

MODELAGEM TÉRMICA DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO GMAW

Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva, 1ª edição, de 30/11/2020 a 01/12/2020

ISBN dos Anais: 978-65-86861-62-4

GIAROLLO; Daniela Fátima ¹, MAZZAFERRO; Cíntia Cristiane Petry ², MAZZAFERRO; José Antônio Esmerio ³

RESUMO

Resumo

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) consiste em um processo que envolve deposição direta de material, utilizando matéria-prima na forma de arame e o arco elétrico como fonte de energia. Este processo permite a fabricação de componentes metálicos camada por camada, por meio da aplicação da técnica de soldagem por arco elétrico com eletrodo consumível e proteção gasosa (GMAW). Uma das vantagens deste processo consiste nas suas altas taxas de deposição e na capacidade de fabricação de componentes maiores, em comparação com outras tecnologias de manufatura aditiva. Entretanto, devido às elevadas temperaturas geradas neste processo, necessárias para promover a fusão e deposição do material, assim como a existência de ciclos térmicos não uniformes, problemas de tensões residuais e distorções afetam significativamente a qualidade dos componentes obtidos neste processo, justificando a necessidade de uma maior compreensão do comportamento térmico deste processo. Sendo assim, este trabalho propõe uma abordagem inicial para o desenvolvimento de modelos utilizando o método de simulação por elementos finitos. Para tal, desenvolveu-se uma estratégia para modelagem térmica do processo de MADA utilizando o software COMSOL Multiphysics®, a fim de descrever os processos de manufatura aditiva que empregam o processo GMAW. Para comprovar a eficácia do modelo proposto, foi realizada uma validação experimental comparando as temperaturas e ciclos térmicos medidos e simulados, destacando assim sua precisão.

1. Introdução

Os processos de manufatura aditiva (MA) constroem peças tridimensionais (3D) diretamente a partir de modelos CAD (Computer Aided Design), adicionando progressivamente material camada por camada. A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é um processo de deposição que utiliza matéria-prima na forma de arame e o arco elétrico como fonte de energia. Dentre as vantagens para a utilização da MADA em relação a outras formas de MA metálica, estão os baixos custos de capital, associados aos equipamentos, uma vez que utilizam equipamentos iguais ou muito similares aos empregados nos processos de soldagem ao arco elétrico e a flexibilidade nas composições dos materiais [1].

Um grande problema que limita a aplicação da MADA são as dificuldades de controle da precisão dimensional sob condições térmicas em constante mudança (por exemplo, temperatura entre camadas e taxa de resfriamento) [2]. Durante o processo de deposição, as condições de dissipação de calor mudam à medida que o número de camadas aumenta, o que leva a uma variação das dimensões da camada. Este problema afeta significativamente a precisão dimensional das peças fabricadas. Para prever os efeitos dos processos de MA na qualidade final dos produtos, simulações numéricas vêm sendo amplamente aplicadas. Os modelos avaliam diferentes aspectos, como a

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, danielagiarollo@hotmail.com

² Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, cintia.mazzaferro@ufrgs.br

³ Porto Alegre, mazza@ufrgs.br

distribuição das temperaturas resultantes, distorção, tensões residuais, microestrutura, etc. Com a utilização da análise numérica o trabalho experimental pode ser minimizado aproveitando estas análises para se otimizar parâmetros do processo, caminhos de deposição e testar estratégias alternativas de suavização de geometrias.

