

IMPORTÂNCIA DOS MÉTODOS DE SIMULAÇÃO NA MANUFATURA ADITIVA POR ARCO ELÉTRICO: UMA REVISÃO

André Luiz Brito Novelino

Guilherme Caribe de Carvalho

Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF.

andre_novelino@hotmail.com

gccarval@unb.br

mziberov@unb.br

Resumo. A manufatura aditiva de metais por arco elétrico atrai grande interesse de ambas as áreas acadêmica e industrial. Para auxiliar os estudos, modelos computacionais com diversos objetivos e metodologias vem sendo criados, estudados e validados, contribuindo com a evolução e compreensão do processo. O objetivo desse trabalho é apresentar uma revisão dos principais métodos de modelagem utilizados na área de manufatura aditiva de metais por arco elétrico e mostrar os modelos numéricos utilizados, comparando os resultados obtidos com os dados experimentais. Além disso, são citadas as contribuições desses modelos para otimização do processo e os desafios presentes em cada método. Constatou-se que os modelos obtiveram, em grande maioria, bons resultados em comparação com as validações realizadas, obtendo uma boa confiabilidade para as aplicações que são propostas. No entanto, modelos mais completos ainda são inviáveis para aplicações industriais, uma vez que a grande demanda de processamento requer um tempo de simulação muito alto, não possibilitando uma abordagem em larga escala do processo.

Palavras chave: Manufatura aditiva. Arco elétrico. WAAM. Simulação.

1. INTRODUÇÃO

Novas tecnologias vêm sendo implementadas industrialmente, com o objetivo de aumentar a produção e reduzir os custos, sempre mantendo e/ou melhorando os padrões de qualidade e sustentabilidade. Uma dessas tecnologias é a manufatura aditiva (MA) de metais por arco elétrico, também conhecida pela nomenclatura em inglês como *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM), um processo que se destaca pela capacidade de criação peças complexas, que possui uma alta taxa de deposição de material e custo menor quando comparado a outros processos de MA (Wu, *et al.*, 2018).

O processo WAAM baseia-se no uso de tecnologias vindas de processos de soldagem, como o *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), *Cold Metal Transfer* (CMT) variante do GMAW e *Plasma Arc Welding* (PAW), além de alguns processos híbridos utilizando *Laser Beam Welding* (LBW). A composição de um equipamento consiste em usar uma fonte, especificada para cada processo, e uma tocha ou bocal, juntamente com um sistema de alimentação, que é direcionada por um sistema automatizado, como um braço mecânico (Shukla, *et al.*, 2020). Cada processo possui características diferentes na abertura do arco elétrico, temperatura de trabalho e deposição do material, sendo recomendados assim para aplicações e materiais diferentes.

Porém, por se tratar de um processo com física complexa, ensaios experimentais para determinação e otimização de parâmetros se torna inviável, devido aos altos custos, assim, modelos numéricos computacionais passaram a ser criados para auxiliar na aquisição de dados e determinação de parâmetros, facilitando a obtenção dos parâmetros e reduzindo os custos e auxiliando na compreensão da física do processo.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão de modelos numéricos aplicados em manufatura aditiva, mostrando a importância do seu uso para a otimização dos processos, além disso, pretende-se apresentar as metodologias utilizadas para a modelagem, com abordagens bidimensionais e tridimensionais de modelos térmicos e multifísicos.

2. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Um dos métodos mais comuns para as simulações computacionais é a análise por elementos finitos (FE), podendo-se ainda em alguns modelos utilizar a análise por diferenças finitas (FD). A modelagem através do FE utiliza elementos e nós na constituição da malha do problema, discretizando todo o domínio de análise (Moaveni, 2008). A modelagem por FD utiliza também um processo de discretização, porém utilizando métodos mais simples de formulação, com geometrias simplificadas e formuladas localmente. (Özişik, *et al.*, 2017).

Um método utilizado em modelos de simulação em elementos finitos é o método de Galerkin descontínuo ou *Discontinuous Galerkin Method* (DGM), que caracteriza um modelo de discretização espacial onde o resultado das equações para definição da malha baseia-se apenas no elemento local gerado, não dependendo dos resultados obtidos pelos elementos vizinhos (Baggag, *et al.*, 2000). Esse método necessita de uma capacidade de processamento mais robusta, porém permite uma caracterização heterogênea de uma região, sendo útil para identificar diferentes fases de um gás presente na atmosfera ou ainda caracterizar um gradiente de temperatura de forma mais detalhada devido à maior discretização.

