

Capítulo 4 - DOI:10.55232/10830014.4

**A ADOÇÃO DE SOLUÇÕES COMPUTACIONAIS NO
PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA DE METAIS.**

**Daysianne Kessy Mendes Isidório, Matheus Emerick de Magalhães,
Antonio Augusto Martins Pereira Junior, Arquimedes Lopes Nunes Filho**

RESUMO: A manufatura aditiva metálica (MAM) é uma técnica de fabricação camada por camada de uma peça a partir de um modelo CAD. Os processos de MAM são bastante complexos por serem multifísicos. O uso de modelagens e simulações computacionais mostram-se como ferramentas interessantes para entendimento do processo. Em MAM são utilizados softwares computacionais baseados em modelos matemáticos para simulações térmicas, mecânicas e metalúrgicas. No presente trabalho, descrevemos os métodos e soluções computacionais mais utilizadas em MAM.

Palavras-chave: manufatura aditiva; simulação; phase-field; CALPHAD; método dos elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D de peças metálicas, denominada manufatura aditiva, (do inglês Additive Manufacturing - AM), é uma técnica escalável de fabricação de componentes que utiliza uma fonte de calor para fundir o material metálico, que a partir de um modelo CAD, a impressão camada por camada do objeto é realizada.

Essa tecnologia apresenta várias vantagens quando comparada a métodos convencionais de fabricação de peças metálicas, como fundição e forjamento, tais benefícios são baixo desperdício de matéria prima, alta flexibilidade do equipamento e curto ciclo de produção.

Apesar de tais benefícios, fabricação de peças por AM é complexa e envolve diferentes ciclos térmicos, tensões residuais e cinéticas microestruturais, tornando uma necessidade o domínio de conhecimento físico, mecânico e metalúrgico avançado do processo.

A fim, de estudar, simular e otimizar os processos de AM, vários programas computacionais tem sido desenvolvidos com base em banco de dados termomecânicos e metalúrgicos e modelagens matemáticas.

O presente trabalho irá apresentar brevemente definições e classificações dos processos de AM, além de exemplificar os principais métodos e softwares utilizados para estudos termodinâmicos, microestruturais e mecânicos dos processos de AM.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

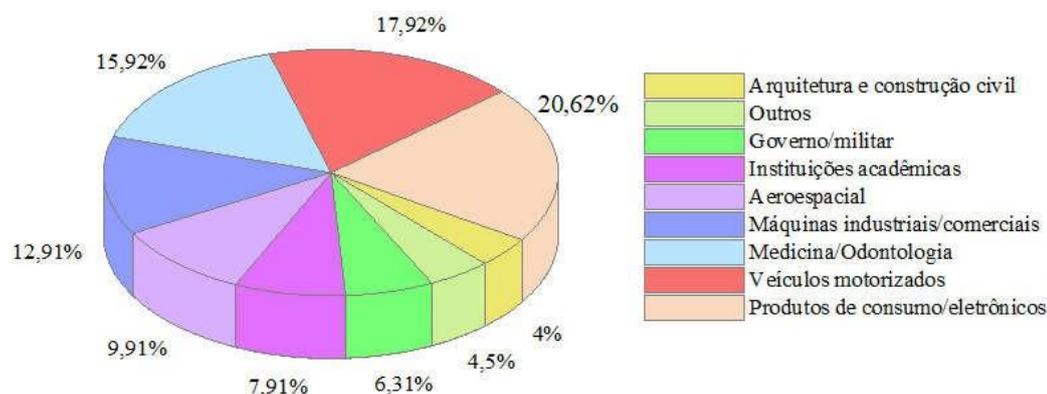
2.1 Manufatura Aditiva

A AM é definida segundo a ASTM como um processo de união de materiais para fazer objetos a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição às metodologias de fabricação subtrativas (FRAZIER, 2014).

A manufatura aditiva permite a criação de peças e produtos com características complexas, que não poderiam ser facilmente produzidos por meio de processos de fabricação subtrativos ou outros processos tradicionais (DIEGE, 2014). Isso fez com que

nos últimos 30 anos, o uso de AM crescesse bastante em diversos setores industriais. A Figura 1 apresenta um gráfico das áreas que utilizam AM (XIN *et al.*, 2021).

