

MODELAMENTO E SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO TÉRMICA DURANTE A SOLDAGEM MIG PULSADA

Carlos Roberto Xavier – D.C.

Universidade Federal Fluminense – EEIMVR Av. dos Trabalhadores, 420 – Vila Santa Cecília, 27255-125 – Volta Redonda – RJ. xavier@metal.eeimvr.uff.br

José Adilson de Castro – Ph.D.

Universidade Federal Fluminense – EEIMVR Av. dos Trabalhadores, 420 – Vila Santa Cecília, 27255-125 – Volta Redonda – RJ. adilson@metal.eeimvr.uff.br

Paulo Roberto Fogaça Ribas - Ph.D.

Universidade Federal Fluminense – EEIMVR Av. dos Trabalhadores, 420 – Vila Santa Cecília, 27255-125 – Volta Redonda – RJ. ribas@metal.eeimvr.uff.br

Alexandre José da Silva – Dr.-Ing.

Universidade Federal Fluminense – EEIMVR Av. dos Trabalhadores, 420 – Vila Santa Cecília, 27255-125 – Volta Redonda – RJ. ajs@metal.eeimvr.uff.br

Resumo. Neste trabalho, utilizando-se um código computacional baseado no método numérico de volumes finitos, foi simulada a evolução térmica durante a soldagem MIG pulsada. Avaliou-se a influência da energia de soldagem sobre o perfil de temperatura e as características da zona fundida (ZF), da zona afetada pelo calor (ZAC) e do cordão de solda. Simulou-se uma situação onde somente um cordão de solda foi depositado sobre a superfície de placas de aço, alterando-se a velocidade de soldagem, enquanto que os demais parâmetros foram mantidos fixos. Experimentos foram conduzidos paralelamente com o objetivo de se confrontar os resultados obtidos na simulação, obtendo-se uma boa concordância entre os mesmos.

Palavras-chave: Modelamento, Simulação, Soldagem MIG, Evolução Térmica.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de fabricação amplamente utilizado em muitos segmentos da engenharia, podendo-se citar como exemplos a sua aplicação pelas indústrias aeroespacial, automotiva e naval. No entanto, as várias transformações no estado sólido que ocorrem durante o resfriamento afetam as propriedades do aço. O rápido aquecimento provocado pelo contato da fonte de calor com o metal leva à fusão e a formação da poça de solda, a qual tem influência sobre os campos de temperatura e os ciclos térmicos.

A evolução térmica está relacionada à variação de temperatura para um material específico e procedimento de soldagem, como uma função do tempo e distância do centro do cordão de solda. Desta forma, a evolução térmica envolve tanto a distribuição térmica quanto o ciclo térmico de soldagem.

A distribuição térmica da soldagem é representada pela máxima temperatura atingida em cada ponto como uma função da distância deste ponto em relação ao centro do cordão de solda, estando associado basicamente à extensão da ZAC enquanto que o ciclo térmico de soldagem é o local geométrico dos pontos onde as mudanças de temperatura ocorrem como uma função do tempo em uma distância fixa do centro do cordão de solda.

Os ciclos térmicos produzidos pelo movimento da fonte de calor durante a fusão por soldagem causam mudanças de estado físico, transformação de fases, tensões térmicas transientes e movimento de metal. Após a soldagem, o produto obtido pode conter descontinuidades físicas que são devidas à solidificação excessivamente rápida, ou microestruturas adversas devidas a um resfriamento inadequado ou tensões e distorções residuais devidas à existência de deformações plásticas incompatíveis.

Assim sendo, novas técnicas de investigação têm sido exploradas, como o uso da simulação computacional⁽¹⁻⁵⁾ a fim de avaliar os fenômenos e as transformações que ocorrem na soldagem visando prever o comportamento do conjunto soldado.

2. MATERIAIS 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 1 mm 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.

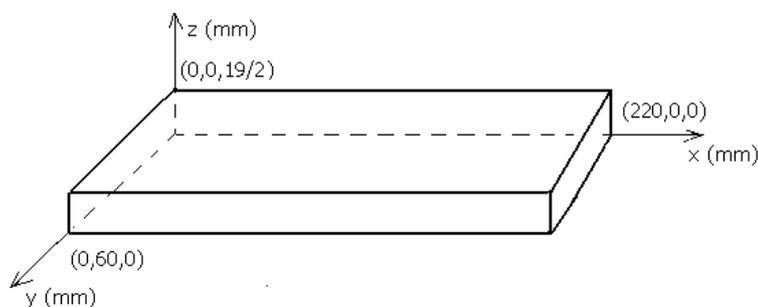


Figura 1. Dimensões da placa.