Outro método utilizado é o *Volume of Fluid* (VOF), também conhecido como método Euleriano, utilizado para prever escoamentos em duas fases e considerar a interação entre fases no modelo, atribuindo uma variável para cada fase, sendo introduzida como uma fração do volume. Esse método pode ser utilizado para identificar, por exemplo, o comportamento da poça de fusão durante o processo (Bai, *et al.*, 2018).

Outras abordagens utilizadas são o *Level Set Method* (LSM) e o *Phase Field Model* (PFM), utilizados tanto em FE quanto em FD para modelar transformações de fases que ocorrem ao longo de um processo. Podem ser utilizadas para previsão de diversos fenômenos físicos, como na análise do desenvolvimento da microestrutura durante a deposição de metal no processo de manufatura aditiva (Chen, 2007; Leary, 2020). De acordo com Qin e Bhadeshia (2010), o PFM consiste na determinação de um estado através de um parâmetro Φ , que varia entre 0 e 1, avaliando o intervalo continuamente, com os valores que transição representando quantidades físicas da concentração das fases. O LSM também utiliza um parâmetro de transição entre as fases, porém com valores simplesmente numéricos, sendo um método de duas etapas, tratando a transição de forma arbitrária. O LSM é um método que exige menor capacidade computacional e realiza um menor refinamento em comparação ao PFM que possui uma precisão maior e maior consistência de valores obtidos na interface entre as fases, porém isso leva o método a ser limitado para um número menor de grãos em uma região (Amiri e Hamouda, 2013; Li, *et al.*, 2020).

Diversos modelos são criados na abordagem de aspectos eletromagnéticos, de transferência de calor ou de mecânica dos fluidos, analisando separadamente os efeitos ou ainda com uma análise multifísica. São usados por exemplo para descrever o comportamento do arco elétrico, da poça de fusão e fluxo de calor durante o processo de deposição. Muitos dos trabalhos abordam a deposição de apenas um cordão/camada, uma vez que os modelos demandam um processamento computacional muito alto para uma simulação multifísica. Já outros utilizam simplificações que analisam apenas um aspecto do processo, sendo uma simulação térmica ou modelos mais simplificados do arco elétrico e da interação com o gás de proteção. Desta forma serão apresentadas algumas abordagens de modelos bidimensionais e tridimensionais.

2.1. Modelos 2D

Modelos 2D são modelos numéricos, de menor demanda de cálculo computacional, utilizados para caracterizar processos de soldagem e determinar resultados de algumas regiões pontuais no auxílio do estudo do processo. Zhao, *et al.* (2018) menciona o uso de uma abordagem bidimensional que seja satisfatória utilizando o método VOF. Os autores mencionam que muitos consideram o uso desse domínio com uma espessura nula, simplificando o problema para um plano, o que facilita a geração de malha do modelo.

O trabalho de Zhao, *et al.* (2018) apresenta a criação de um modelo numérico, baseado no processo GMAW, em uma análise magneto-hidrodinâmica para entendimento das forças atuantes no processo transferência de material nos modos de transferência spray e globular. O comportamento da transferência foi simplificado em um sistema 2D assimétrico com um algoritmo utilizando o método PFM. Este método permite a caracterização das fases, gera uma interface de fluxo de material e ainda garante que a energia total do sistema seja minimizada corretamente, o que permite uma abordagem mais realista que o método VOF. O modelo permite a visualização do processo de transição de material e possibilita uma boa previsão do tamanho da poça de fusão de acordo com os ensaios experimentais. Concluiu-se também pelas simulações que a força devido a tensão superficial é a componente de maior intensidade quanto a força de deslocamento da gota no modo de transferência globular, seguido pela força gravitacional e pela força eletromagnética. Para o modo de transferência por spray a força com maior influência é a componente radial da força eletromagnética, com o balanço de forças axiais não existindo.

Quanto ao trabalho de Hauser, *et al.* (2021), uma análise dos efeitos de oxidação presentes no processo de manufatura aditiva é realizada para a liga de alumínio AW4043/AlSi5. O processo PAW foi utilizado e um modelo numérico CFD foi criado através do FEM, utilizando o software Siemens STAR-CCM+, representando uma seção do bocal e do substrato. O modelo avaliou a concentração de oxigênio para diferentes valores de fluxo de argônio, utilizado como gás de proteção, e comparou com ensaios experimentais do processo para diferentes taxas de deposição de material e tamanho de bocal. A malha utilizada no modelo e a simulação para diferentes fluxos de argônio está apresentada na Fig. 1. A simulação foi validada com medições experimentais, com variações máximas na faixa de 40 ppm (partes por milhão). Através dos dados obtidos, foi possível determinar o valor ótimo de fluxo de gás de proteção para o processo PAW, para valores de deposição diferentes e tamanhos de bocais distintos, de forma a evitar a oxidação excessiva da poça de fusão e permitir uma melhor qualidade do cordão depositado.

