



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO NA SOLDAGEM TIG EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS UTILIZANDO O EBFVM

Arthur V. N. A. Lima^{1*}, Francisco Marcondes¹ e José R. de Sousa¹

*1 – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 729, 60.440-554, Fortaleza, Brasil.
arthur.vna.lima@gmail.com*

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo simular os ciclos térmicos e as temperaturas máximas do processo de soldagem TIG autógena, sem material de adição, em placas de aços inoxidáveis austeníticos, comparando com resultados experimentais encontrados na literatura. A metodologia numérica para a simulação foi desenvolvida na linguagem Fortran utilizando o método de volumes finitos baseado em elementos (EbFVM). O trabalho foi realizado com os aços AISI 304 e 316L utilizando os mesmos parâmetros de soldagem aplicados e as condições de contorno submetidas no procedimento experimental. O modelo duplo elipsoidal foi escolhido para simular o comportamento da fonte de calor do processo de soldagem TIG. Os resultados encontrados na simulação apresentaram uma ótima correlação com os obtidos experimentalmente. Por conta disso foi possível utilizar desse procedimento para prever o comportamento térmico de casos semelhantes alterando os parâmetros aplicados no processo de soldagem.

Palavras-chave: Soldagem TIG, Aços inoxidáveis austeníticos, Simulação térmica, EbFVM.

INTRODUÇÃO

Devido a aplicações rotineiras do processo de soldagem na indústria, melhorias contínuas devem ser desenvolvidas em busca de sua otimização, com menores custos e melhores desempenhos. Dentre as opções existentes, a soldagem TIG se caracteriza por unir materiais com um eletrodo de tungstênio, não consumível⁽¹⁾. Para isso, diferentes materiais podem ser utilizados como base no procedimento de soldagem. Porém, os aços inoxidáveis austeníticos, que possuem a estrutura austenita, possuem propriedades que são desejáveis em diversas áreas da indústria, juntamente com uma boa soldabilidade⁽²⁾. A energia do processo de soldagem induz um campo de temperatura que pode comprometer a estrutura da peça soldada. Por conta disso, é de extrema importância avaliar os parâmetros utilizados no procedimento para reduzir possíveis falhas. A simulação é uma das formas que mais vem sendo utilizadas pra entender, prever e otimizar os resultados do processo de soldagem⁽³⁾. Simulações numéricas utilizam métodos para resolver as equações não lineares que representam o fenômeno de transferência de calor existente no processo. O método EbFVM alia qualidades dos métodos de elementos finitos e de volumes finitos⁽⁴⁾ e tem se mostrado eficaz nesse tipo de aplicação. Com isso, o

presente trabalho busca simular o comportamento térmico do processo de soldagem TIG autógena em aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316L utilizando o EbFVM.

MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem numérica do processo de soldagem TIG é baseada na transferência de calor difundida na peça. Esse comportamento utiliza equações com base no sistema de coordenadas cartesianas para representar os fenômenos que existem nessa análise térmica. Algumas hipóteses são assumidas para simplificar os custos computacionais. Assume-se que o material soldado está em repouso em relação à fonte de soldagem e que as propriedades térmicas do material estão em função da temperatura⁽⁵⁾. Com base nos modelos existentes de fonte de calor na literatura, o modelo duplo elipsoidal é o mais utilizado nesse processo de soldagem, tendo eficiência e precisão na aproximação^(3,6). Portanto, essa metodologia foi utilizada nessa modelagem. Para validar e verificar o desempenho desse procedimento foi selecionado na literatura dois casos utilizando o processo de soldagem TIG autógeno em aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316L. A Tabela 1 mostra as principais características empregadas nos dois casos, como o tipo de material, geometria da placa, parâmetros de soldagem (tensão E , corrente I , velocidade v_w e eficiência η), a temperatura ambiente T_∞ e a sua respectiva referência na literatura.

Tabela 1: Principais características nos casos de estudo.

