v = 35$ cm/min).

A Figura 7 corresponde ao perfil da solda que é representativa dos aços AISI-1045 e AISI-4340 e serve para indicar as dimensões do cordão de solda (reforço) e das Zonas Afetada pelo Calor (ZAC) e Fundida (ZF). Na Tabela 4 encontram-se os resultados referentes às medidas efetuadas e da simulação numérica correspondentes ao meio da placa soldada para aquelas dimensões.



Figura 7. Perfil da solda.

Tabela 4. Dimensões da solda.

Condição	Dimensões (mm)					
	Aço AISI-1045			Aço AISI-4340		
	A (reforço)	B (ZF)	C (ZAC)	A (reforço)	B (ZF)	C (ZAC)
Experimental	4,00	1,08	2,60	3,90	1,01	2,55
Simulado	3,90	0,90	2,80	3,80	0,90	2,90
(%)	2,50	20	7,7	2,63	12,2	13,7

4.2 Evolução Microestrutural

As microestruturas resultantes do procedimento de soldagem foram avaliadas de forma qualitativa e quantitativa e comparadas com os resultados obtidos na simulação numérica.

Foi avaliada a fração volumétrica dos constituintes formados na ZAC em uma determinada coordenada utilizando-se para isso um analisador de perfil (para a determinação da coordenada espacial) e um analisador de imagens (para a avaliação da fração volumétrica dos constituintes). As Figuras 8 e 9 correspondem às micrografias obtidas no meio das chapas soldadas, em localizações idênticas na ZAC, e são representativas das transformações sofridas pelos aços AISI-1045 e AISI-4340 respectivamente. Pode se observar, na Figura 8, uma microestrutura composta de martensita e de um agregado de ferrita e cementita, enquanto que a Figura 9 apresenta uma microestrutura composta basicamente por martensita com alguns traços de bainita.

Os resultados obtidos na simulação numérica apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais, estando dispostos e podendo ser comparados através da Tabela 5.

Tabela 5. Fração dos constituintes medida (med.) e simulada (sim).

Aço	Constituintes (%)						
	Bainita		Martensita		Agregado Ferrita + Cementita		(% médio)
	med	sim	med	sim	med	sim	
AISI-1045	-	-	59	54	41	46	10,7
AISI-4340	9	6	91	94	-	-	26,6

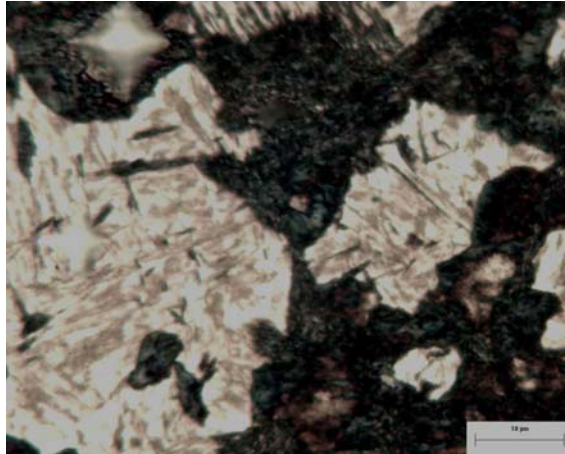


Figura 8. Micrografia representativa do Aço AISI-1045.

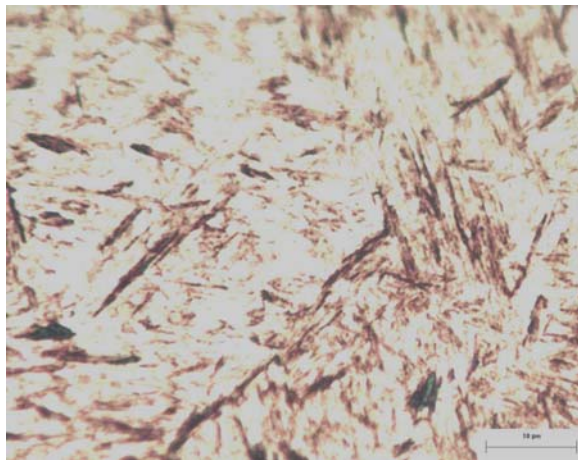


Figura 9. Micrografia representativa do aço AISI-4340.

A Figura 10 corresponde à simulação numérica fração volumétrica de martensita formada no aço AISI-4340 na velocidade de soldagem utilizada neste trabalho (Tabela 3)

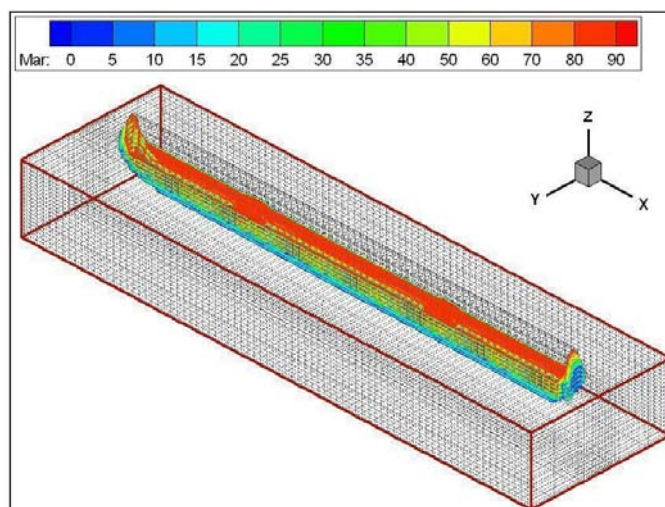


Figura 10. Simulação numérica da fração volumétrica de martensita ($v = 35$ cm/min)

Os resultados apresentados mostraram, para as mesmas condições de soldagem, que o aço AISI-4340 teve sua microestrutura praticamente transformada em martensita na ZAC enquanto que o aço AISI-1045 sofreu uma transformação apenas parcial. Isto está de acordo com a maior temperabilidade do aço AISI-4340 e pôde ser comprovado também na simulação numérica, tendo o modelo se comportado de maneira satisfatória com os resultados experimentais.

5 CONCLUSÃO

O ciclo térmico da soldagem e a geometria e dimensões da zona afetada pelo calor (ZAC) e da zona fundida (ZF) serviram para avaliar o comportamento térmico dos aços AISI-4340 e AISI-1045, tendo apresentado pouca diferença entre si. As microestruturas resultantes da soldagem foram avaliadas e comparadas para os dois aços em uma mesma condição de soldagem e apresentaram diferenças significativas, o que irá influenciar no comportamento dos materiais quando soldados. Tanto os resultados simulados quanto experimentais apresentaram o mesmo comportamento e um bom nível de concordância.

Agradecimentos

À FAPERJ, ao CNPq, à Universidade Federal Fluminense e ao Centro Universitário de Volta Redonda (UniFoa) 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., BHADSHIA, 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 AHLSTRÖN 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.