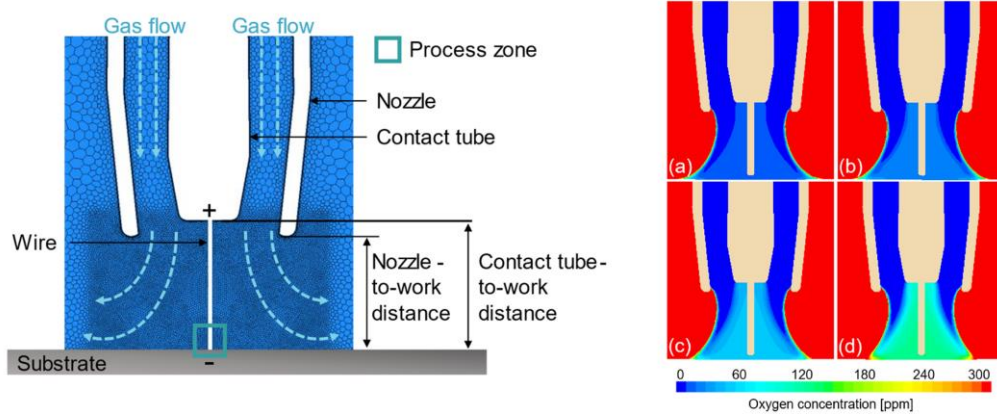


Figura 1. Malha utilizada na simulação do processo de deposição (à esquerda) e valores de concentração de oxigênio, em partes por milhão, para as vazões de (a) 10 l/min, (b) 8 l/min, (c) 6 l/min, e (d) 4 l/min (à direita) (Hauser, *et al.*, 2021)

Traidia, *et al.* (2012), ressaltam que, apesar da economia no tempo de processamento de simulações bidimensionais, os modelos acabam sendo limitados para uma previsão concreta de alguns efeitos presentes na deposição do cordão, como nos ciclos térmicos. Sendo assim, os autores apresentaram uma abordagem híbrida 2D-3D, focando a simulação bidimensional com um modelo assimétrico para caracterizar o plasma gerado pelo arco e assim computar as distribuições de fluxo de calor, densidade de corrente e a pressão aplicada na superfície de trabalho pelo arco elétrico, auxiliando na simulação tridimensional. O processo estudado foi o GTAW, com um modelo único definindo cátodo, o ânodo e o plasma, conforme pode ser observado na Fig. 2, assumindo um equilíbrio termodinâmico local, sem considerar a influências dos vapores de metais e dos gases de proteção. Também foi assumido, para simplificações, que o gás do plasma e do metal líquido são incompressíveis e o fluxo é laminar. O modelo também utiliza aproximações das equações magneto-hidrodinâmicas e de Boussinesq para inclusão da força gravitacional.

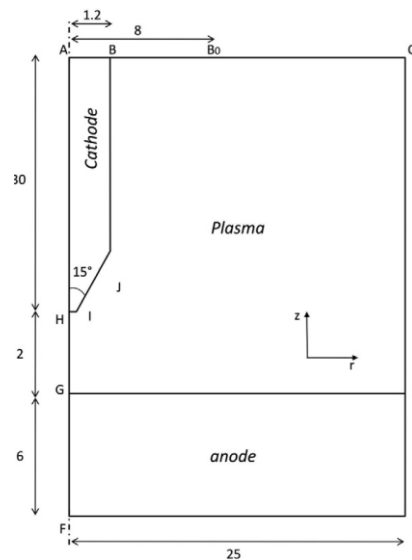


Figura 2. Domínio utilizado para o modelo 2D no modelo posicionado acima da superfície de trabalho (Traidia, *et al.*, 2012)

Os resultados da simulação 2D no trabalho de Traidia, *et al.* (2012) auxiliaram na aplicação do modelo 3D, que utilizou o COMSOL Multiphysics e subrotinas do MATLAB para geração caracterização da poça de fusão, determinando as condições de contorno a partir de um estudo de caso. Em comparação com os dados experimentais, observou-se que o modelo bidimensional previu corretamente as condições, gerando resultados condizentes com o ensaio experimental. O modelo híbrido também apresentou previsões de formato de cordão, temperatura máxima e ciclos térmicos relativamente boas, porém os resultados numéricos estimaram taxas de resfriamento maiores que o experimento, o que segundo os autores é uma possível consequência do valor assumido de emissividade térmica do ânodo.

