

CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE SUBSISTEMAS DE AQUECIMENTO PARA MANUFATURA ADITIVA DE PEÇAS POLIMÉRICAS DE GRANDE PORTE

João Victor Santos Oliveira¹, Hélio Jacinto Cruz Neto¹, Alexandre Tácito Malavolta¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar),
São Carlos, Brasil (joaovso@estudante.ufscar.br)

Resumo: A manufatura aditiva por extrusão de polímeros em grande escala sofre com gradientes térmicos que causam empenamento e baixa adesão entre camadas. Este trabalho caracteriza experimentalmente dois subsistemas térmicos de uma célula de manufatura aditiva: a mesa térmica de base e o sistema de aquecimento por radiação infravermelha. Testes anteriores do grupo mostraram que temperaturas próximas a 90°C eliminam o empenamento em ABS, e os resultados aqui suportam a integração conjunta dos sistemas.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Controle térmico; Aquecimento infravermelho; Mesa térmica; Qualidade dimensional

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva de polímeros evoluiu rapidamente como tecnologia crítica para a produção de componentes com geometrias complexas e personalizadas. Entre as técnicas mais difundidas estão a Fused Filament Fabrication (FFF) e a Fused Pellet Modeling (FPM), ambas enquadradas na categoria mais ampla de processos de extrusão de material (MEX), nos quais o material polimérico fundido é depositado camada a camada (BALAJI, 2024). Apesar das vantagens em flexibilidade de projeto e eficiência de material, um desafio persistente nesses processos é o gerenciamento dos efeitos térmicos durante a impressão, que influenciam diretamente a qualidade da peça, a integridade mecânica e a precisão dimensional (GONÇALVES et al., 2025).

O controle térmico é um fator determinante para a adesão entre camadas, o acabamento superficial e o desempenho mecânico global em manufatura aditiva de polímeros. O mecanismo de ligação entre camadas depositadas depende do histórico térmico do material, particularmente da temperatura permanecer acima da temperatura de transição vítrea (T_g) por tempo suficiente para permitir a difusão molecular através das interfaces (SUN et al., 2008). Em impressões de grande porte, nas quais o tempo de construção pode ser extenso, os gradientes térmicos tendem a aumentar conforme a peça se afasta da plataforma aquecida, resultando no esfriamento prematuro das camadas previamente depositadas, o que compromete a adesão e leva a fragilidades estruturais.

Estudos recentes (KISHORE et al., 2017; NYCZ et al., 2020; GARDNER et al., 2022; WANG et al., 2024)

exploraram o uso de lâmpadas infravermelhas (IR) como fonte auxiliar de aquecimento aplicada durante o processo de impressão. Ao direcionar radiação térmica controlada sobre a superfície impressa, esses sistemas visam manter a temperatura das camadas previamente depositadas acima da T_g , promovendo melhor difusão molecular e adesão interfacial. Nesse contexto, o grupo de pesquisa do Laboratório de Engenharia Aplicada (LEA) da UFSCar desenvolveu e validou um sistema de aquecimento por radiação IR integrado a uma célula robótica de manufatura aditiva, demonstrando que uma temperatura uniforme próxima a 90°C reduz significativamente o empenamento (warping), melhora a planicidade superficial e aumenta a adesão à plataforma de impressão em peças de ABS, com a configuração ótima de posicionamento das lâmpadas resultando em temperaturas de primeira camada de até 107°C e peças completamente planas e dimensionalmente estáveis (GOVONI et al., 2025).

Como continuidade desse trabalho, identificou-se a necessidade de caracterizar separadamente os dois subsistemas de controle térmico disponíveis na célula robótica antes de sua operação conjunta: a mesa térmica, responsável pelo aquecimento controlado da base de impressão por meio de relé de estado sólido em regime on-off, e o sistema de aquecimento auxiliar por radiação infravermelha, composto por lâmpada tubular posicionada no foco de um refletor parabólico, com potência regulada manualmente por um dimmer. Essa caracterização individual permite identificar a resposta dinâmica de temperatura de cada subsistema, bem como eventuais limitações de uniformidade térmica, antes da etapa de integração física e operação simultânea dos dois sistemas durante a impressão.

O objetivo deste trabalho é apresentar a caracterização térmica experimental da mesa térmica e do sistema de aquecimento por radiação infravermelha de uma célula robótica de manufatura aditiva, avaliando a resposta dinâmica de temperatura de cada subsistema sob diferentes condições de operação. Especificamente, busca-se determinar a faixa de temperatura de regime permanente, a uniformidade espacial do aquecimento e a sensibilidade à distância entre a fonte de calor e a amostra, de modo a subsidiar a definição dos parâmetros de operação conjunta dos dois sistemas em testes futuros de impressão de peças de ABS de parede fina e grande porte.

