



APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM MANUFATURA ADITIVA DE METAL

Palavras-Chave: Manufatura Aditiva, Simulação Computacional, Distorção e Tensões Residuais

Autores:

Marcela Rodrigues, FCA – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). Eduardo Paiva Okabe (orientador), FCA – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). Jaime Hideo Izuka (coorientador), FCA – UNICAMP

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) metálica tem se consolidado como uma alternativa eficiente para a produção de peças com geometrias complexas, promovendo economia de material e redução de etapas produtivas. Dentre as tecnologias disponíveis, destacam-se os processos baseados em fonte de energia direcionada, como o *Directed Energy Deposition* (DED), e os processos de fusão em leito de pó, como o *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF). Ambos demandam um controle rigoroso dos parâmetros térmicos, já que o aquecimento localizado e os gradientes de temperatura afetam diretamente a formação da microestrutura, as propriedades mecânicas e a integridade dimensional das peças (Rodrigues et al., 2017). Nesse contexto, a análise térmica e estrutural dos processos, por meio de simulações computacionais, torna-se essencial para prever e otimizar o desempenho dos componentes fabricados.

METODOLOGIA

O presente estudo baseou-se na simulação computacional por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) para investigar o comportamento termomecânico de peças metálicas fabricadas por Manufatura Aditiva (MA). As simulações foram realizadas utilizando o software Ansys, que oferece um ambiente integrado para análises acopladas térmico-estruturais específicas para MA.

A metodologia foi dividida em duas etapas, abordando os processos de Fusão em Leito de Pó (PBF) e Deposição por Energia Direcionada (DED), conforme os objetivos do projeto.

Laser Powder Bed Fusion (LPBF), foi simulada a fabricação de um suporte (*bracket*) de geometria complexa, otimizada topologicamente. Utilizou-se a liga de Alumínio AlSi10Mg e o assistente *LPBF Setup Wizard* para definir as etapas do processo, incluindo a construção da peça, o resfriamento, a remoção da base de impressão e a retirada dos suportes.

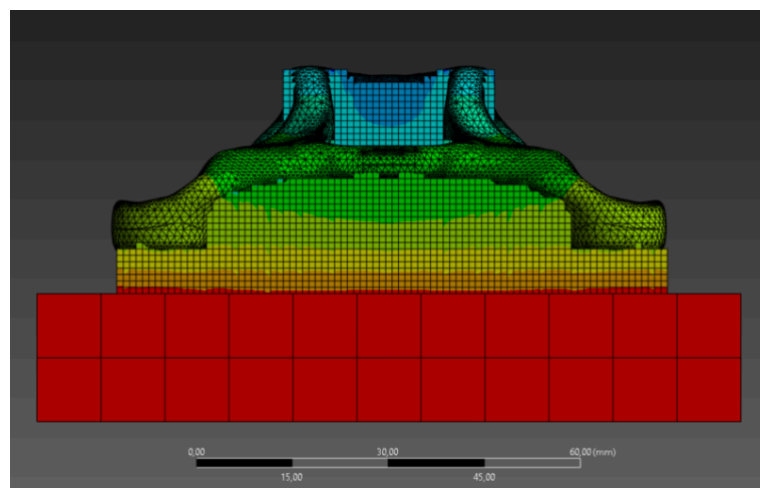
Para o processo de Deposição por Energia Direcionada (DED), foi realizada a simulação da construção de uma peça com geometria do tipo *racetrack*. Visando analisar o impacto da altura da peça no resultado, foram realizadas duas análises distintas para esta geometria: a primeira seguiu a altura padrão do tutorial, enquanto a segunda foi executada com uma altura de deposição superior. O objetivo desta abordagem comparativa foi avaliar a evolução da temperatura, das tensões residuais e da distorção final em função do aumento do número de camadas depositadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da metodologia de simulação permitiu uma investigação aprofundada dos fenômenos termomecânicos nos processos LPBF e DED, revelando a complexa interação entre os parâmetros de processo, a geometria da peça e os resultados estruturais. O objetivo da análise foi não apenas prever, mas compreender os mecanismos que levam à geração de tensões e distorções.