Caso	Material	Geometria [mm ³]	E [V]	I [A]	v_w [mms ⁻¹]	η	T_∞ [K]	Referência
Caso 01	316L	250 x 160 x 10	10.0	150	1.0	0.68	302	(7,8)
Caso 02	304	150 x 75 x 3	24.0	100	2.44	0.60	313	(9)

As propriedades térmicas necessárias (produto entre densidade e capacidade térmica ρc_p e a condutividade térmica k) e o coeficiente global de transferência de calor h_g para as simulações nos casos de estudo são ilustrados em função da temperatura na Figura 1.

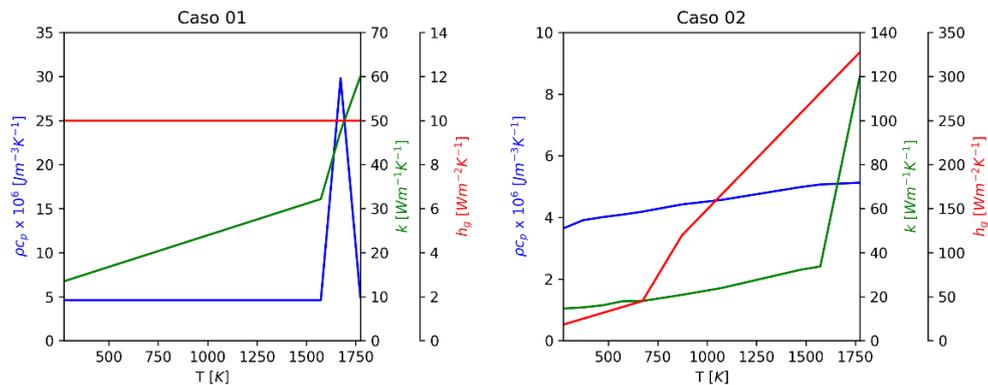


Figura 1: Propriedades e coeficiente global de transferência de calor dos materiais nos casos de estudo.

Um código computacional em Fortran, desenvolvido em conjunto pelos membros do Laboratório de Dinâmica de Fluidos Computacional (LDFC) na UFC, foi adaptado para simular essa aplicação para os casos definidos acima. Utilizou-se elementos hexaedros 3D e uma formulação implícita com EbFVM para resolver o problema transiente não linear anteriormente descrito. As placas utilizadas nas simulações foram projetadas representando apenas uma parte simétrica em relação a linha de solda central, com a ferramenta ICEM CFD do ANSYS. A Tabela 2 ilustra os parâmetros de fonte de calor encontrados com melhor desempenho

utilizando um intervalo de tempo entre cada passo de $\Delta t = 1,0s$, juntamente com opções de refinamento da malha. Além disso, também foram simulados com opções de refinamento para esse intervalo de tempo ($\Delta t = 0,25s, 0,50s, 1,0s$).

Tabela 2: Parâmetros da fonte de calor e refinamento da malha.

Caso	Parâmetros da fonte de calor						Refinamento da malha		
	a_f [mm]	a_r [mm]	b [mm]	c [mm]	f_f	f_r	Malha	Elementos	Nós
Caso 01	6.0	6.0	6.0	6.0	1.4	0.6	R01	1600	2601
							R02	6000	9333
							R03	15000	18666
Caso 02	10.0	16.0	3.0	10.0			R01	3480	5490
							R02	6960	9150
							R03	13688	21330

Tendo validado o código com os casos acima apresentados, foi realizado previsões do comportamento térmico para diferentes condições de soldagem, variando os valores de corrente, tensão e eficiência, e mantendo a velocidade do processo, geometria, propriedades térmicas e condições de contorno dos casos experimentais. A Tabela 3 mostra os parâmetros dos casos simulados com as configurações dos experimentos e dos casos simulados com as configurações de predição.

Tabela 3: Configurações dos tipos experimental e predição nos casos simulados.