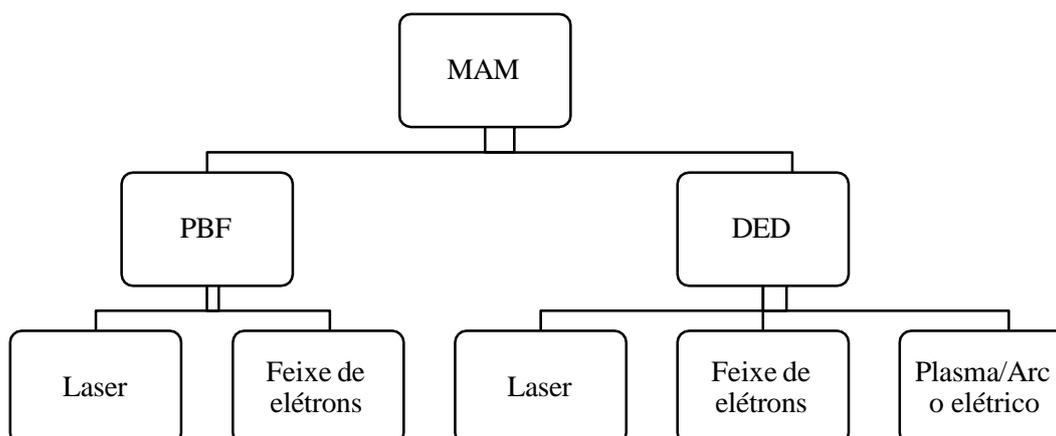
Figura 1 – Áreas que utilizam AM (adaptada de DIEGE (2014)).



Inicialmente a AM foi mais utilizada com materiais poliméricos, mas com o aperfeiçoamento da técnica para a produção de peças metálicas despertou grande interesse nos últimos anos (ÇAM, 2022). Os principais processos de manufatura aditiva de metais (do inglês Metal Additive Manufacturing – MAM) são fusão em leito de pó (do inglês Powder Bed Fusion -PBF) e deposição de energia direcionada (do inglês Directed Energy Deposition - DED) (SVETLIZKY *et al.*, 2021).

No processo de PBF, a criação da peça utiliza um laser ou um feixe de elétrons para fundir um leito de pó metálico segundo um modelo CAD que será construído camada sobre camada (SELEMA; IBRAHIM; SERGEANT, 2022). Enquanto no processo DED, a matéria-prima na forma de pó ou arame e a fonte de energia para fusão (laser, feixe de elétrons ou plasma/arco elétrico) são focados simultaneamente em direção a um substrato, formando uma pequena poça de fusão e depositando material continuamente, camada por camada, segundo um modelo de CAD (SVETLIZKY *et al.*, 2021). A Figura 2 apresenta de um diagrama esquemático dos processos principais de MAM e suas subdivisões.

Figura 2 – Diagrama esquemático dos processos principais de MAM e suas subdivisões.



Para ter um bom controle da tecnologia de MAM é preciso conhecer profundamente sobre fenômenos térmicos, metalúrgicos e mecânicos que estão acontecendo simultaneamente durante a fabricação da peça. Dessa forma, a fim de reduzir custos operacionais, otimizar as propriedades dos materiais utilizados e ter controle operacional muitos softwares computacionais são utilizados para modelagem e simulação de peças fabricadas por WAAM (PARK *et al.*, 2018). Na seção a seguir, citaremos os softwares computacionais mais utilizados em MAM, suas funcionalidades e algumas pesquisas que os utilizaram.

2.2 Soluções Computacionais Utilizadas em MAM

Reduzir o número de experimentos leva a diminuição de custos para projetar e otimizar materiais, assim o uso de modelagens e simulações computacionais mostram-se como ferramentas interessantes para entendimento do processo, materiais e tratamentos térmicos que resultam nas propriedades finais do produto acabado.

Com o avanço da computação e da capacidade de processamento, o uso de soluções numéricas como simulações que utilizam o Método de Elementos Finitos (MEF) têm sido bastante utilizadas para investigações na Indústria 4.0, especificamente nos processos de MAM. Em MAM são utilizados softwares computacionais baseados em modelos matemáticos para simulações térmicas, mecânicas e metalúrgicas: para análises

térmicas e mecânicas o MEF tem sido o mais utilizado, enquanto para análises metalúrgicas tem-se o método CALPHAD e phase-field.

O método dos elementos finitos (MEF) é um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos e que são descritos por meio de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno que são resolvidas por meio de equações matriciais (MELCONIAN, 2014). Kurian, Arivazhagan e Senthikumar (2014) a partir do uso de MEF determinaram a distribuição de temperatura no processo de fusão à laser de pó de aço 316L. Como o processo de WAM envolve um grande ciclo térmico há então a geração de muitas tensões residuais, BARLETT *et al.* (2018) estudaram a variação sistemática de tensões residuais de uma peça de aço inoxidável fabricada por fusão seletiva à laser.