No estudo do processo LPBF, a simulação do suporte (*bracket*) em AlSi10Mg permitiu decompor as causas e os efeitos que governam a precisão dimensional final. Primeiramente, foi analisada a origem das tensões residuais. A análise da deformação plástica equivalente (Figura 1), um resultado estrutural que é consequência direta das cargas térmicas aplicadas, revela uma concentração notável nas primeiras camadas, na interface direta com as estruturas de suporte. Este fenômeno é uma consequência direta dos gradientes térmicos extremos e das altas taxas de resfriamento inerentes ao processo. As camadas iniciais, ao se solidificarem e tentarem contrair sobre a base fria e rígida, são impedidas, gerando um campo de tensões que excede o limite de escoamento do AlSi10Mg. Essa deformação plástica inicial é, essencialmente, a "semente" das tensões residuais que permanecem aprisionadas na peça.

Figura 1. Deformação Plástica Equivalente no suporte LPBF, destacando a concentração nas primeiras camadas.

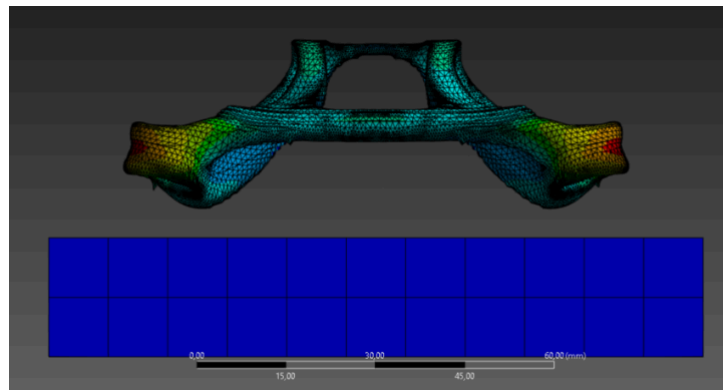


Fonte: Autoria Própria.

O efeito prático dessas tensões aprisionadas se manifesta no final do processo. Conforme simulado na etapa de corte, a remoção da peça do substrato libera a energia de deformação elástica armazenada, que se converte em deformação geométrica. A análise da

distorção total (Figura 4) quantifica este empenamento, demonstrando que as seções menos rígidas e mais esbeltas do *bracket* são as que mais sofrem deslocamentos. A capacidade de prever este comportamento com precisão é de imenso valor industrial, pois permite a criação de geometrias de compensação ou o planejamento de estratégias de suportes mais eficientes para garantir que o componente final atenda às rigorosas tolerâncias dimensionais.

Figura 2. Distorção Total no suporte LPBF após a liberação das tensões residuais.

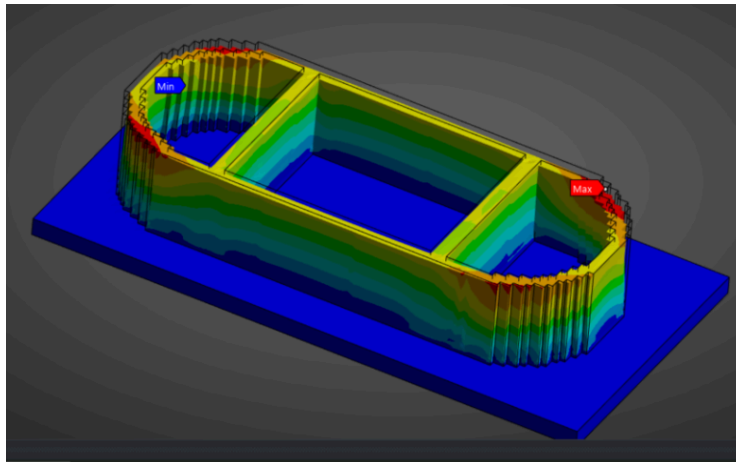


Fonte: Autoria Própria.