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 que a aquisição dos dados foi obtida através do equipamento marca GOULD modelo DAsTar (temperatura) e do equipamento de soldagem marca MERKLE modelo PU-250K (corrente e tensão). 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 duas velocidades para um único nível de potência de soldagem foram utilizados (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 monitorar a evolução 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

3.1. Apresentação do Problema

No processo de deposição do cordão de solda em uma placa metálica, os fenômenos físico-químicos presentes são: a) Transferência de calor por radiação, convecção e condução; b) Transporte de massa; c) Aquecimento, fusão, resfriamento e solidificação.

3.2. Abordagem do Problema e Hipóteses Simplificadoras

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

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

3.3. Formulação Matemática

3.3.1. A Equação Diferencial para Transferência de Calor

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.

3.3.2. Condição Térmica de Contorno

- A energia adicionada à placa foi calculada através do produto da corrente pela tensão de soldagem obtidos do procedimento experimental (Tabela 3).
- 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 $150 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3.3.3. Condição Inicial

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

3.3.4. Solução Numérica

Conforme mencionado, o método numérico utilizado no presente trabalho foi o de volumes finitos, o qual 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 da equação discretizada foi obtida através do método linha por linha baseado no algoritmo tri-diagonal descrito em Patankar⁽⁶⁾. Utilizou-se, também, a técnica de malhas adaptativas com o objetivo de rastrear a formação do cordão de solda, sendo que alguns trabalhos⁽⁷⁻⁹⁾ trazem maiores detalhes da metodologia aqui empregada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pode-se encontrar na Tabela 2 as expressões das propriedades físicas do aço e do consumível e na Tabela 3 o valor dos parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho.

Tabela 2. Propriedades físicas do aço e do consumível⁽¹⁰⁾.

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

Na Figura 4, as imagens identificadas como amostra 1 (retirada próxima ao termopar 1), amostra 2 (retirada próxima ao termopar 2) e amostra 3 (retirada no meio da chapa) correspondem a fotos retiradas das placas soldadas, enquanto que a imagem identificada como simulado corresponde ao resultado gráfico da simulação, a qual é representativa do processo.

As letras que identificam uma determinada característica da solda na Figura 4, e que serão denominadas posteriormente como cotas correspondem a:

A = Reforço do Cordão; B = Penetração; C = Profundidade da ZAC; D = Largura da ZF; E = Largura do Cordão; F = Largura da ZAC.

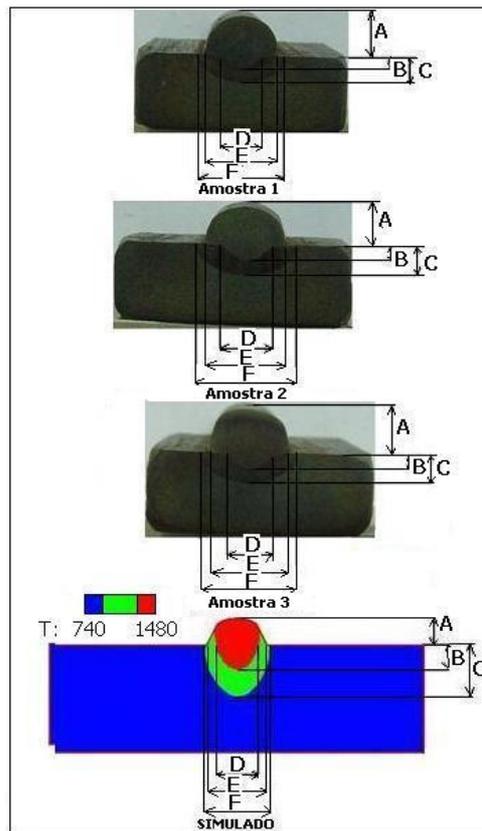


Figura 4. Cordão de solda, zona afetada pelo calor (ZAC) e zona fundida (ZF).

4.1. Velocidade de Soldagem: 35 cm/min

Pode ser vista na Figura 5 a evolução da temperatura da placa medida experimentalmente com o auxílio dos termopares e a simulada. Comparando-se os dois métodos de medição pode-se concluir que houve uma boa concordância entre os mesmos.