O modelamento matemático da estabilidade de fases e das transformações de fase em materiais de engenharia é uma importante ferramenta para o desenvolvimento ou otimização do seu processamento (GARZÓN; TSCHIPTSCHIN, 2006). Kaufman e Bernstein foram os primeiros a desenvolver um modelamento termodinâmico, fundando o grupo CALPHAD (Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry).

O objetivo do grupo CALPHAD é desenvolver programas computacionais usando a termodinâmica computacional para: (i) representar as propriedades termodinâmicas de sistemas multicomponentes; (ii) avaliar e validar dados experimentais (e teóricos) para incorporá-los às bases de dados auto-consistentes, (iii) modelar processos tecnológicos (THERMO-CALC, 2022). Os principais softwares comerciais baseados no método CALPHAD utilizados em MAM estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais softwares comerciais baseados no método CALPHAD utilizados em MAM (adaptada de GARZÓN; TSCHIPTSCHIN, 2006).

Software	Funcionalidades	Alguns trabalhos que utilizaram o software
ThermoCalc®	Cálculo de diagramas de fase e cálculo do equilíbrio termodinâmico.	SRIDHARAM <i>et al.</i> (2019) SCAGLIONE <i>et al.</i> (2022)

	Tem 22 bases de dados e 30 modelos de solução diferentes.	WANG <i>et al.</i> (2021)
JmatPro®	Calcula equilíbrio de fases, cinética de solidificação, transformações de fases, propriedades mecânicas e físicas.	GRAF <i>et al.</i> (2018) QI <i>et al.</i> (2021) OLOVSJO <i>et al.</i> (2012)
DICTRA®	Acrônimo do inglês para Diffusion Controlled Transformations. Usado para simulação de reações cinéticas de transformações difusionais.	KELLER <i>et al.</i> (2017) SRIDHARAM N. <i>et al.</i> (2019) GALICKI <i>et al.</i> (2019)
FactSage®	É uma fusão do FACT e ChemSage. É usado para cálculo do equilíbrio termodinâmico. Tem 11 modelos de solução diferentes, 4400 compostos e 3400 substâncias puras (SGTE).	ROSHAN <i>et al.</i> (2019) YANG <i>et al.</i> (2021) YALCIN; DERIN; AYDOGAN, (2022)

Outro método bastante utilizado para simulações computacionais em WAAM é método de phase-field. O método de phase-field é utilizado para modelagem de transformação de fase e evolução microestrutural em sólidos (ZHU *et al.*, 2002). Esse método envolve reações eletroquímicas, deformações mecânicas e mecânica da fratura, além disso evolução de domínios ferro-elétrico e magnético (CHOUDHURY, 2017).

Um dos softwares utilizados em WAAM baseados no método de phase-field é o MICRESS®. O MICRESS® é um software que permite o tratamento de problemas multifásicos, multigrãos e multicomponentes nas áreas de solidificação, crescimento de grãos, recristalização e transformações de fase de estado sólido (MICRESS, 2022). Kumara *et al.* (2019), utilizando o software MICRESS®, investigaram a formação da microestrutura (crescimento dendrítico, segregação de elementos e formação de fase) no processo DED à pó de metal a laser da liga de níquel (718) (KUMARA *et al.*, 2019). YANG *et al.* (2021) estudaram o efeito da superfície oxidada na fusão e solidificação de

pós de aço inoxidáveis 316L utilizado em AM (YANG *et al.*, 2014). Pelo uso do MICRESS®, OKUGAWA *et al.* (2022), ao estudar o refino de grão da liga hipoeutética alumínio-silício, viram que partículas cristalinas de Si permanecem próximas à linha de fusão mesmo após o rápido processo de refusão, servindo como sítios de nucleação heterogêneos no processo de resolidificação (OKUGAWA *et al.* 2022).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Torna-se evidente que o advento da AM proporcionou ao mercado de diversos segmentos industriais uma revolução nas áreas de estudo envolvendo metalurgia, computação e automação. Além de que a concentração de pesquisas e investimentos na área AM com metais possibilitou o desenvolvimento de peças que antes não eram possíveis pelos métodos de fabricação tradicionais. Esse e outros fatores colaboraram para o avanço na criação de softwares para modelagem de parâmetros e etapas do processo de MAM, como o ThermoCalc, o JmatPro, o DICTRA e o FactSage. Também impulsionou a criação do MICRESST baseado no método phase-field, tendo como objetivo sanar problemas relacionados à parâmetros microestruturais e de composição. Desse modo, ver-se a interdependência de diversas áreas para o avanço de MAM.

REFERÊNCIAS

BARLET *et al.* Revealing mechanisms of residual stress development in additive manufacturing via digital image correlation. *Additive Manufacturing*, v. 22, p.1-12, 2018.

ÇAM, G. Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p.77-85, 2022.

