



INVESTIGAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO PERFIL DE TEMPERATURA EM UM CABEÇOTE MODULAR PARA FABRICAÇÃO ADITIVA POR EXTRUSÃO

SiPGEM-EESC/USP

Arnaldo J. Gomez Cásseres Vega, **Departamento de Engenharia Mecânica, EESC-USP**, gomezcasseres@usp.br
Dávila Moreira Lopes da Silva, **Departamento de Engenharia Mecânica, EESC-USP**, davilamlopes@gmail.com
Eduardo Carvalho, **Departamento de Engenharia Elétrica, EESC-USP**, eduardoak@usp.br
Zilda de Castro Silveira, **Departamento de Engenharia Mecânica, EESC-USP**, silveira@sc.usp.br

RESUMO EXPANDIDO

Embora as impressoras 3D *desktop* destinadas a processos aditivos por extrusão, especialmente utilizando matéria-prima filamentar tenham alcançado grande popularidade, com uso de um conjunto de materiais de base polimérica e certo grau de robustez de reprodutibilidade (Leary, 2020; Justino Netto et al., 2021), a busca pela melhoria e formulação de novos materiais de engenharia ainda é um desafio (Nurhudan, 2021; Gonzalez-Gutierrez et al., 2018).

Nesse contexto, o uso de equipamentos de manufatura aditiva com cabeçotes de extrusão com rosca assistida customizados permitem ampliar a formulação e melhorias de materiais compostos poliméricos, incluindo a fabricação direta de peças e reciclagem de materiais. Essa condição é reforçada pela possibilidade do uso da matéria-prima sob a forma de pós e pellets. Neste contexto, grande parte das propostas apresentadas na literatura e dos equipamentos em escala laboratorial apresentam dimensões reduzidas e portanto, condições geométricas restritivas. Considerando que, sistemas baseados em rosca são dependentes de efeitos termomecânicos, que não controlados podem conduzir a processo de plastificação ineficiente, que resultaria por exemplo, em degradação do material e variações dimensionais (Chiaroni e Silveira, 2019; Zhang et al., 2022; Hutchinson et al., 2024; Shaqour et al., 2024).

Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo numérico para análise de elementos finitos com avaliação do perfil térmico de um cabeçote modular miniaturizado vertical com rosca assistida para fabricação aditiva direta. De forma, complementar foi desenvolvido um sistema de instrumentação para monitoramento e controle passivo de temperatura ao longo dos módulos (que representa o elemento barril). Para a avaliação térmica experimental, o cabeçote modular miniaturizado foi instrumentado com termistores NTC 100k (3950) instalados em furos radiais nos módulos. Esses sensores, compatíveis com o firmware Marlin, utilizam tabelas internas para conversão de sinal, funcionando em regime *plug and play* sem necessidade de calibração individual. Ensaios foram realizados em temperatura ambiente, sem velocidade de rotação na rosca e sem alimentação de material, aplicando-se dois *setpoints* de controle: 200 °C e 215 °C na zona calefatora. As medições foram registradas somente após a estabilização térmica do sistema, alcançada após 40 minutos do início do aquecimento. A partir dessa estabilização, as primeiras leituras foram realizadas e as medições subsequentes ocorreram em intervalos de 40 minutos, tanto no interior dos blocos (furos) quanto na superfície externa. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

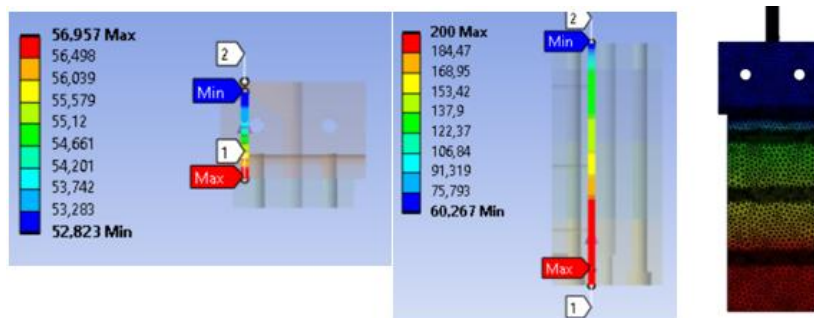
Tabela 1 - Resultados da calibração dos sensores (termoresistências) no barril modular.