As medidas experimentais e simuladas correspondentes ao cordão de solda, à ZAC e à ZF (figura 4) podem ser encontradas na Tabela 4. Comparando-se os dados da Tabela 4 conclui-se que houve uma boa aproximação entre os valores simulados e os medidos experimentalmente.

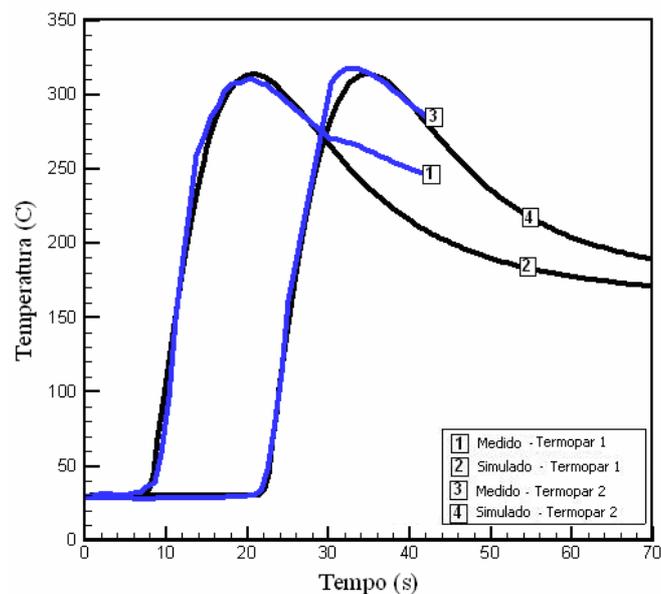


Figura 5. Temperatura simulada e medida experimentalmente (Vel.: 35 cm/min / Pot.: 3529 W).

Tabela 4. Valores das cotas especificadas na figura 4 (Vel.: 35 cm/min/Pot.: 3529 W).

POSIÇÃO		COTAS (mm)					
		A	B	C	D	E	F
Amostra 1	medido	3,90	1,14	2,96	4,60	7,80	9,40
	simulado	3,80	0,90	2,90	4,20	8,50	8,50
Amostra 2	medido	3,84	1,30	2,80	4,90	8,30	9,80
	simulado	3,80	0,90	2,90	4,20	8,50	8,50
Amostra 3	medido	3,90	1,01	2,55	5,30	8,0	9,30
	simulado	3,80	0,90	2,90	4,20	8,50	8,50

4.2. Velocidade de Soldagem: 14 cm/min

Pode ser vista na Figura 6 a evolução da temperatura da placa medida experimentalmente com o auxílio dos termopares e a simulada. Comparando-se os dois métodos de medição pode-se concluir que houve novamente uma boa concordância entre os mesmos, principalmente em temperaturas mais baixas, apresentando um ligeiro desvio em temperaturas mais elevadas.

As medidas experimentais e simuladas correspondentes ao cordão de solda, à ZAC e à ZF (Figura 4) podem ser encontradas na Tabela 5. Ao se comparar os dados da Tabela 5 conclui-se que houve uma boa aproximação entre os valores simulados e os medidos experimentalmente.

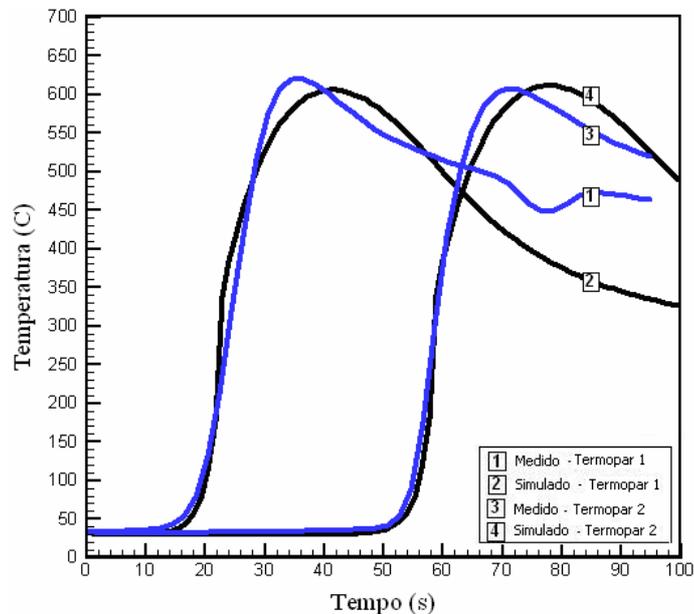


Figura 6. Temperatura simulada e medida experimentalmente (Vel.: 14 cm/min / Pot.: 3529 W).