Um modelo termomecânico tridimensional para peças de parede fina produzidas por GMAW foi proposto por Zhao et al. [3,4], no qual foram pesquisados os gradientes térmicos e o efeito do caminho da deposição na difusão de calor e nas tensões residuais. Ding [5] propôs dois modelos de elementos finitos (modelos transientes e estacionário) para investigar o comportamento termomecânico de peças de múltiplas camadas usando o processo GMAW como fonte de calor. Com isso, os autores conseguiram verificar que o tempo computacional do modelo de estado estacionário pode ser reduzido em até 80%. Montevecchi [6] propôs uma estratégia de modelagem para a MADA com base em um novo modelo de fonte de calor, o que permitiu levar em consideração a distribuição de energia entre a base e o material de deposição. Este modelo possibilitou simular com precisão o processo sem a necessidade de identificar os parâmetros das fontes de calor. Xiong [7] desenvolveu um modelo tridimensional de transferência de calor para uma peça circular contendo dez camadas para investigar o comportamento térmico em manufatura aditiva baseada em GMAW. Os resultados da modelagem mostraram que o pré-aquecimento do substrato pode tornar os ciclos térmicos muito mais suaves e diminuir a taxa de resfriamento da poça fundida. O gradiente máximo de temperatura na mistura fundida diminui com o aumento da temperatura de pré-aquecimento do substrato. Ao término da deposição, o pré-aquecimento pode provocar um aumento na temperatura das camadas depositadas, muito embora cause pouco efeito na distribuição do gradiente de temperatura das camadas. Hejripour [8] construíram dois modelos térmicos para prever a distribuição de temperatura em peças planas e circulares. O objetivo consistia em monitorar os parâmetros do processo e a taxa de resfriamento para investigar a evolução microestrutural.

O controle da temperatura entre deposições influencia nas dimensões de cada camada depositada, por exemplo, uma temperatura mais baixa entre camadas acelera a solidificação da poça de fusão, deixando a camada com uma aparência mais 'estreita e alta'. Por outro lado, uma maior temperatura entre camadas torna a camada mais 'larga e baixa' [9]. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e a validação de um modelo numérico a fim de melhorar a compreensão do comportamento térmico do processo de deposição de paredes por manufatura aditiva utilizando o processo GMAW. Para alcançar tais objetivos, foram realizados procedimentos experimentais visando à obtenção de paredes finas, geometricamente estáveis, utilizando uma fonte de calor GMAW convencional, de baixo custo, normalmente aplicada para processos de soldagem ao arco elétrico.

2. Procedimento experimental

O processo empregado foi o GMAW utilizando uma fonte TransPuls Synergic 4000R da marca Fronius, ajustada para trabalhar no modo tensão constante, operando com corrente contínua e eletrodo positivo (CC+). O movimento da tocha foi realizado por um robô MA1400, fabricado pela Yaskawa Motoman Robotics. Os equipamentos estão demonstrados na Figura 01. As deposições foram realizadas utilizando o modo de transferência do metal pulsado, este modo foi utilizado para reduzir o aporte de energia nos cordões depositados.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, danielagiarollo@hotmail.com

² Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, cintia.mazzaferro@ufrgs.br

³ Porto Alegre, mazza@ufrgs.br



Figura 1. Sistema experimental utilizado para as deposições e aquisição de dados

Os experimentos utilizaram como substrato chapas de aço ASTM A36 com 250 mm x 75 mm x 12,7 mm. Todas as deposições foram realizadas no centro em relação à largura e mantendo 25 mm de cada lado em relação ao comprimento do substrato. Para as deposições utilizou-se o arame eletrodo ER70S-6 com 1,0 mm de diâmetro. Foram empregados os seguintes parâmetros: velocidade de deposição - 4 mm/s, velocidade de alimentação do arame - 6 m/min, distância do bico de contato a peça - 20 mm. O gás de proteção utilizado foi uma mistura com 85% Ar e 15% CO₂, com vazão de 18 l/min. Foram utilizados ângulo de deslocamento e trabalho neutros. Ao final da deposição de cada camada, considerou-se um tempo ocioso entre as camadas adjacentes de 300 s, permitindo assim a dissipação do calor através da parede e do substrato. A direção de movimento da tocha foi alternada entre cada camada, entre cada camada foi utilizado um incremento de altura na tocha de 2,5 mm, conforme representado na Figura 02.

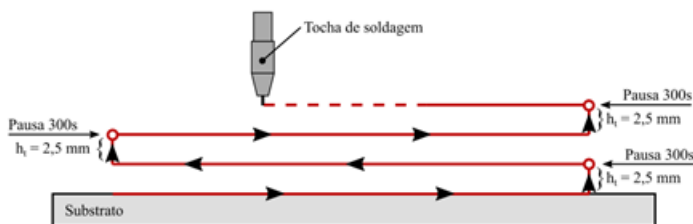


Figura 2. Estratégia adotada para deposição das camadas

Os dados elétricos (tensão e corrente) foram registrados durante o processo, para isso foi utilizado um Sistema de Aquisição Portátil (SAP) 4.01, da IMC Soldagem, empregando uma taxa de aquisição de 5000 Hz, dividido em três canais de aquisição.