2.2. Modelos 3D

Os modelos 3D são normalmente modelagens mais complexas quanto aos parâmetros de entrada, considerando mais efeitos do processo. Cadiou, *et al.* (2020) realizaram uma modelagem 3D multifísica de um processo de deposição CMT, analisando os fenômenos físicos que ocorrem no arame, no arco elétrico e na poça de fusão. Os autores descreveram o método como sendo a análise da interface entre o gás de proteção e uma fase metálica única, que inclui o arame, o substrato depositado e a poça de fusão. Para o trabalho, foi utilizado o software de simulação COMSOL Multiphysics versão 5.4 para a modelagem, descrevendo o processo de deposição de uma camada da parede. O domínio utilizado para o modelo está representado na Fig. 3, com as divisões em 8 partes presentes (incluindo o domínio do arame), com a representação da interface entre o gás de proteção e o eletrodo modelado utilizando o LSM. As condições de contorno definidas em cada domínio para aproximação do modelo e as simplificações adotadas para a redução do tempo de simulação são feitas de acordo com a abordagem dos efeitos em cada domínio. A geometria obtida do primeiro cordão na simulação foi comparada geometricamente com o processo experimental, atingindo boas concordâncias entre as dimensões e os fenômenos do processo de deposição do cordão.

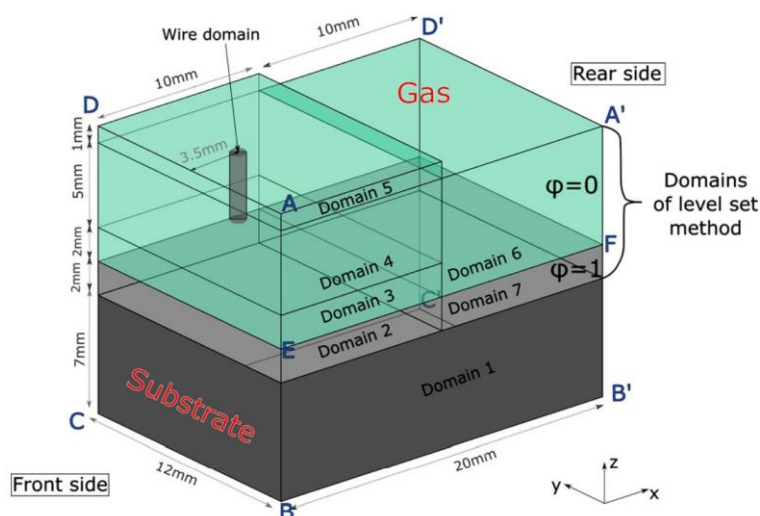


Figura 3. Geometria adotada para os domínios do modelo computacional (Cadiou, *et al.*, 2020)

Na análise dos resultados do trabalho de Cadiou, *et al.* (2020), constatou-se uma boa precisão do comportamento do campo de temperatura previstos pela simulação, além de obter uma boa visualização do comportamento do arco elétrico, do processo de transferência de material para a poça, do comportamento da poça de fusão e do escoamento do material fundido ao longo de todo o período de análise da deposição do cordão. Apesar disso, o modelo acaba sendo inviável para uma análise completa da manufatura de uma peça, sendo que para 6 s do processo, a simulação teve um tempo de cálculo de 360 h.

Devido ao alto tempo exigido nas simulações multifísicas, muitas vezes opta-se por uma análise específica de algum efeito do processo. Geng, *et al.* (2020) formularam um modelo térmico por elementos finitos para representação da deposição de diferentes ligas Al-Cu no processo GTAW pulsado para determinar a distribuição de calor no processo WAAM e obter parâmetros de solidificação. Após essa análise, simulações utilizando o PFM foram feitas incorporando os parâmetros de solidificação para determinar o gradiente de pressão e a velocidade de solidificação, avaliando assim a evolução da microestrutura. Uma interação entre os modelos FEM e PFM foi realizada posteriormente, permitindo assim a determinação de regiões de micro-segregação de cobre. Além disso, foi constatado que o aumento da corrente elétrica e a velocidade de deslocamento do substrato durante a deposição contribuem no aumento da solubilidade do cobre no interior das estruturas dendríticas formadas.