MATERIAL E MÉTODOS

Os testes foram realizados em uma célula robótica de manufatura aditiva de grande porte (BARBOSA et al., 2023), instalada no Laboratório de Engenharia Aplicada (LEA) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. O sistema é composto por um robô Yaskawa Motoman® GP88, controlado pelo sistema YRC1000, integrado a uma extrusora monorroscas da AX Plásticos®. A extrusora é alimentada gravitacionalmente por meio de um funil contendo material polimérico em forma de pellets, sendo os principais materiais utilizados o ABS, o PLA e o PCL. O polímero é fundido dentro do extrusor e depositado sobre uma mesa de impressão termicamente controlada (GONCALVES et al., 2023), conforme ilustrado na Figura 1.

A mesa térmica possui área útil de 1000 mm × 1000 mm e aquecimento controlado por relé de estado sólido em regime on-off. O monitoramento térmico foi realizado por 11 termopares distribuídos sobre a superfície da mesa, em malha com espaçamento de 200 mm entre pontos centrais e dois pontos adicionais externos à área aquecida, conforme apresentado na Figura 2. Foram conduzidos dois ensaios independentes, com aquisição de temperatura ao longo de todo o período de aquecimento: um ensaio com temperatura de referência de 60°C e um ensaio com temperatura de referência de 90°C, ambos sem controle ativo de resfriamento.

O sistema de aquecimento por radiação infravermelha (GOVONI et al., 2025) é composto por uma lâmpada tubular emissora de radiação IR (marca “Lite Thonics”, 120 V / 500 W, modelo SK15), posicionada no foco de um refletor parabólico fabricado em chapa de aço inox polido, conforme mostrado na Figura 3. Um dimmer de 2000 W foi utilizado para regular a potência de saída da lâmpada, permitindo o controle preciso da temperatura de operação por meio do ajuste manual de um potenciômetro, da potência nula até a capacidade máxima. A caracterização térmica desse subsistema foi realizada com a lâmpada operando em potência máxima, posicionada a quatro distâncias distintas de uma chapa de ABS suspensa por fios de

aço em suas extremidades (70, 50, 35 e 20 cm), em ambiente fechado com mínima interferência externa.

Para o monitoramento térmico sem contato, foi empregado um sensor infravermelho MLX90614, capaz de detectar a temperatura de objetos remotamente por meio da radiação infravermelha emitida, representando uma solução de baixo custo para análise térmica. O sensor possui campo de visão cônico de aproximadamente 90° de abertura, resolução de saída de 10 bits PWM, faixa de medição de -40 a 125°C, precisão de aproximadamente $\pm 0,5^\circ\text{C}$ e tensão de operação entre 3 e 5 VDC. O sensor foi calibrado em relação a um termopar de referência antes dos ensaios, garantindo precisão de medição dentro de $\pm 1,5^\circ\text{C}$ em condições operacionais (GOVONI et al., 2025). A aquisição de dados foi realizada por um microcontrolador Arduino Nano, baseado no processador Atmel ATMEGA328P, com um módulo Bluetooth incorporado para comunicação sem fio, possibilitando a transmissão em tempo real dos dados de temperatura para um computador, em alcance de até 10 metros. As leituras também podem ser visualizadas em tempo real em um display LCD.

Em trabalho anterior do grupo (GOVONI et al., 2025), foram conduzidos quatro testes de impressão de placas planas de ABS (resina SABIC Cyclicolac® MG94, 270 mm × 180 mm, duas camadas, ângulo de raster de 45°) utilizando exclusivamente radiação infravermelha para o aquecimento da mesa, com temperaturas de 26°C (sem aquecimento), 61,25°C, 89,9°C e 90,5°C com ajuste fino do posicionamento das lâmpadas. Os parâmetros de impressão empregados nesses testes estão resumidos na Tabela 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a célula robótica de manufatura aditiva utilizada nos ensaios, evidenciando o braço robótico, o funil de alimentação de ABS, a extrusora e a mesa de impressão.

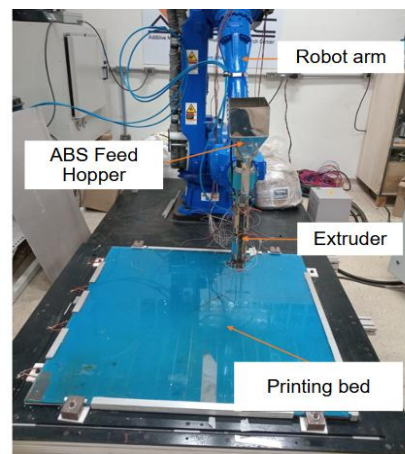


Figura 1. Célula robótica de manufatura aditiva.

A Figura 2 apresenta o mapa de distribuição dos 11 termopares utilizados na caracterização térmica da mesa, dispostos em malha com espaçamento de 200 mm sobre toda a área útil de 1000 mm × 1000 mm.

