COMPARAÇÃO ENTRE AS FONTES DE CALOR PONTUAL E GAUSSIANA NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

Jaime A. B. Spenst
Acadêmico do curso de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande - FURG
e-mail: jaime_spenst@hotmail.com
Paulo R. F. Teixeira
Professor do curso de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande - FURG
e-mail: pauloteixeira@furg.br
Douglas B. de Araújo
Professor do curso de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande – FURG
e-mail: daraujo@furg.br

Resumo. Neste trabalho avaliou-se o desempenho de dois tipos de fontes de calor na simulação de soldagem. O problema proposto para a análise foi a deposição sobre chapa em uma placa plana de aço estrutural A36. A fim de que a malha não interferisse nos resultados, foi feito um estudo de convergência de malhas. Como esperado, foram obtidos melhores resultados com a fonte gaussiana, tendo-se menores gradientes de temperatura, pois esta considera que o calor é aplicado em uma área, e não em um ponto, como na fonte pontual.

Palavras-chave: *Soldagem, Simulação Numérica, Fontes de Calor.*

1. INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem a arco elétrico envolvem uma geração de calor muito alta, a fim de causar a fusão dos materiais a serem unidos. Porém, essa alta quantidade de calor gerada pode gerar efeitos indesejáveis, como distorções e tensões residuais, que são um grave problema no processo de fabricação.

A simulação numérica via elementos finitos dos processos de soldagem tem se tornado uma importante ferramenta para entender melhor estes problemas, devido ao aumento da capacidade de processamento dos computadores e da disponibilidade de programas comerciais nos últimos anos.

Para que a simulação se aproxime de resultados experimentais, é necessário que seja feita uma correta modelagem do problema. Um fator importante na correta modelagem do processo é o modelo matemático adotado para representar a distribuição da fonte de calor imposta no processo de soldagem. O modelo de fonte de calor utilizado depende do processo a ser simulado, que pode ser, por exemplo, a soldagem por arco elétrico ou a soldagem a laser.

Neste trabalho, foram comparados dois modelos de fonte de calor, a pontual, onde o calor é aplicado em um único ponto na geometria do problema, e a gaussiana, que considera o calor distribuído sobre uma área circular na geometria, onde a intensidade da fonte em cada ponto segue uma curva gaussiana.

Segundo Tsai (1983), a primeira solução analítica exata do fluxo de calor durante a soldagem foi obtida por Rosenthal em 1941, que apresentou a teoria da fonte pontual. Mas, segundo Kyriakongonas (2011), muitos pesquisadores provaram a existência de graves erros neste tipo de fonte, devido principalmente ao fato de que a temperatura torna-se infinita no centro da fonte de calor. Pavelic et al. (1969) sugeriu um modelo de fonte de calor distribuído sobre uma área circular onde a intensidade seguia uma curva gaussiana. Essa fonte é conhecida na literatura como disco de Pavelic ou simplesmente como fonte gaussiana.

As simulações apresentadas neste trabalho foram feitas usando o método dos

elementos finitos através do software ANSYS®.

2. Modelagem Numérica

2.1 Geometria e condições de simulação

O problema proposto para a comparação entre os dois tipos de fonte é o da deposição sobre chapa de aço estrutural A36, com 4 mm de espessura, 100 mm de largura e 200 mm de comprimento. Como a placa é simétrica, foi considerada apenas a metade da geometria para a análise. Com isso, tem-se um tempo computacional menor, o que é desejável na simulação numérica. A geometria do problema pode ser vista na fig. 1. As propriedades térmicas do aço A36 foram obtidas de Araújo (2012). Foram ainda consideradas a convecção e a radiação na chapa com um coeficiente de convecção $h = 30$ W/m²K e emissividade $\varepsilon = 0{,}9$. O passo de tempo utilizado foi de 0,1 s. Os parâmetros de entrada da simulação podem ser vistos na tabela 1:

Tabela 1. Parâmetros de entrada da simulação

Energia de Soldagem	Velocidade de Soldagem	Temperatura ambiente
2400 J	5mm/s	25°C

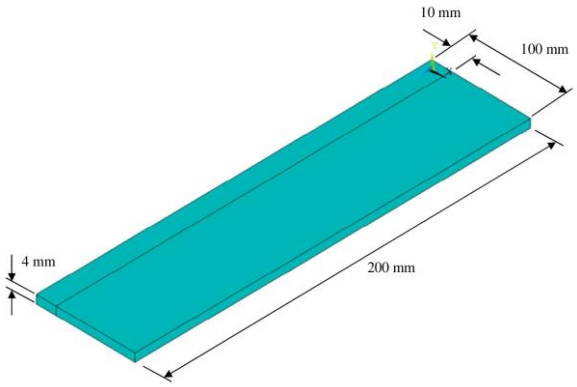

Figura 1 - Geometria do problema

2.2 Analise de convergência de malha

Para que a malha não interferisse nos resultados obtidos, foi feito um estudo de convergência de malhas para determinar a malha mais adequada para a solução do problema. Para esta analise, utilizou-se a fonte de calor gaussiana, pois, como na fonte pontual o calor é aplicado em um ponto, a medida que a malha é refinada, a temperatura no ponto de aplicação do calor tende ao infinito, e a solução não converge.