CHOUDHURY, A. Phase-Field Modeling as a Method Relevant for Modeling Phase Transformation During Interdiffusion. In *Handbook of Solid State Diffusion*. Elsevier, 2017. v.1, p. 363-389.

DIEGE, O. Advances in Additive Manufacturing and Tooling. In *Comprehensive Materials Processing*. Elsevier; 2014. p.3-18.

FRAZIER, W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 23, p. 1917–1928, 2014.

GALICKI, D. et al. Localized Changes of Stainless Steel Powder Characteristics During Selective Laser Melting Additive Manufacturing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 50, p. 1582-1605, 2019.

GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN, A. P. Modelamento termodinâmico e cinético por meio do método Calphad do processamento térmico e termoquímico de aços. *Matéria*, v. 11, 2006.

GRAF et al. Thermo-Mechanical Modelling of Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Semi-Finished Products. *Metals*, v.12, p. 1009-1019, 2018.

KELLER, T. et al. Application of finite element, phase-field, and CALPHAD-based methods to additive manufacturing of Ni-based superalloys. *Acta Materialia*, v. 139, p. 244-253, 2017.

KUMARA, C. et al. Microstructure modelling of laser metal powder directed energy deposition of alloy 718. *Additive Manufacturing*, v. 25, p. 357-364, 2019.

MELCONIAN, M. V. Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos. São Paulo: Editora Edgard Blücher, p. 25-64, 2014.

MICRESS. The Microstructure Evolution Simulation Software. 2022. Disponível em: <https://micress.rwth-aachen.de/index_extra.html#micress-info>. Acessado em: 17 de ago. 2022.

OKUGAWA, M. et al. Equiaxed grain formation by intrinsic heterogeneous nucleation via rapid heating and cooling in additive manufacturing of aluminum-silicon hypoeutectic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 919, p. 165812-165818, 2022.

OLOVSJO et al. Methodology for evaluating effects of material characteristics on machinability—theory and statistics-based modelling applied on Alloy 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 59, p. 55–66, 2012.

PARK, S. et al. Performance evaluation of open-source structural Analysis Solver, Calculix and Code-Aster, for linear static and contact problems. *ICIC Express Letters*, v. 12, 2018.

QI et al. High strength Al–Li alloy development for laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, v.47, p. 102249-102262, 2021.

ROSHAN, S. et al. Investigation of the interface between SLM processed nickel alloy on a cast iron substrate. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 4, p. 131 – 1421, 2019.

SCAGLIONE, F. et al. Solidification Calculations of Precious Alloys and Al-Base Alloys for Additive Manufacturing. *Metals*, v.12, p. 322- 335, 2022.

SELEMA, A.; IBRAHIM, M. N.; SERGEANT, P. Metal Additive Manufacturing for Electrical Machines: Technology Review and Latest Advancements. *Energies*, v.15, p.1076-1086, 2022.

SRIDHARAM, N. et al. On the potential mechanisms of β to $\alpha' + \beta$ decomposition in two phase titanium alloys during additive manufacturing: a combined transmission Kikuchi diffraction and 3D atom probe study. *Metals & Corrosion*, v. 55, p. 1715-1726, 2020.

SVETLIZKY, D. et al. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, v. 49, p. 271-295, 2021.

THERMO-CALC. Why Choose Thermo-Calc?2022. Disponível em: <<https://thermocalc.com/about-us/why-choose-thermo-calc/>>. Acessado em: 17 de ago. 2022.

WANG, Z. et al. Microstructure evolution and mechanical properties of the Wire + Arc Additive Manufacturing Al-Cu alloy. *Additive Manufacturing*, v. 47, p. 102298-102301 2021.

XIN, H. *et al.* Experiments and numerical simulation of wire and arc additive manufactured steel materials. *Structure*, v. 24, p. 1393-1402, 2021.

YALCIN, M. Y.; DERIN, B.; AYDOGAN, E. Development and additive manufacturing of oxide dispersion strengthened inconel 718: Thermochemical and experimental studies. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 914, p. 165193-165207, 2022.

YANG, X. et al. Effect of Surface Oxides on the Melting and Solidification of 316L Stainless Steel Powder for Additive Manufacturing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 52, p. 4518–4532, 2021.

YANG, X. et al. Oxide Evolution During the Solidification of 316L Stainless Steel from Additive Manufacturing Powders with Different Oxygen Contents. *Metallurgical and Materials Transactions*, v.52, p. 2253–2262, 2021.

ZHU, J. et al. Linking phase-field model to CALPHAD: application to precipitate shape evolution in Ni-base alloys. *Scripta Materialia*, v. 46, p. 401–406, 2002.