Tabela 5. Valores das cotas especificadas na figura 4 (Vel.: 14 cm/min / Pot.: 3529 W).

POSIÇÃO		COTAS (mm)					
		A	B	C	D	E	F
Amostra 1	medido	6,22	2,10	5,90	6,28	10,83	13,80
	simulado	6,10	1,60	5,50	5,90	12,0	12,0
Amostra 2	medido	6,10	2,05	6,0	5,90	10,87	14,30
	simulado	6,10	1,60	5,50	5,90	12,0	12,0
Amostra 3	medido	6,20	1,63	6,10	5,84	10,57	13,6
	simulado	6,10	1,60	5,50	5,90	12,0	12,0

4.3. Comparação entre as Velocidades de Soldagem

As Figuras 7 e 8 correspondem aos resultados da simulação computacional referentes à formação do cordão de solda e à distribuição de temperatura durante o processo para as duas velocidades de soldagem exploradas neste trabalho (Tabela 3). Conforme esperado, uma menor

velocidade de soldagem acarretou em temperaturas mais elevadas devido ao maior aporte térmico durante a mesma (Tabela 3).

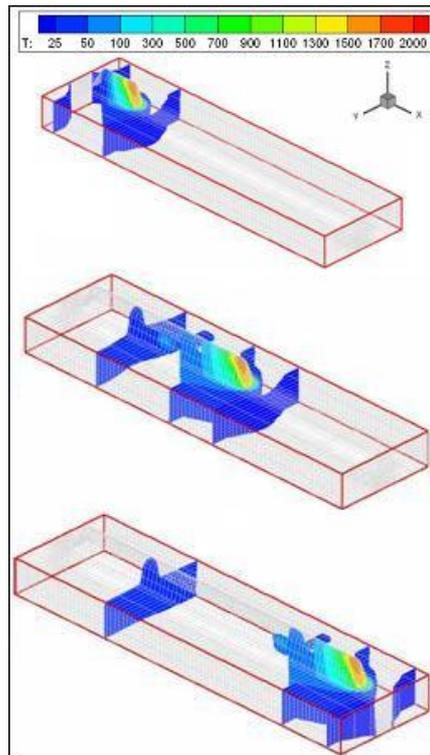


Figura 7. Formação do cordão de solda e distribuição de temperatura (Vel.: 35 cm/min).

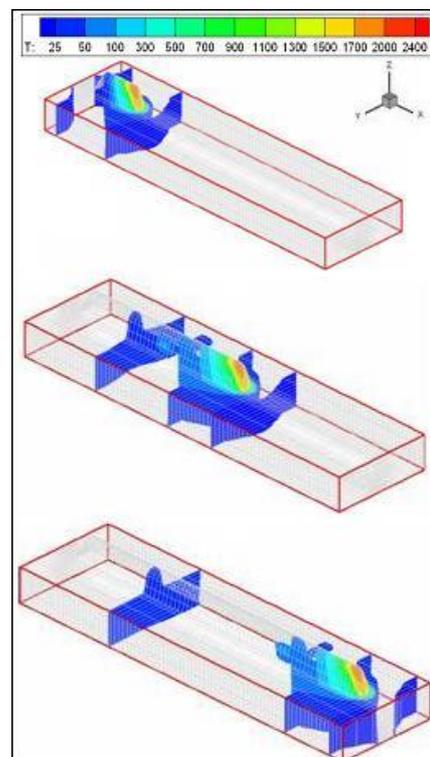


Figura 8. Formação do cordão de solda e distribuição de temperatura (Vel.: 14 cm/min).

As Figuras 9 e 10 correspondem aos resultados da simulação computacional referentes às taxas de aquecimento na superfície da placa e na metade do seu comprimento, exatamente no momento em que o cordão de solda começou a se formar naquela posição. As Figuras 11 e 12 correspondem às taxas de resfriamento naquela mesma posição, só que para um momento posterior à formação do

cordão de solda. Foram avaliadas, para este fim, as duas velocidades de soldagem utilizadas neste trabalho (Tabela 3).