Como os maiores gradientes de temperatura ocorrem na região próxima a superfície de simetria (linha de centro do cordão), é necessário que haja uma malha mais refinada nesta região. Esta região foi definida como a parte da superfície da chapa em que a fonte de calor atua, que neste caso tem o limite de largura de 10mm, como pode ser visto na fig. 1. Os números de elementos das malhas considerados nesta análise podem ser vistos na tabela 2. Os tamanhos dos elementos da região onde passa a solda nas direções X e Z (no plano da chapa) podem ser vistos na tabela 3. Na direção Y (ao longo da espessura) foram utilizadas 5 camadas em toda a geometria para todas as malhas.

Tabela 2. Número de elementos das malhas

Malha	Número de elementos
M1	18750
M2	54170
M3	150120
M4	434348

Tabela 3 - Tamanho dos elementos na região da solda

Malha	Tamanho dos elementos (mm)	
	Direção X	Direção Z
M1	2	2
M2	1	1
M3	0.5	0.5
M4	0.25	0.25

Para analisar a convergência, foram medidas as temperaturas de 10 pontos na seção transversal localizada na metade da placa em relação a direção longitudinal no instante em que a fonte passa por essa seção. O critério de convergência foi baseado no valor do erro quadrático médio (RMSE) entre duas malhas consecutivas.

As distribuições de temperatura ao longo da seção transversal para as quatro malhas estão mostradas na fig. 2. Como pode ser visto na tabela 4, a malha que apresentou uma variação menor do que 3% em relação à anterior foi a malha 4, com 434348 elementos.

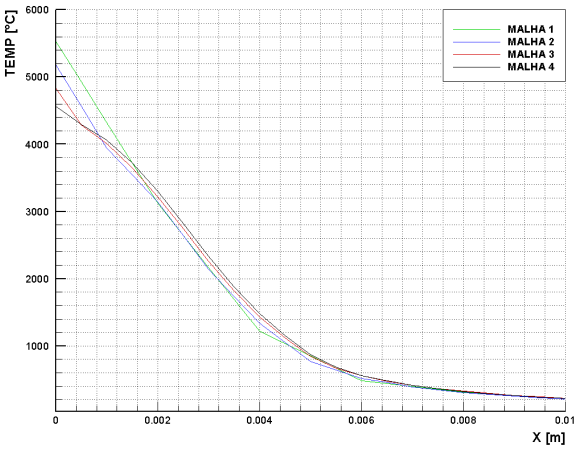

Figura 2 – Temperatura ao longo da seção transversal para a análise de convergência de malha.

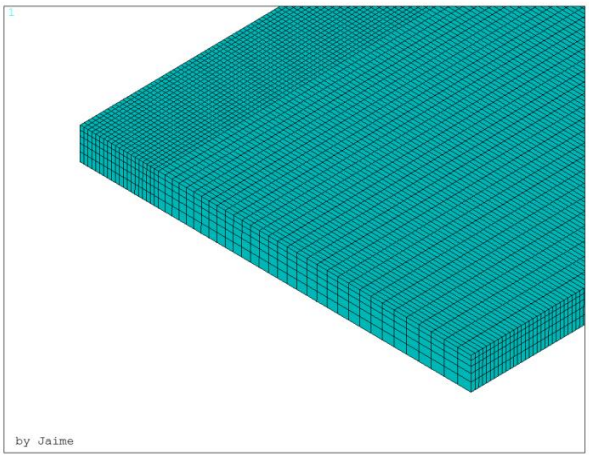

Figura 3 - Detalhe da Malha 3.

Para selecionar a malha, também foi analisado o esforço computacional, t_c, medido como sendo o tempo de esforço computacional em horas por segundo de analise resolvido, como pode ser visto na tabela 4. Devido ao grande esforço computacional requerido pela malha 4 já na analise térmica, a malha escolhida foi a malha 3, que difere pouco da malha 4, e reduz consideravelmente o esforço computacional.

Tabela 4. Erro quadrático médio das temperaturas de malhas consecutivas e tempo computacional

Malha	RMSE(%)	t_c(h/s)
M1	-	0.0075
M2	6,2	0.0266
M3	5,8	0.2975
M4	2,8	2,1944

2.3 Modelagem das fontes de calor

Na fonte de calor pontual, o fluxo de calor total é aplicado pontualmente nos nós da malha. Para a fonte de calor gaussiana, o fluxo de calor é aplicado em uma área circular e é distribuído seguindo uma curva gaussiana, conforme a equação 2 (Tsai, 1983):

$$q(r) = q(0)e^{-Cr^2} \qquad (2)$$

Onde:
q(r) = fluxo de calor na superfície de raio r
q(0) = fluxo de calor no centro da fonte
C = fator de concentração (C=125000m^{-2})
r = distância radial ao centro da fonte

3. RESULTADOS

Com a malha obtida na Seção 2, foram feitas as simulações das duas fontes de calor, obtendo-se as distribuições de temperatura mostradas nas fig. 4 e 5.