O valor médio da potência do sistema P_m foi calculado a partir dos valores instantâneos da tensão U_t e a corrente I_t , através da Equação 01.

$$P_m = \frac{1}{(i) \cdot T} \cdot \int_{t_0+(i-1)T}^{t_0+iT} I_t \cdot U_t \cdot dt \quad (1)$$

A energia de soldagem foi calculada com base na potência média, Equação 1, considerando a eficiência do processo $\eta = 80\%$. Tais valores foram determinados por estudos realizados por Hackenhaar [10], utilizando um calorímetro de fluxo contínuo de água.

Para aquisição dos ciclos térmicos e temperaturas, termopares do tipo K foram soldados na superfície superior do substrato através de descargas capacitivas. A aquisição dos dados foi realizada por um sistema de aquisição fabricado pela National Instruments, utilizando uma frequência de aquisição de 10 Hz. Estes termopares foram distribuídos a 40 mm entre si e a distâncias entre 6 e 8,5 mm do centro dos cordões.

Foram realizadas macrografias das seções transversais do cordão de solda, utilizando

procedimentos metalográficos padrão: lixamento, polimento, ataque (Nital 10%) e aquisição de imagens (lupa Leica EZ4 HD).

3. Modelo Termodinâmico

Um modelo numérico de transferência de calor 3D transiente foi desenvolvido para a análise da dissipação de calor através das peças fabricadas por manufatura aditiva utilizando o processo GMAW. Neste aspecto, foi utilizado o método dos elementos finitos via software COMSOL Multiphysics®.

Para modelar a fonte de calor foi empregado o modelo Duplo-Elipsoide proposto por Goldak [11], o qual apresentou resultados satisfatórios em simulações de processos de manufatura aditiva [12, 6, 9]. Neste modelo, a fonte de calor é descrita de maneira não axissimétrica e a densidade de potência é distribuída por uma Gaussiana em um modelo duplo elipsoide combinado. Uma vez que o gradiente de temperatura é maior à frente da fonte de calor do que na parte posterior, a densidade de potência nestas regiões são definidas separadamente, através das Equações 2 e 3.

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}Q_f f_f}{\pi\sqrt{\pi}a_f b c} e^{-3\left[\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right]} \quad (2)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}Q_r f_r}{\pi\sqrt{\pi}a_r b c} e^{-3\left[\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right]} \quad (3)$$

onde a_f e a_r são os comprimentos do elipsoide frontal e posterior, respectivamente; b é a metade da largura e c a penetração da fonte de calor; Q é a potência efetivamente transferida para a peça considerando o fator de eficiência; f_f e f_r são as frações de calor depositado no quadrante frontal e no quadrante posterior, as quais são definidas de modo que $f_f + f_r = 2$.

A distribuição de temperaturas em todo o modelo foi calculada usando as equações de condução de calor tridimensional com condições de contorno apropriadas. Nesta análise, a condução de calor em função do tempo t e das coordenadas espaciais (x ; y ; z) são determinadas pela Equação tridimensional e não linear de Fourier (Equação 4):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) - Q(x, y, z, t) = \Delta \vec{q}(x, y, z, t) \quad (4)$$

onde ρ é a densidade do material, C_p é o calor específico a pressão constante, T é a temperatura, \vec{q} é o vetor do fluxo térmico e $Q(x, y, z, t)$ é a energia interna gerada por unidade de volume.

Além disso, o modelo considerado no MEF leva em conta um campo de velocidade u , o qual é definido pelo subnó de movimento de translação, quando a fonte é movimentada ao longo do material. A Equação 4 é então modificada da seguinte maneira:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) - \rho C_p u \nabla T(x, y, z, t) - Q(x, y, z, t) = \Delta \vec{q}(x, y, z, t) \quad (5)$$

A distribuição de calor através da peça foi descrita pela equação de condução de calor isotrópica não-linear de Fourier:

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (6)$$

onde k é condutividade térmica do material.