Tipo	Rótulo	Parâmetros de soldagem				Posição		
		E [V]	I [A]	η	v_w [mms ⁻¹]	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Experimental	C01-E01	10	150	0,68	1,0	10,0	95,0	10,0
	C01-E02					20,0		
	C01-E03					50,0		
	C01-E04					0,0		
	C01-E05					8,0		0,0
	C01-E06					20,0		
	C01-E07					35,0		
	C02-E01	24	100	0,60	2,44	9,5	47,5	3,0
	C02-E02					7,5	75,0	
	C02-E03					102,5		
Predições	C01-P01	10	150	0,68	1,0	0	125,0	10,0
	C01-P02	24	100	0,60				
	C02-P01	10	150	0,68	2,44		75,0	3,0
	C02-P02							

As simulações foram executadas nos computadores do laboratório em questão para um ciclo térmico de 400s, mantendo o mesmo tempo final nos dois casos. Os resultados obtidos foram avaliados com dois índices de desempenho: uma medida de erro (erro percentual absoluto médio MAPE) e uma medida de dispersão (coeficiente de variação CV) que representa a homogeneidade dos erros^(10,11).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das simulações foi possível comparar as duas métricas de desempenho em ambos os casos. Os menores valores médios de MAPE e CV encontrados foram de 2,92% e 0,189 para o caso 01 e

7,36% e 0,162 para o caso 02, respectivamente. As configurações que geraram esses valores de métrica MAPE foram R01 com $\Delta t = 1,0s$ (caso 01) e R03 e $\Delta t = 1,0s$ (caso 02). Por outro lado, na métrica CV foram usadas R03 com $\Delta t = 0,25$ (caso 01) e R03 com $\Delta t = 0,50s$ (caso 02). As Figuras 2 e 3 mostram as curvas dos ciclos térmicos simulados com as configurações correspondentes que geraram esses menores valores de métrica em ambos os casos. Além disso, o refinamento espacial e temporal gerou um aumento mínimo do erro para o caso 01, devido a possíveis erros de truncamento. Enquanto isso, para a maioria das configurações no caso 02, o refinamento espacial gerou menores valores de MAPE médio e o refinamento temporal resultou em maiores valores de erro, também com um aumento mínimo provavelmente devido aos truncamentos. Por outro lado, para o CV, em ambos os casos, foi encontrado menores valores com esses refinamentos.

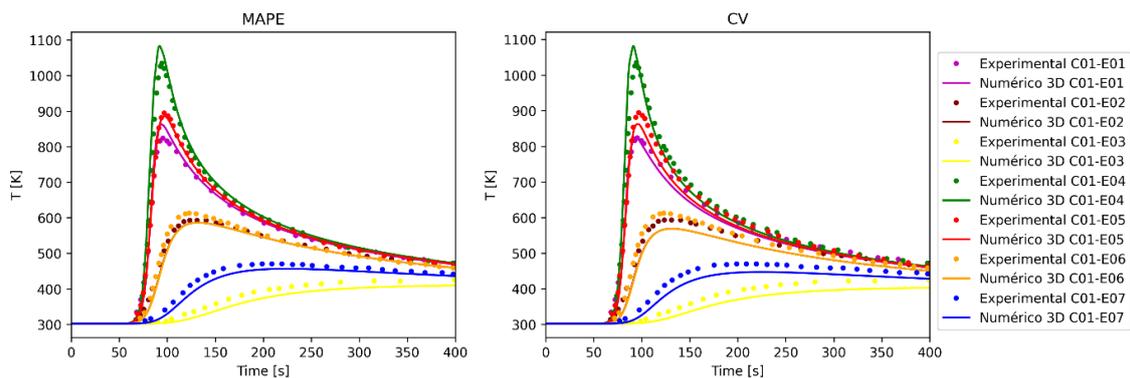


Figura 2: Comparação numérica-experimental do caso 01 com o melhor desempenho nas métricas.