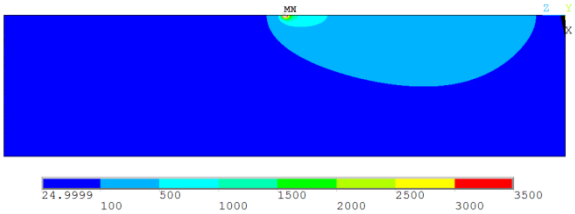

Figura 4 - Distribuição de temperatura para a fonte pontual

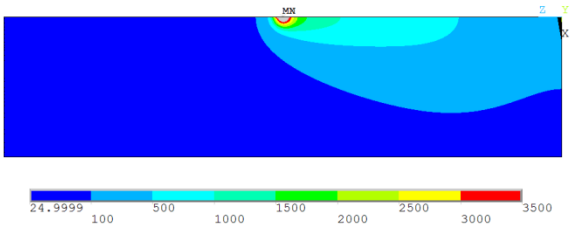

Figura 5 - Distribuição de temperatura para a fonte gaussiana

As distribuições de temperatura ao longo da linha de centro da solda e na seção transversal localizada na posição média da direção longitudinal são mostradas nas fig. 6

e 7, respectivamente. Estas distribuições foram obtidas para um instante de tempo de *t* = 16,2 s, quando a fonte de calor passa na seção transversal localizada na posição média da placa.

Como pode ser visto nas fig. 6 e 7, a fonte de calor que proporcionou a menor temperatura máxima foi a fonte gaussiana, com 4833°C. Já com a fonte pontual a temperatura máxima foi de 19044°C, cujo valor está mais afastado da realidade.

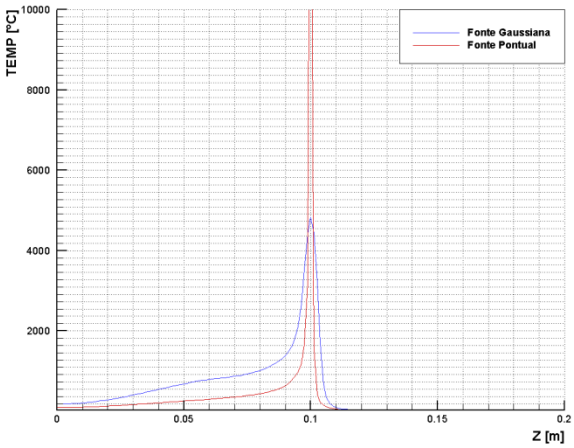

Figura 6 - Distribuição de temperatura ao longo da linha de centro da solda

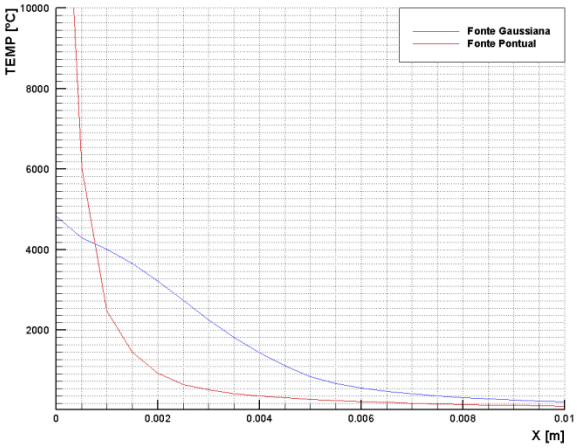

Figura 7 - Distribuição de temperatura na direção transversal

Como também era esperado, a fonte gaussiana apresentou temperaturas mais distribuídas ao longo da região da solda, tendo uma curva mais suave do que a fonte pontual, que apresentou altos gradientes de temperatura nesta região.

4. CONCLUSÃO

Como era esperado, a fonte de calor gaussiana apresentou uma distribuição de temperaturas mais suave do que a fonte pontual. Também, como pode ser observado, a fonte de calor pontual tem uma distribuição de temperaturas muito mais concentrada ao longo da região de simetria, com temperaturas que tendem ao infinito nesta região.

As diferenças encontradas entre os efeitos térmicos causados pelas fontes de calor pontual e gaussiana mostraram a importância de adotar uma formulação adequada para a representação da distribuição da fonte de calor na simulação numérica da soldagem. Assim, pode-se modelar adequadamente as distorções e tensões residuais desse processo.

5. RÊFERENCIAS

ARAÚJO, D. B. **Estudo de Distorções em Soldagem com Uso de Técnicas Numéricas e de Otimização**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2012. 261p.

TSAI, N. **Heat distribution and weld bead geometry in arc welding**. Department of Materials Science and Engineering – Massachusetts Institute of Technology - June 1983.

Kyriakongonas, A. P. **3D Numerical Modeling of Austenitic Stainless Steel 316L Multi-pass Butt Welding and Comparison with Experimental Results.** Dissertation submitted for the degree of Master of Science - School of naval architecture and marine engineering - National Technical University of Athens - 2011.

PAVELIC, V.; TANBAKUCHI, R.; UYEHARA, O. A.; MYERS, P. S. **Welding Journal Research Supplement**, 1969, vol. 48, pp. 295s-305s.