As condições iniciais da chapa base, da mesa e das deposições foram definidas como temperatura ambiente no período das deposições. Durante a análise térmica, foram considerados os efeitos de convecção e radiação entre as superfícies e o ambiente circundante. As perdas térmicas por convecção foram modeladas de acordo com a seguinte equação:

$$q_{com} = h_{com} [T_{ext} - T(0)] \quad (7)$$

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, danielagiarollo@hotmail.com

² Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, cintia.mazzaferro@ufrgs.br

³ Porto Alegre, mazza@ufrgs.br

onde, T_{ext} é a temperatura externa, $T(0)$ é a temperatura na superfície e h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção. Um valor de $h_{conv} = 15W/m^2K$ foi usado para o coeficiente de transferência de calor por convecção, este valor é próximo à convecção utilizada em estudos de Lundback [13] e Zhao [14].

As perdas térmicas por radiação foram modeladas segundo a lei de Stefan Boltzmann:

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4) \quad (8)$$

onde ε é o coeficiente de radiação, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,67 \times 10^{-8}W/m^2 \cdot ^\circ C^4$), T é a variável de temperatura e T_{amb} é a temperatura ambiente. Nestes modelos foi empregado um coeficiente de radiação $\varepsilon = 0,6$, próximo aos valores utilizados por Zhao [14].

As perdas de calor através da mesa sobre a qual a chapa era posicionada foram modeladas utilizando-se um coeficiente de condução equivalente. Este coeficiente foi encontrado executando uma série de testes numéricos e ajustando o seu valor para que os perfis de temperatura previstos correspondessem aos resultados experimentais, sendo que o valor de $k = 30W/(mK)$ apresentou a melhor correspondência com dados experimentais, este método de determinação das perdas de calor através da mesa foi proposto por Ding [5].

O substrato e o material de deposição foram assumidos com propriedades isotrópicas. As propriedades térmicas do material foram modeladas por funções analíticas dependentes da temperatura utilizando interpolação entre vários intervalos de temperatura estabelecidos pela base de dados do software COMSOL® para o material ASTM A36. A Figura 3 demonstra a condutividade térmica (k) [W/mK], o calor específico à pressão constante (C_p) [$J/kg K$] e a densidade deste material [kg/m^3] em função da temperatura.

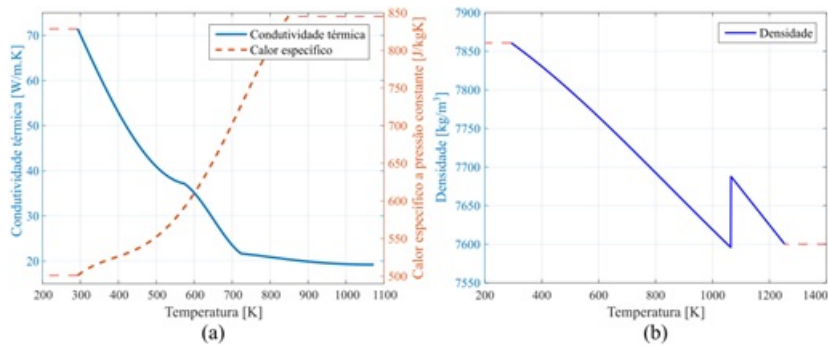


Figura 3. (a) Condutividade térmica e calor específico a pressão constante; (b) Densidade.

Quanto à malha utilizada, todos os modelos foram desenvolvidos utilizando elementos tetraédricos, conforme pode ser observado na Figura 4. Com o propósito de redução do esforço computacional, optou-se por aplicar o refino da malha no substrato apenas nas proximidades do cordão de solda (zona afetada pelo calor), mantendo o restante do domínio com uma malha mais grosseira. O tamanho máximo e mínimo de cada elemento da malha no domínio das camadas foi de 3,0 mm e 1,9 mm, respectivamente e 10,0 mm e 2,1 mm no substrato.