Parâmetro	Módulo 1 (°C)	Módulo 1 (°C _{sup})	Módulo 3 (°C)	Módulo 3 (°C _{sup})	Módulo 4 (°C)	Módulo 4 (°C _{sup})	Módulo 5 (°C)
T1_215	55.72	58.34	144.18	138.32	172.47	161.05	214.93
T2_215	56.62	57.43	144.65	138.95	172.7	161.81	215.0
T3_215	56.91	57.86	144.24	139.31	172.6	162.25	215.13
Media_215	56.42	57.88	144.36	138.86	172.59	161.7	215.02
Desv_215	0.51	0.37	0.21	0.41	0.09	0.5	0.08
T1_200	54.58	54.65	135.08	130.1	161.63	151.77	200.12
T2_200	53.52	56.19	134.16	130.43	161.09	151.87	200.05
T3_200	53.41	55.96	134.0	130.05	161.2	151.0	200.14
Media_200	53.84	55.6	134.41	130.19	161.31	151.55	200.1
Desv_200	0.53	0.68	0.48	0.17	0.23	0.39	0.04

Os resultados experimentais evidenciaram um gradiente decrescente de temperatura desde a zona calefatora (Módulo 5) até a zona de alimentação (Módulo 1), tanto nas medições internas quanto superficiais. A modelagem térmica transiente foi implementada no módulo *Transient Thermal* do ANSYS®, considerando a geometria detalhada do cabeçote, incluindo o conjunto completo de módulos metálicos, o módulo de isolamento em PTFE, parafusos de fixação e rosca interna. O modelo geométrico obtido de um programa CAD foi simplificado apenas para remoção de elementos que não interferiam na transferência de calor, preservando todos os caminhos térmicos relevantes.



As propriedades térmicas dos materiais foram atribuídas a partir da biblioteca de materiais do ANSYS®, abrangendo os componentes metálicos, poliméricos e o ar ambiente. As condições de contorno consideraram a aplicação de temperatura prescrita na zona calefatora e convecção natural nas superfícies expostas. Para verificar a independência da malha, aplicou-se o método do *Grid Convergence Index* (GCI), utilizando três níveis de refinamento. O erro relativo entre as malhas média e fina foi de aproximadamente 0,103%. Considerando um fator de segurança padrão $F_s=1,25$ e a razão de refino $r^P \approx 15,38$, obteve-se um valor de $GCI_{21} \approx 0,008953\%$.



O coeficiente de convecção adotado ($h = 16 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) foi determinado por meio de ajuste iterativo entre os resultados numéricos e os dados experimentais, de forma a minimizar a diferença média entre as temperaturas medidas e simuladas. Esse valor mostrou-se adequado para reproduzir o comportamento térmico observado, com diferenças médias inferiores a 2°C em relação às medições internas.

A comparação ponto a ponto entre os resultados numéricos e experimentais demonstrou boa concordância, com erro absoluto médio interno inferior a 2°C e relativo menor que 1,5 %. Conclui-se que o modelo numérico desenvolvido apresenta forte correlação com os resultados experimentais, sendo representativo do comportamento térmico real do cabeçote modular miniaturizado de rosca assistida.

REFERÊNCIAS

CHIARONI, A.B.; SILVEIRA, Z.C. Experimental and numerical evaluation of the temperature profile of a modular extrusion head applied to an experimental 3-D printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, London, v. 105, p. 3381–3395, 2019. doi:10.1007/s00170-019-03859-z.

LEARY, M. *Design for additive manufacturing*. Amsterdam: Elsevier, 2020.

NURHUDAN, A.I. et al. Additive manufacturing of metallic based on extrusion process: a review. *Journal of Manufacturing Processes*, Amsterdam, v. 66, p. 228–237, 2021. doi:10.1016/j.jmapro.2021.04.037.

ZHANG, J. et al. Temperature analyses in fused filament fabrication: from filament entering the hot-end to the printed part. *Additive Manufacturing*, Amsterdam, v. 58, 103019, 2022. doi:10.1016/j.addma.2022.103019.

HUTCHINSON, J. et al. Experimental and numerical investigation of thermal behaviour in commercial 3D printer hotends. *Rapid Prototyping Journal*, Bingley, v. 30, n. 4, p. 745–758, 2024. doi:10.1108/RPJ-05-2023-0178.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a infraestrutura do Lab3D, Lab. Projeto Mecânico e Mecânica Computacional, ambos do SEM-EESC-USP e ao Laboratório de Polímeros do SMM-EESC-USP e aos recursos da bolsa produtividade da orientadora processo CNPq Núm. 130382/2024-8.

RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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