Lu, *et al.* (2020) abordam uma análise termo-fluido, utilizando uma metodologia para a redução da estrutura e o número de equações descritivas com o intuito de reduzir o custo computacional e diminuir o tempo de simulação. Para isso um domínio de análise reduzido foi criado, para verificar os efeitos mais relevantes do processo de deposição. As simulações foram feitas para a deposição de uma camada e para camadas vizinhas em direções opostas. Os resultados foram confrontados com modelos completos para comparação de resultados e tempo de simulação. Para a simulação da deposição de um cordão unidirecional, a redução de tempo em 66,30% (155,5 h para 52,4 h) com a simulação apresentando uma variação de 11,00% do modelo reduzido. Quanto à simulação multidirecional, a redução foi de 58,12% (391,3 h para 133,7 h) com uma variação de 7,50% do modelo reduzido.

A pesquisa de Wu, *et al.* (2017) analisou o efeito da poça de fusão na geração da microestrutura e nas propriedades mecânicas na deposição de Ti-6Al-4V através do processo GTAW-WAAM. Além dos ensaios experimentais, também foi criado um modelo computacional para uma análise térmica, com intuito de identificar a zona termicamente afetada ao

longo do ciclo térmico no processo de deposição. Para o modelo, utilizou-se o software ABAQUS, realizando um modelo de bloco para a região de deposição do cordão com elementos tetraédricos de 8 nós (DC3D8). A malha foi mais refinada na região de geração do arco elétrico e da fonte de calor para captar melhor o gradiente ao redor da região de fechamento do arco (Fig. 4a), com elementos mais grosseiros nas regiões mais externas do substrato, como apresentada na Fig. 4c. Uma subrotina DFLUX foi utilizada para gerar uma fonte de calor móvel, representando o movimento da tocha. Para determinar a precisão dos resultados da simulação foi realizada uma análise da temperatura, da taxa de resfriamento e do gradiente de temperatura obtidos na simulação nos pontos selecionados (Fig. 4e), tais valores foram comparados com dados experimentais.

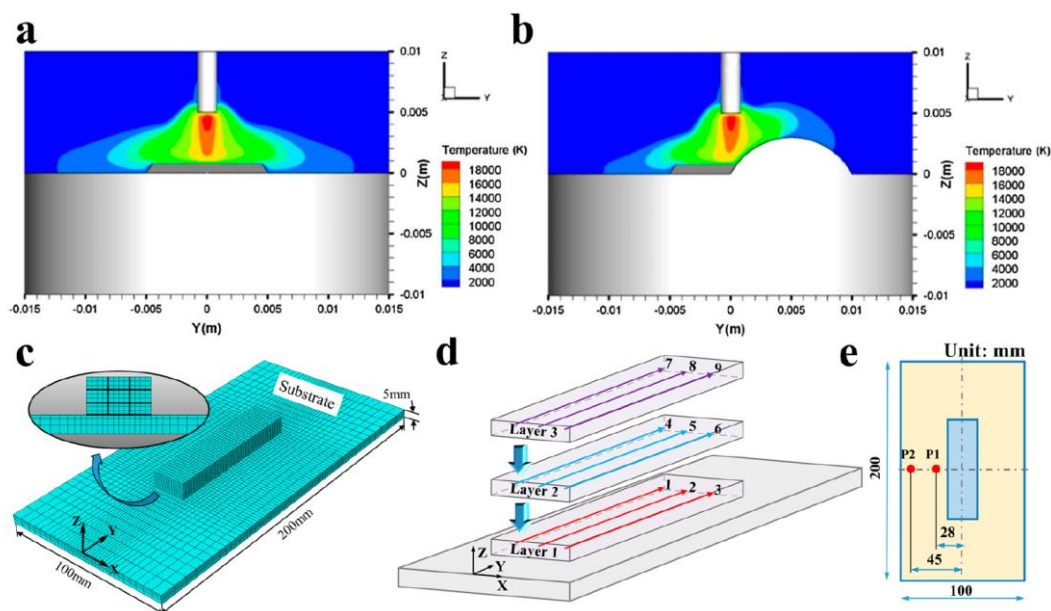


Figura 4. Resultados da simulação para: (a) passe único; (b) sobrepasso; (c) malha gerada para o modelo de análise térmica; (d) sequência de deposição das camadas; (e) pontos de medição para comparação dos resultados (Wu, *et al.*, 2017)

Segundo Wu, *et al.* (2017), os dados de taxa de resfriamento e gradiente de temperatura foram obtidos e utilizados na previsão da morfologia granular gerada nos pontos de medição, através de mapas de solidificação. Essas previsões foram comparadas com as análises microestruturais, atingindo resultados similares da constituição. Com a previsão correta das constituições granulares, é possível realizar previsões igualmente satisfatórias quanto às propriedades mecânicas atingidas no processo, sendo possível otimizar parâmetros no processo de manufatura aditiva GTAW-WAAM afim de obter a composição microestrutural mais recomendada para aplicação.