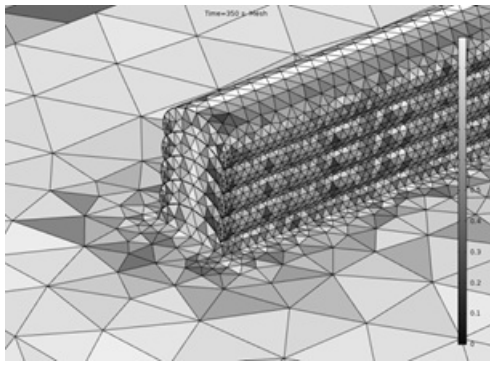


Figura 4. Malha tetraédrica empregada no modelo

Para a ativação dos diferentes cordões e camadas, inicialmente cada cordão de solda depositado foi modelado de forma simples, ou seja, todos os elementos do cordão de solda estão presentes no modelo ao longo da análise, com suas propriedades térmicas associadas. No entanto, a estratégia de simulação adotada para lidar com as camadas consistiu no método dos elementos inativos. Este método classifica os elementos definidos na malha do elemento finito original em: elementos ativos e inativos [15]. Os elementos ativos (por exemplo, a malha que define o material de base, do primeiro cordão e da mesa) são calculados e associados inicialmente. Por outro lado, os elementos inativos, com todo o domínio discretizado, compreendem a parcela da malha oculta no instante da análise. A cada etapa da deposição, cada camada é ativada de acordo com a estratégia de deposição adotada. Somente elementos ativos e ativados são considerados na análise. A temperatura inicial dos novos domínios foi definida sempre pela temperatura ambiente.

4. Resultados e Discussão

4.1. Deposição de uma única camada

Inicialmente foi realizada a deposição de uma única camada, o que possibilitou a determinação das dimensões do cordão de solda e da poça de fusão para utilização no modelo numérico. Na Figura 5 (a) e (b) são apresentadas a macrografia da seção transversal deste cordão e uma imagem da poça de fusão resultante. Na Tabela 1 são apresentadas as dimensões mensuradas deste cordão de solda.

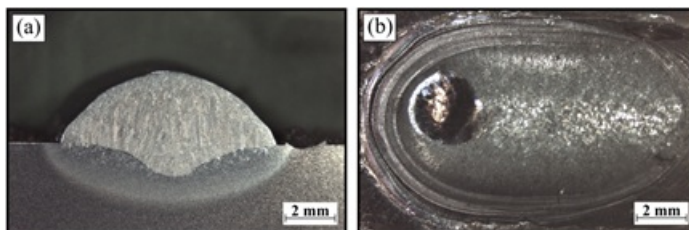


Figura 5. (a) Macrografia da seção transversal e (b) Poça de fusão

Tabela 1. Dimensões da deposição de uma camada

altura
[mm]
largura
[mm]
penetração
[mm]
 a_f
[mm]
 a_r
[mm]
 f_f

 f_r

2,9
8,5
1,2
3,4
10,5
0,4
1,6

Para os parâmetros de soldagem utilizados neste estudo, a potência média obtida pelo sistema de aquisição de dados e calculada conforme a Equação 1, foi de 2900 W. As dimensões do cordão de solda e da fonte de calor utilizados no modelo numérico foram definidas de acordo com as dados apresentadas na Tabela 1.

Na Figura 6 são apresentados os ciclos térmicos experimentais e obtidos numericamente e a Tabela 2 apresenta as temperaturas de pico em cada termopar, bem como as diferenças percentuais entre os resultados numéricos e experimentais, obtidas conforme a Equação 9.

$$\Delta\% = \frac{x_{exp} - x_{num}}{x_{exp}} \times 100 \quad (9)$$

onde x_{exp} representa o valor experimental e x_{num} o valor simulado correspondente.

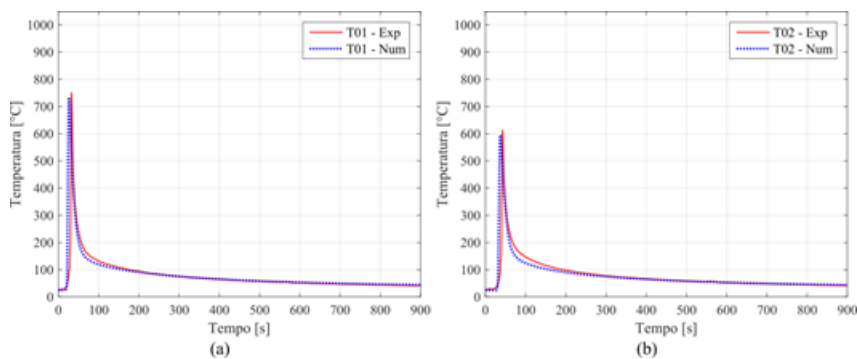


Figura 6. Comparação entre os ciclos térmicos experimentais (Exp) e numéricos (Num), deposição de uma única camada: (a) 6 mm e (b) 6,5 mm de distância em relação ao centro das deposições