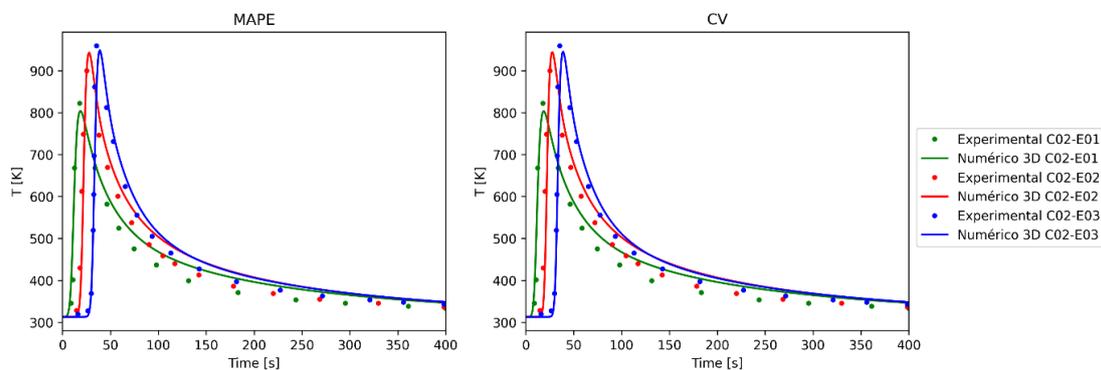


Figura 3: Comparação numérica-experimental do caso 02 com o melhor desempenho nas métricas.

As curvas ilustradas acima mostram que os resultados numéricos dos ciclos térmicos ficaram próximos aos encontrados na literatura, mostrando uma eficiência da metodologia aplicada. Por mais que no caso 02 tenha tido erros mais elevados, nota-se que as curvas estão bem próximas, com uma diferença maior na parte final do ciclo onde está ocorrendo o processo de resfriamento natural até a temperatura ambiente. Ao avaliar as temperaturas máximas simuladas, foi possível comparar as diferenças relativas dos valores encontrados com as simulações que resultaram na melhor métrica CV, em relação aos valores gerados com o melhor MAPE. A Tabela 4 ilustra todos esses valores de temperatura máxima.

Tabela 4: Temperaturas máximas nos casos de estudo.

Casos	Rótulo	MAPE[Ref.]	CV	Diferença relativa [%]
		T_{max} [K]		
Caso 01	C01-E01	862,83	825,70	-4,30
	C01-E02	586,39	568,79	-3,00

	C01-E03	409,27	402,67	-1,61
	C01-E04	1083,90	1082,29	-0,15
	C01-E05	886,41	862,78	-2,67
	C01-E06	586,37	568,79	-3,00
	C01-E07	456,39	447,07	-2,04
Caso 02	C02-E01	804,01	803,56	-0,06
	C02-E02	943,02	943,99	0,10
	C02-E03	948,77	945,42	-0,35

A maior diferença calculada na tabela acima ocorreu no caso 01 na configuração C01-E01, com 4,30%, em módulo, mostrando uma baixa variação entre as duas avaliações. Esse valor se deve ao fato de que na métrica MAPE utilizou-se uma menor malha com a maior opção de intervalo de tempo, enquanto no CV foi utilizado justamente o oposto em ambos refinamentos. Já no caso 02 essa diferença não passou de 0,35%. Os resultados experimentais das temperaturas máximas não foram considerados por não estarem presentes nas referências escolhidas. Além disso, o caso 02 gerou um tempo de CPU maior com 8,60h para rodar todas as combinações, enquanto o outro caso foi finalizado com 7,70h. O comportamento em ambos os casos dos refinamentos foram comprovados através dos tempos totais de execução, como se era esperado, pois com um maior refinamento, mais demorado é a simulação. Finalmente, os resultados das simulações com as configurações definidas para predição são apresentados na Figura 4.

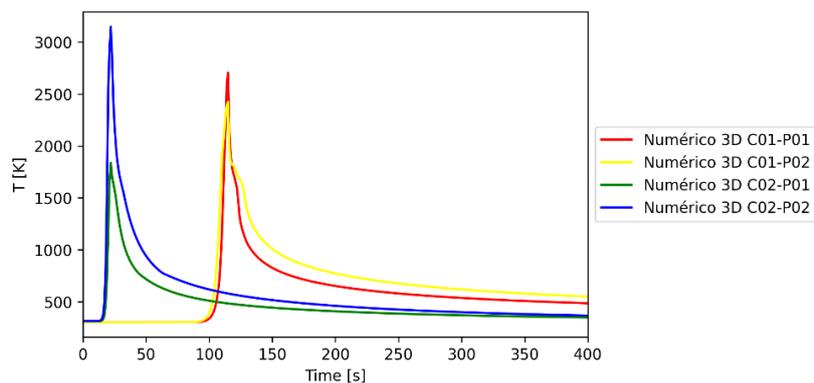


Figura 4: Resultado numérico das configurações de predição nos casos de estudo.