Um aumento na velocidade de soldagem conduziu a maiores taxas de aquecimento e de resfriamento devido aos maiores gradientes térmicos estabelecidos na placa, estando qualitativamente de acordo com os resultados esperados ao se manterem constantes todos os outros parâmetros utilizados.

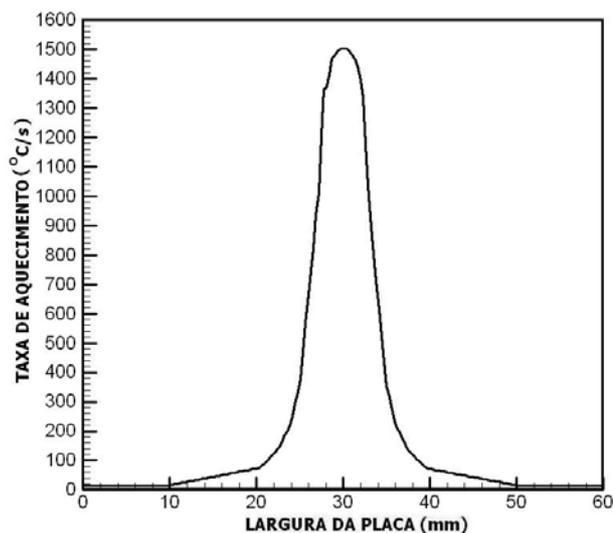


Figura 9. Taxa de aquecimento na superfície da placa ($Z = 9,5$ mm) e na metade do seu comprimento ($X = 110$ mm) (Vel.: 35 cm/min)

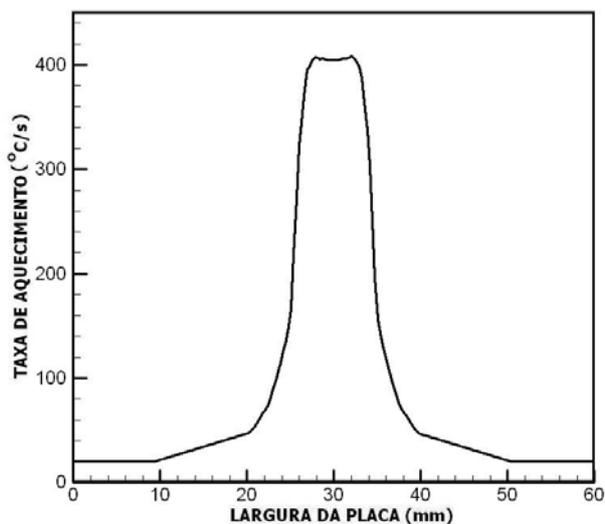


Figura 10. Taxa de aquecimento na superfície da placa ($Z = 9,5$ mm) e na metade do seu comprimento ($X = 110$ mm) (Vel.: 14 cm/min)

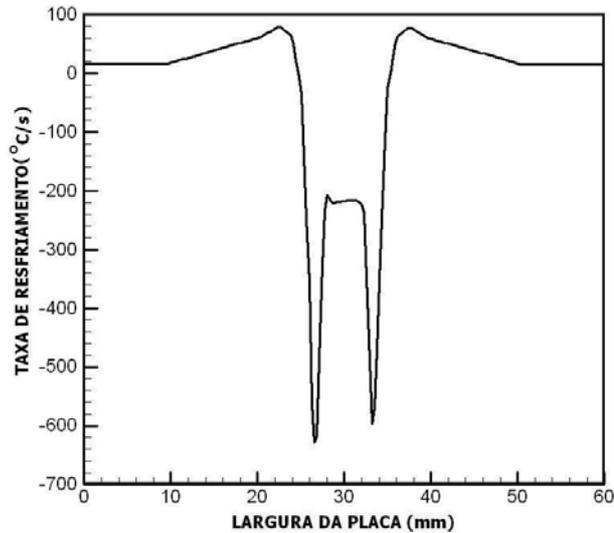


Figura 11. Taxa de resfriamento na superfície da placa ($Z = 9,5$ mm) e na metade do seu comprimento ($X = 110$ mm) (Vel.: 35 cm/min)