Tabela 2. Temperaturas de pico experimentais (Exp) e numéricas (Num) [°C] e diferenças

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, danielagiarollo@hotmail.com
² Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, cintia.mazzaferro@ufrgs.br
³ Porto Alegre, mazza@ufrgs.br

percentuais, deposição de uma camada

Camada

Uma Camada

T01

T02

Exp

Num

Exp

Num

1ª

750,9

732,9

612,3

595,3

2,4%

2,8%

A partir da comparação dos resultados, observa-se que o comportamento obtido com o modelo numérico se aproxima ao experimental. As temperaturas de pico previstas pela simulação são próximas às obtidas experimentalmente. Não apenas as temperaturas de pico, mas as taxas de aquecimento e resfriamento previstas, as quais estão diretamente relacionadas com a transferência de calor da chapa para o ambiente, apresentam-se bem correlacionadas com as medições. Visto que as inclinações das curvas tanto experimentais quanto simuladas apresentam-se semelhantes. Isto demonstra um bom acerto na representação das condições de contorno.

4.2. Deposição de três e cinco camadas

Após foi realizada a deposição de três e cinco camadas. A Figura 7 e a Tabela 3 apresentam as macrografias das seções transversais destas deposições e as dimensões, respectivamente.

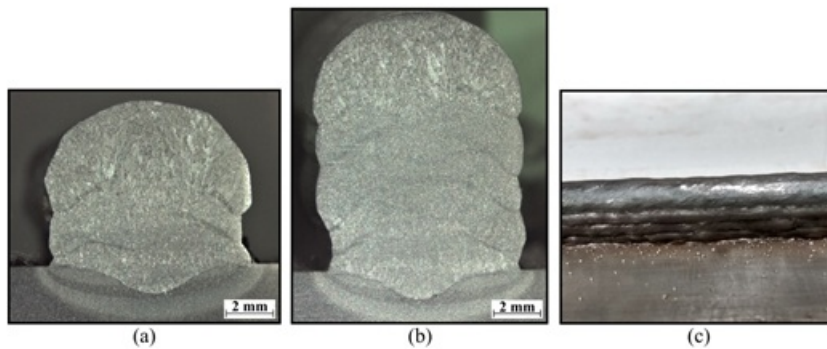


Figura 7. Macrografia da seção transversal: (a) deposição de três camadas; (b) deposição de cinco camadas e (c) aparência superficial da deposição de cinco camadas

Tabela 3. Dimensões totais, deposições de três e cinco camadas

altura total

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, danielagiarollo@hotmail.com
² Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, cintia.mazzaferro@ufrgs.br
³ Porto Alegre, mazza@ufrgs.br

[mm]

largura

[mm]

Três camadas

6,9

8,7

Cinco camadas

10,9

9,0

Para os parâmetros de soldagem utilizados neste estudo, a potência média obtida pelo sistema de aquisição de dados foi de 3100 W, praticamente não houve variação destes valores para as diferentes camadas depositadas.

As Figuras 8 e 9 mostram a comparação das curvas de temperatura entre os resultados numéricos e experimentais. Na Tabela 4 são apresentados os resultados experimentais e numéricos de temperatura de pico e as diferenças percentuais entre os resultados.