Outro modelo criado para simulação térmica, que pode ser aplicado em processos WAAM, é apresentado por Nijhuis, *et al.* (2021) utilizando o DGM para discretização espacial através de elementos finitos. A implementação numérica foi realizada no MATLAB, e o objetivo do trabalho foi relacionar os efeitos térmicos gerados pelos seguintes fatores: parâmetros do processo, modo de deposição, resposta térmica do substrato e do material já depositado, de forma a reduzir o acúmulo de calor excessivo, que pode causar tensões residuais e distorções na estrutura depositada. O método DGM é utilizado para a discretização por permitir dados contínuos de temperatura ao longo dos elementos, prevenindo erros de interpolação e aumentando a precisão dos resultados gerados.

Outra diferença deste modelo citada pelos autores, Nijhuis, *et al.* (2021), é a possibilidade de análise de um modelo multicamadas, com aporte de calor constante sendo aplicado e considerando a influência nas camadas previamente depositadas. O trabalho abordou um exemplo simplificado, simulando o resfriamento de uma haste, indicando as características descontínuas presentes no campo de temperatura ao longo do tempo. Além disso, foram abordadas as simulações da deposição de um cordão (separadamente) e de uma parede com 10 cordões, indicando a capacidade do método em realizar uma análise do processo em larga escala. Para validação do método, utilizou-se como base os resultados experimentais de outro trabalho (Ding, *et al.*, 2011) na deposição de 4 camadas de 60 mm de comprimento, 5 mm de largura e 2 mm de espessura com velocidade de 8,33 m/s e tempo de interpasses de 400 s. Para comparação 4 pontos distribuídos em posições ao longo da camada depositada foram escolhidos para aferição da temperatura em função do tempo, a comparação dos dados computacionais com os experimentais pode ser observada na Fig. 5 (Nijhuis, *et al.*, 2021).

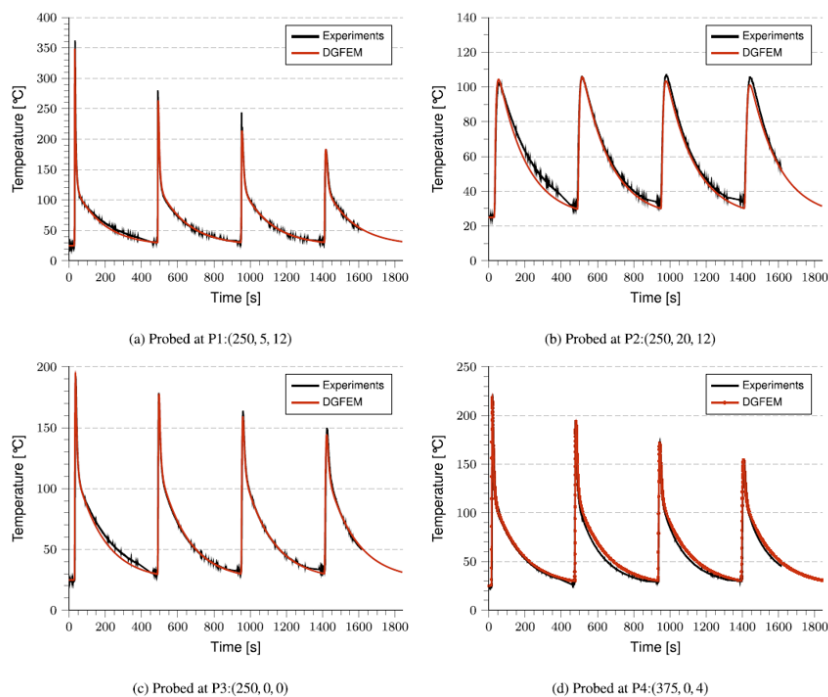


Figura 5. Comparação entre os resultados obtidos com o modelo DGM utilizando elementos finitos e os dados experimentais (Nijhuis, *et al*, 2021)

Os dados obtidos no trabalho Nijhuis, *et al.* (2021), tanto nos picos de temperatura, quanto nas taxas de aquecimento e resfriamento coincidiram precisamente. Isso comprova que a metodologia utilizada para discretização, as condições de contorno impostas no problema e as suposições iniciais foram corretas, os dados de propagação de calor ao longo do domínio também foram corretamente previstos. O processo em análise tem a duração real de 30 min 40 s e a simulação teve a duração de 11 h 49 min. Os autores compararam ainda com o método de simulação FE, realizado no ABAQUS, para o mesmo problema sem utilizar o DGM, resultando em um tempo de simulação de 51 h 24 min, demonstrando assim a eficiência do modelo utilizado para o propósito.