Para o processo DED, caracterizado por um aporte térmico mais massivo e localizado, a investigação comparativa foi fundamental. A análise da geometria de menor altura estabeleceu uma linha de base para o comportamento termomecânico, revelando os padrões já esperados de deformação na base e distorção no topo.

Contudo, foi na peça de maior altura que a natureza não linear do processo se tornou evidente. O aumento da altura alterou fundamentalmente o histórico térmico da fabricação. Observou-se que a peça mais alta reteve mais calor, elevando a temperatura de pré-aquecimento das camadas superiores. Isso ocorre porque a distância até o substrato — o principal dissipador de calor — aumentou, dificultando o resfriamento. Este maior aporte térmico acumulado teve duas consequências diretas: (1) o limite de escoamento do material, que diminui com o aumento da temperatura, foi mais facilmente superado, gerando maior deformação plástica na base; e (2) a contração térmica total ao final do processo foi maior, resultando em uma distorção final mais pronunciada nas extremidades (Figura 3).

Figura 3. Distorção Total para a geometria DED de maior altura.



Fonte: Autoria Própria.

Em suma, a simulação demonstrou um forte acoplamento entre a geometria e a resposta termomecânica. O aumento da altura no processo DED não apenas escalonou a distorção de forma linear, mas exacerbou os mecanismos de deformação ao alterar as condições de contorno térmicas. Este resultado comprova que a simulação por MEF é uma ferramenta preditiva indispensável, capaz de capturar nuances complexas do processo e viabilizar a otimização de parâmetros sem a necessidade de dispendiosos testes experimentais.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a eficácia da simulação por elementos finitos como ferramenta preditiva para a análise termomecânica de processos de manufatura aditiva metálica. A metodologia permitiu identificar e compreender os mecanismos fundamentais que levam à geração de tensões residuais e distorção geométrica nos processos LPBF e DED.

Foi verificado que, no processo LPBF, as tensões são primordialmente geradas na interface com as estruturas de suporte devido à restrição da contração térmica, e que sua liberação após o corte da peça resulta em empenamentos que podem comprometer a tolerância dimensional. Para o processo DED, a análise comparativa revelou que a geometria da peça, especificamente a sua altura, é um fator crítico que intensifica o acúmulo de calor, exacerbando os níveis de deformação plástica e a distorção final do componente.

Conclui-se, portanto, que a simulação computacional é uma ferramenta indispensável para a otimização da manufatura aditiva, permitindo antecipar falhas, ajustar estratégias de suporte e parâmetros de processo, reduzindo a necessidade de custosos testes experimentais e acelerando o desenvolvimento de componentes íntegros e precisos.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, Anderson Tadeu de Santi Barbosa de; SOUZA, Gustavo Braz de Cristo; BOTELHO, Vitor de Oliveira. **Manufatura aditiva de materiais metálicos em uma**

produção com foco no cliente. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2023, Bauru. Anais [...]. Bauru: UNESP, 2023.

ANSYS, INC. **Additive Manufacturing Tutorials.** Release 2025 R2. Canonsburg, PA: Ansys, Inc., 2025. Manual.

GIORDANO, Caio Mezzeti; ZANCUL, Eduardo de Senzi; RODRIGUES, Vinícius Picanço. **Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais.** Produção Online, Florianópolis, v. 14, n. 3, p. 1062-1089, 2014.

GOMES, João Francisco Bueno; WILTGEN, Filipe. **Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas.** Tecnologia, [S.l.], 2020.

MENDES, Newton Sérgio Nascimento. **Manufatura aditiva por deposição a arco em leito de fluxo: prova de conceito.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

WILTGEN, Filipe. **Manufatura aditiva em metais – leve, forte e inovador.** Revista de Engenharia e Tecnologia, [S.l.], v. 13, n. 2, jun. 2021.