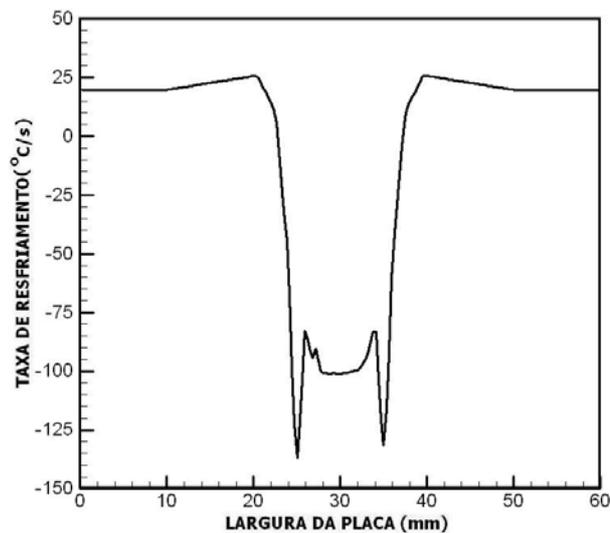


Figura 12. Taxa de resfriamento na superfície da placa ($Z = 9,5$ mm) e na metade do seu comprimento ($X = 110$ mm) (Vel.: 14 cm/min)

5. CONCLUSÃO

Os resultados experimentais e simulados apresentaram o mesmo comportamento e demonstraram a influência da velocidade de soldagem sobre a forma e a extensão da ZF, da ZAC e do cordão de solda, bem como sobre os picos de temperatura, os quais afetam a distribuição desta na placa soldada.

As taxas de aquecimento e resfriamento, responsáveis por alterações nas propriedades metalúrgicas e mecânicas dos metais soldados, puderam ser previstas na simulação e comparadas ao se modificar a velocidade de soldagem.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- 1.TALJAT, B. et al. 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. et al. Modeling residual stresses in welded steel plates using a constitutive model with phase transformation. 18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005, Ouro Preto, **Proceedings of COBEM 2005**.
- 3.YANG, Q. X. et al. 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. et al. 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. et al. Numerical simulation of sleeve repair welding of in-service gas pipelines. **Welding Journal**, v. 81, n. 12, p. 273-282, Dec. 2002.
- 6.PATANKAR, Suhas V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. USA: McGraw-Hill, 1979. 241 p.
- 7.MALISKA, Clovis R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 453 p.
- 8.CASTRO, J. A. **A Multi-Dimensional Transiente Mathematical Model of Blast Furnace Based on Multi-fluid Model**, 2000, 152 f. Ph.D Thesis, - Institute for Advanced Materials Processing, Tohoku University, Japan, 2000.
- 9.MELAAEN, M. C. Calculation of fluid flows with staggered and nonstaggered curvilinear nonorthogonal grids-the theory. **Numerical Heat Transfer**, Part B, 21, 1992
- 10.SMITHELLS, Colin J. **Metals Reference Book**. 5. ed. U.K: Butterworths, 1976. 1566 p.

MODELING AND SIMULATION OF THE THERMAL EVOLUTION DURING PULSED MIG WELDING PROCESS

Carlos Roberto Xavier – D.C.

Universidade Federal Fluminense – EEIMVR Av. dos Trabalhadores, 420 – Vila Santa Cecília, 27255-125 – Volta Redonda – RJ. xavier@metal.eeimvr.uff.br

José Adilson de Castro – Ph.D.

Universidade Federal Fluminense – EEIMVR Av. dos Trabalhadores, 420 – Vila Santa Cecília, 27255-125 – Volta Redonda – RJ. adilson@metal.eeimvr.uff.br

Paulo Roberto Fogaça Ribas - Ph.D.

Universidade Federal Fluminense – EEIMVR Av. dos Trabalhadores, 420 – Vila Santa Cecília, 27255-125 – Volta Redonda – RJ. ribas@metal.eeimvr.uff.br

Alexandre José da Silva – Dr.-Ing.

Universidade Federal Fluminense – EEIMVR Av. dos Trabalhadores, 420 – Vila Santa Cecília, 27255-125 – Volta Redonda – RJ. ajs@metal.eeimvr.uff.br

Abstract. In this work, a computational code based on the finite volume method was utilized in order to simulate the thermal evolution during the pulsed MIG welding process. The effect of the welding energy on the temperature profile, fusion zone (ZF), heat-affected zone (HAZ), and weld fillet form was evaluated. A condition was simulated where a single fillet was deposited on steel plates, with two different welding speeds while other process parameters were kept constant. The simulated results were compared to the experiments, showing a good agreement.

Key-words: Modeling, Simulation, MIG Welding Process, Thermal Evolution.