Quanto aos métodos de resfriamento, a simulação computacional pode ajudar a otimizar o resfriamento, permitindo abordar diferentes métodos e compará-los de forma mais detalhada. Hackenhaar, *et al.* (2020) abordam uma modelagem em elementos finitos para um sistema de resfriamento por jateamento de ar implementado em um sistema GMAW-WAAM. Os ensaios computacionais foram acompanhados dos ensaios experimentais utilizando o sistema com diferentes tempos de interpasse, comparando o histórico térmico registrado pela simulação com o obtido experimentalmente. O sistema foi ainda comparado com o resfriamento natural por convecção livre, comparando a eficiência entre os processos. Uma comparação dos resultados para dois pontos de medição foi feita, analisando o processo de deposição com convecção e com o jateamento de ar para um tempo de 120 s de interpasse. As simulações apresentaram resultados condizentes com os ensaios experimentais e mostraram que o sistema de jateamento de ar é efetivo para o controle da temperatura de interpasse, parâmetro importante na manufatura aditiva para a qualidade do processo.

Simulações também podem ser usados para previsão de distorções e tensões residuais que surgem durante a fabricação da peça, devido aos altos gradientes térmicos aos quais a peça está submetida. Huang, *et al.* (2020) analisam esses efeitos através do uso de elementos finitos, comparando os métodos para refinamento dinâmico da malha, a interação do substrato no problema e o processamento gráfico pela GPU (GPU-code). Duas configurações de parede foram analisadas para cada método, sendo constituídas por 4 e 20 camadas e os modelos computacionais foram comparados com os ensaios experimentais. Os três métodos apresentaram boas previsões na previsão das tensões residuais e das distorções em comparação aos dados experimentais, onde o GPU-code apresentou menor tempo de simulação (0,6 h no modelo de 4 camadas e 2 h no modelo de 20 camadas), seguido pelo método de refinamento de malha dinâmico (2,1 h para 4 camadas e 16,4 h para 20 camadas) e por último o método de interação do substrato (6,3 h para 4 camadas e 60,5 h para 20 camadas).

3. CONCLUSÕES

Os modelos computacionais direcionados para deposição de material por arco elétrico têm importante papel na otimização e estudo do processo, atuando como uma importante fonte de compreensão, correção e otimização de parâmetros. Sendo assim, pôde-se constatar com o estudo apresentado que:

- Modelos térmicos computacionais podem auxiliar em uma previsão da microestrutura do material, devido às caracterizações precisas dos campos de temperatura apresentados. Torna-se possível otimizar os parâmetros através da simulação com o objetivo de obter o produto com as características mecânicas e composição microestrutural corretas para a aplicação desejável.
- A utilização do método DGM no modelo térmico, em específico, apresentou resultados com maior precisão, indicando ser uma boa escolha para estudos futuros.
- Um dos principais limitantes dos modelos computacionais multifísicos completos é a necessidade de alta capacidade de processamento, o que torna ainda inviável em procedimentos de deposição mais complexos. Porém, com a melhor compreensão dos efeitos devido as simulações computacionais, simplificações podem ainda ser implementadas, reduzindo a demanda computacional e mantendo a qualidade dos resultados em um parâmetro aceitável.
- O uso de modelos híbridos 2D-3D mostraram-se uma boa escolha para direcionar e otimizar o uso de processamento computacional, com o foco nos efeitos que necessitam ser mais bem avaliados.
- Novos produtos e tecnologias podem ser inicialmente testados em modelos computacionais, para constatar a eficiência da aplicação e facilitar os procedimentos experimentais.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Departamento da Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB).