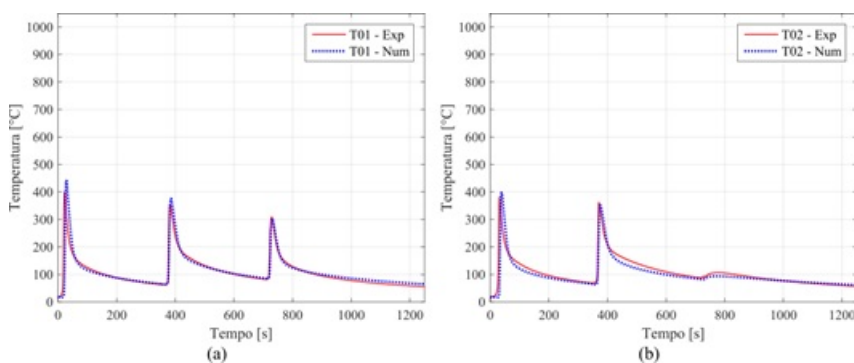


Figura 8. Comparação entre os ciclos térmicos experimentais (Exp) e numéricos (Num), deposição de três camadas: (a) 8 mm e (b) 8,5 mm de distância em relação ao centro das deposições

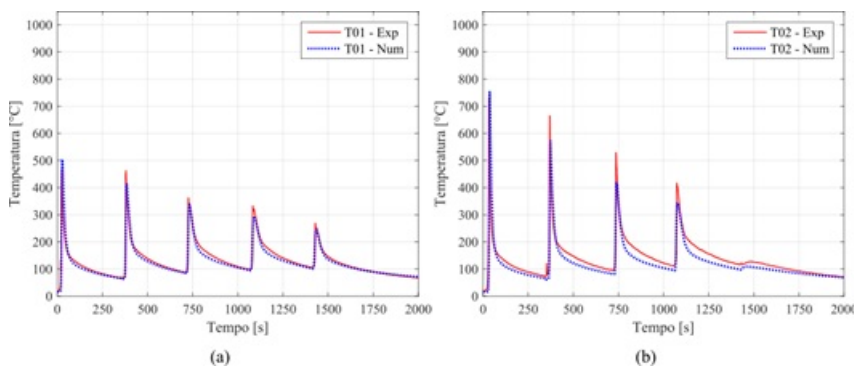


Figura 9. Comparação entre os ciclos térmicos experimentais (Exp) e numéricos (Num), deposição de cinco camadas: (a) 7,5 mm e (b) 6,2 mm de distância em relação ao centro das deposições

Tabela 4. Temperaturas de pico experimentais (Exp) e numéricas (Num) [°C] e diferenças percentuais, deposição de três e cinco camadas

Camada

Três Camadas

Cinco Camadas

T01

T02

T01

T02

Exp

Num

Exp

Num

Exp

Num

Exp

Num

1ª

400,9

440,8

381,4

397,8

467,8

504,0

730,3

753,2

9,9%

4,3%

7,7%

3,1%

2ª

354,1

375,3

362,1

351,2

462,4

412,2

664,5

571,8

6,0%

3,0%

10,8%

14,0%

3ª

308,9

302,8

106,4

93,6

362,6

337,7

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, danielagiarollo@hotmail.com

² Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, cintia.mazzaferro@ufrgs.br

³ Porto Alegre, mazza@ufrgs.br

529,4
417,4
2,0%
12,0%
6,9%
21,1%
4ª
-
-
332,8
293,8
416,8
343,2
11,7%
17,6%
5ª
-
-
269,0
244,7
127,0
109,1
9,0%
14,0%

A partir da comparação dos resultados, observa-se que o comportamento obtido com o modelo numérico se aproxima ao experimental. As temperaturas de pico previstas pela simulação são bastante próximas às obtidas experimentalmente. Como também as taxas de aquecimento e resfriamento previstas estão bem correlacionadas com as medições. Comparando as diferenças percentuais dos dados simulados em relação aos experimentais, observa-se que 90% destes apresentaram erros menores do que 15%.

Analisando os resultados das Figuras 8 e 9 e da Tabela 4, observa-se uma ótima concordância para as temperaturas de pico, assim como as taxas de resfriamento, visto que as inclinações das curvas durante o resfriamento apresentam-se muito semelhantes. No entanto, existem pequenos desvios entre as duas curvas, o que provavelmente ocorre devido às diferentes condições de dissipação de calor consideradas. Eles podem estar associados aos parâmetros de forma do cordão e da fonte de calor, os quais são mantidos praticamente constantes; podem ocorrer erros devido às diferentes condições de dissipação de calor entre as superfícies e o meio ambiente, devido as diferentes condições de continuidades entre superfícies aplicadas no modelo, entre outros. Na prática, o processo de deposição pode provocar a deformação do substrato de modo a produzir uma folga entre o substrato e a mesa. Essa folga pode reduzir a eficiência da transferência de calor do sistema. Já no modelo numérico, assumiu-se a ausência de qualquer folga entre o substrato e a mesa, o que possivelmente tenha superestimado a perda de calor. Outra explicação para a divergências observadas entre os resultados numéricos e experimentais, podem estar associadas, por exemplo, a pequenos erros de medição nos termopares, como ruídos, interferências, entre outros.