As curvas mantiveram o mesmo padrão de ciclo térmico, porém foram obtidas maiores temperaturas ao se utilizar valores superiores de corrente e de eficiência, mesmo mantendo a velocidade de soldagem.

CONCLUSÕES

A simulação do comportamento térmico nos casos em estudo mostraram a eficiência da metodologia adotada. Os ciclos térmicos numéricos ficaram próximos dos resultados encontrados na literatura. As métricas de desempenho usadas ratificaram os valores baixos de erro, juntamente com sua homogeneidade. Foi observado que o refinamento da malha utilizado influenciou, em modo geral, no aumento dos erros no primeiro caso e uma diminuição no segundo. Enquanto o refinamento do intervalo de tempo gerou um aumento desses erros em ambos casos. Além disso, notou-se que esse método poderia ser aplicado pra prever diferentes configurações mantendo um bom desempenho.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

1. LIPPOLD, J.C.; DAMIAN, J.K. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
2. MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
3. GOLDAK, J.A.; AKHLAGHI, M. Computational welding mechanics. New York: Springer, 2005.
4. PIMENTA, P.V.C.L.; MARCONDES, F. Two-dimensional rate-independent plasticity using the element-based finite volume method. J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., v. 41, n. 3, p. 142, 2019.
5. GUR, C.H.; PAN, J. (Eds.) Handbook of thermal process modeling steels. Boca Raton: CRC Press, 2009.
6. MALIK, A.M.; QURESHI, E.M.; DAR, N.U.; KHAN, I. Analysis of circumferentially welded thin-walled cylinders to investigate the effects of varying clamping conditions. Proc. Inst. Mech. Eng. B. J. Eng. Manuf., v. 222, n. 7, p. 901-914, 2008.
7. CARMO, D. A.; FARIA, A. R. A 2D finite element with through the thickness parabolic temperature distribution for heat transfer simulations including welding. Finite Elem. Anal. Des., v. 93, p. 85-95, 2015.
8. DEPRADEUX, L. Simulation numerique du soudage – acier 316L: validation sur cas tests de complexite croissante. 2004, 222p. Thèse de doctorat – L’Institut National Des Sciences Appliquees de Lyon, Lyon.
9. VENKATKUMAR, D.; RAVINDRAN, D. 3D finite element simulation of temperature distribution, residual stress and distortion on 304 stainless steel plates using GTA welding. J. Mech. Sci. Technol., v. 30, n. 1, p. 67-76, 2016.
10. ANSARI, M.A.; SAMANTA, A.; BEHNAGH, R.A.; DING, H. An efficient coupled Eulerian-Lagrangian finite element model for friction stir processing. Int. J. Adv. Manuf. Technol., v. 101, n. 5-8, p. 1495-1508, 2019.
11. HEUMANN, C.; SCHOMAKER, M.; SHALABH. Introduction to statistics and data analysis: with exercises, solutions and applications in R. Basel: Springer International Publishing, 2016.

NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL BEHAVIOR IN TIG WELDING AUSTENITIC STAINLESS STEEL USING EBFVM

ABSTRACT

The present study aims to simulate the thermal cycles and maximum temperatures of the autogenous TIG welding process, without filler material, in austenitic stainless steel plates, comparing with experimental results found in literature. The numerical methodology for the simulation was developed in Fortran language using the element-based finite volume method (EbFVM). The work was carried out with AISI 304 and 316L steels using the same welding parameters applied and the boundary conditions submitted in the experimental procedure. The double ellipsoidal model was chosen to simulate the behavior of the heat source of the TIG welding process. The results found in the simulation showed an excellent correlation with those obtained experimentally. Because of this, it was possible to use this procedure to predict the thermal behavior of similar cases by changing the parameters applied in welding process.

Keywords: TIG welding, Austenitic stainless steels, Thermal simulation, EbFVM