5. REFERÊNCIAS

- Abe, T., Kaneko, J. and Sasahara, H. 2020. "Thermal sensing and heat input control for thin-walled structure building based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing". *Additive Manufacturing*, Vol. 35, p. 1-8.
- Amiri, H. A. and Hamouda, A. A. 2013. "Evaluation of level set and phase field methods in modeling two phase flow with viscosity contrast through dual-permeability porous medium". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 52, p. 22-34.
- Baggag, A., Atkins, H. and Keyes, D. 2000. "Parallel Implementation of the Discontinuous Galerkin Method". *Parallel Computational Fluid Dynamics*, North-Holland, P. 115-122.
- Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., Zhou, X., Diao, C., Bridgeman, P., Hönnige, J.R., Zhang, H. and Williams, S. 2018. "Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 124, p. 504-516.
- Cadiou, S., Courtouis, M., Carin, M., Berckmans, W. and Le masson, P. 2020. "3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam)". *Additive Manufacturing*, Vol. 36, p. 1-11.
- Chen, L.Q. 2007. "Multiscale Materials Modelling Fundamentals and Applications: Chapter 3 - Phase-field modelling of material microstructure". Woodhead Publishing.
- Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Sequeira Almeida, P.M., Wang, F. and Williams, S. 2011. "Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts". *Computational Materials Science*, Vol. 50, p. 3315-3322.
- Geng, R., Du, J., Wei, Z. and Ma, N. 2020. "Multiscale modelling of microstructure, micro-segregation, and local mechanical properties of Al-Cu alloys in wire and arc additive manufacturing" *Additive Manufacturing*, Vol. 36.
- Hackenhaar, W., Mazzaferro, J.A.E., Montevecchi, F., Campatelli, G. 2020. "Na experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing". *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 52, p. 58-65.
- Hauser, T., Reisch, R.T., Breese, P.P., Nalam, Y., Joshi, K.S., Bela, K., Kamps, T., Volpp, J. and Kaplan, A.F.H. 2021. "Oxidation in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys". *Additive Manufacturing*, Vol. 41.
- Huang, H., Ma, N., Chen, J., Feng, Z. and Murakawa, H. 2020. "Toward large-scale simulation of residual stress and distortion in wire and arc additive manufacturing". *Additive Manufacturing*, Vol. 34.
- Leary, M. 2020. "Design for Additive Manufacturing: Chapter 6 - Topology optimization for AM". Elsevier.
- Li, J., Zhou, X., Brochu, M., Provatas, N. and Zhao, Y.F. 2020. "Solidification microstructure simulation of Ti-6Al-4V in metal additive manufacturing: A review". *Additive Manufacturing*, Vol. 31, 100989.
- Lu, Y., Jones, K.K., Gan, Z. and Liu, W.K. 2020. "Adaptive hyper reduction for additive manufacturing thermal fluid analysis". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 372.
- Moaveni, S. 2008. "Finite Element Analysis: Theory and application with ANSYS". Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 3rd Ed.
- Nijhuis, B., Geijselaers, H.J.M. and van den Boogaard, A.H. 2021. "Efficient thermal simulation of large-scale metal additive manufacturing using hot element addition". *Computers and Structures*, Vol. 245.
- Özişik, M., Orlande, H., Colaço, M. and Cotta, R. 2017. "Finite difference methods in heat transfer", 2nd Edition. CRC Press.

- Qin, R.S. and Bhadeshia, H.K. 2010. "Phase field method: Review". *Materials Science and Technology*, Vol. 26, No.7, p. 803-811.
- Shukla, P., Dash, B., Kiran, D.V. and Bukkapatnam, S. 2020. "Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process". *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, p. 725-729.
- Traidia, A., Roger, F., Guyot, E., Schroeder, J. and Lubineau, G. 2012. "Hybrid 2D-3D modelling of GTA welding with filler wire addition". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, Issues 15–16, p. 3946-3963.
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J. and Norrish, J. 2018. "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 35, p. 127-139.
- Wu, Q., Lu, J., Liu, C., Fan, H., Shi, X., Fu, J. and Ma, S. 2017. "Effect of Molten Pool Size on Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy". *Materials*, Vol. 10, 749.
- Zhao, Y. and Chung, H. 2018. "Numerical simulation of the transition of metal transfer from globular to spray mode in gas metal arc welding using phase field method". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 251, p. 251-261.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

IMPORTANCE OF SIMULATION METHODS IN WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING

André Luiz Brito Novelino
Guilherme Caribe de Carvalho
Maksym Ziberov

University of Brasilia, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Zip code 70910-900, Brasilia-DF.
andre_novelino@hotmail.com
gccarval@unb.br
mziberov@unb.br

Abstract. Metal Additive Manufacturing attract great interesting in academic research and industrial segments. As one of studies tools, computational models with different approaches and methodologies are created and validated contributing for evolution and comprehension of the process. The objective of this paper is to introduce a review about methods used in Wire and Arc Additive Manufacturing simulation modelling; present some simulations results followed by experimental validations, the contributions of process optimization and the main challenges and issues that the methods have. It was noted that most of models obtained good predictions compared with experimental results, shown to have reliability for the proposed applications. However, some complex models showed to be infeasible yet due to its need of a large computational processing capacity hindering its use in large scale.

Keywords: Additive Manufacturing, Wire Arc, WAAM, Simulation.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.