5. Conclusões

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, danielagiarollo@hotmail.com
² Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, cintia.mazzaferro@ufrgs.br
³ Porto Alegre, mazza@ufrgs.br

A partir da comparação dos resultados obtidos experimentalmente e da simulação numérica, foi verificado uma concordância dos resultados, indicando a eficácia do modelo numérico. As temperaturas de pico e as taxas de aquecimento e resfriamento previstas estão correlacionadas com as medições.

As pequenas divergências observadas entre os resultados numéricos e experimentais podem estar associadas, por exemplo, aos erros de medição ou também a limitações do modelo numérico, as quais podem estar associadas aos parâmetros de forma do cordão e da fonte de calor, os quais são mantidos praticamente constantes, erros devido às diferentes condições de dissipação de calor entre as superfícies e o meio ambiente, entre outros.

Considerando todos os possíveis fatores que influenciam nos resultados, pode-se concluir que o modelo proposto é adequado para prever o comportamento térmico na fabricação por manufatura aditiva baseado no processo GMAW. Os resultados da simulação fornecem uma tendência de variação de temperatura para o processo de deposição, o que permite o estudo do comportamento térmico na peça fabricada, bem como para o desenvolvimento de técnicas para o controle dimensional.

6. Agradecimentos

A autora Daniela Fátima Giarollo agradece à Coordenação de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado.

7. Referências Bibliográficas

[1] Xiong, J. et al. Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, p. 1767 - 1776, 2015.

[2] Xiong, J. et al. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25, p. 157 - 163, 2012.

[3] Zhao, H. et al. A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping, 211, p. 488 - 495, 2011.

[4] Zhao, H. et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single pass multi-layer weld-based rapid prototyping, *Journal of Materials Processing Technology*, 212, p. 276 - 285, 2012.

[5] Ding, J. et al. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts, *Computational Materials Science*, 50, p.3315-3322, 2011.

[6] Montevecchi, F. et al. Finite element modelling of Wire-Arc-Additive-Manufacturing process. In: 5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production, 2016.

[7] Xiong, J. et al. Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures, *Applied Thermal Engineering*, 126, p. 43 - 52, 2017.

[8] Hejripour, F. et al. Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 272, p. 58 - 71, 2019.

[9] Zhao, Y. et al. Process planning strategy for wire-arc additive manufacturing: Thermal behavior considerations, *Additive Manufacturing*, 32, 2020.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, danielagiarollo@hotmail.com

² Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, cintia.mazzaferro@ufrgs.br

³ Porto Alegre, mazza@ufrgs.br

[10] Hackenhaar, W. et al. Influência da Vazão e Geometria da Região de Entrada Sobre a Eficiência Térmica Medida por um Calorímetro de Fluxo Contínuo de Água. *Soldagem & Inspeção*, 21(3), p.269-281, 2016.

[11] Goldak, J. et al. A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical Transactions B*, 15B, p.299-305, 1984.

[12] Michaleris, P. Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes, *Finite Elements in Analysis and Design*, 86(1), p.51-60, 2014.

[13] Lundback, A.; Lindgren, L. Modelling of metal deposition, *Finite Elements in Analysis and Design*, 47, p. 1169-1177, 2011.

[14] Zhao, X. et al. Numerical modeling of the thermal behavior and residual stress in the direct metal laser sintering process of titanium alloy products, *Additive Manufacturing*, 14, p. 126-136, 2017.

[15] Chiumenti, M. et al. Finite element modeling of multi-pass welding and shaped metal deposition processes, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 199(37-40), p.2343-2359, 2010.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Aditiva, GMAW, Simulação

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, danielagiarollo@hotmail.com

² Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, cintia.mazzaferro@ufrgs.br

³ Porto Alegre, mazza@ufrgs.br