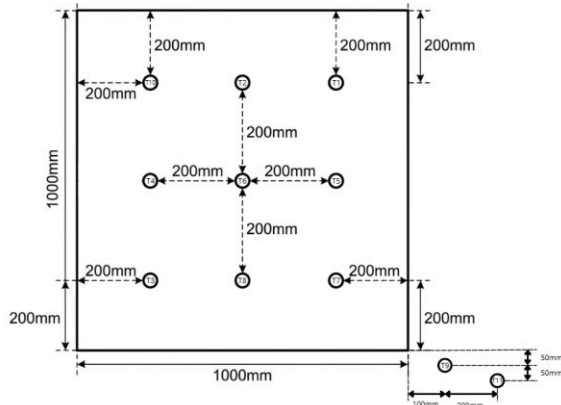


Figura 2. Mapa de distribuição dos termopares na mesa térmica (vista superior, dimensões em mm).

A Figura 3 mostra a montagem experimental do sistema de aquecimento IR posicionado sobre a mesa térmica, evidenciando o refletor parabólico, o sensor ótico de temperatura e os termopares fixados na superfície da mesa, utilizados simultaneamente nos ensaios de caracterização.

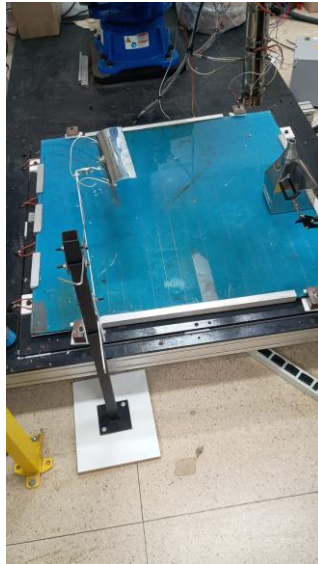


Figura 3. Sistema de aquecimento infravermelho posicionado sobre a mesa térmica.

A Figura 4 detalha a fixação dos termopares na superfície da mesa térmica, posicionados conforme o mapa apresentado na Figura 2, durante a realização dos ensaios de caracterização.

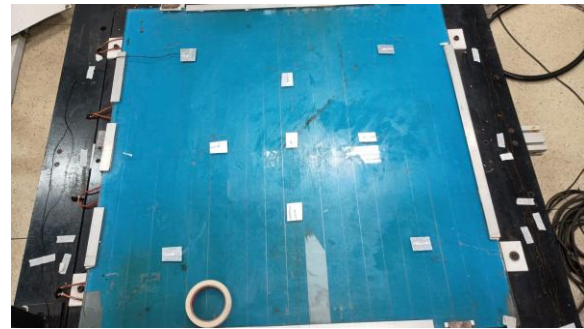


Figura 4. Termopares fixados na superfície da mesa térmica durante o ensaio de caracterização.

As Figuras 5 e 6 apresentam a evolução temporal da temperatura registrada pelos 10 termopares ativos durante os ensaios de 60°C e 90°C, respectivamente. Em ambos os casos observa-se uma fase inicial de aquecimento rápido seguida pela estabilização em um regime oscilatório característico do controle on-off por relé de estado sólido, com variações periódicas de poucos graus Celsius em torno do valor de referência.

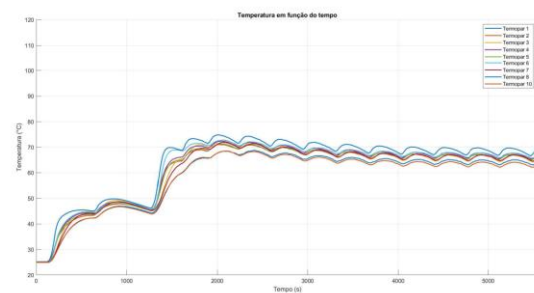


Figura 5. Temperatura em função do tempo – ensaio da mesa térmica a 60°C.

No ensaio a 60°C (Figura 5), a temperatura de regime permanente manteve-se entre aproximadamente 62 e 70°C entre os diferentes termopares, evidenciando uma dispersão espacial moderada na distribuição térmica da mesa.

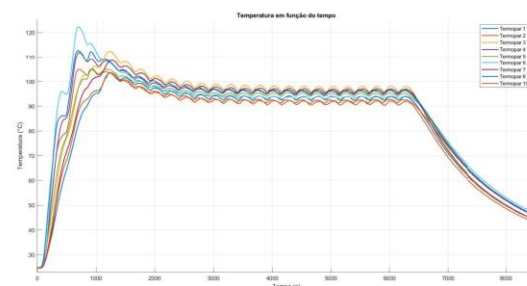


Figura 6. Temperatura em função do tempo – ensaio da mesa térmica a 90°C.

No ensaio a 90°C (Figura 6), observou-se um sobressinal (overshoot) inicial de até aproximadamente 122°C antes da estabilização em torno de 90–98°C, indicando a necessidade de ajuste

dos parâmetros de controle on-off para reduzir esse comportamento em temperaturas mais elevadas, próximas à faixa de interesse para impressão em ABS. Esse comportamento é consistente com o reportado por GOVONI et al. (2025), no qual a uniformidade da temperatura ao longo da área de impressão — e não apenas seu valor médio — mostrou-se determinante para a qualidade dimensional final das peças.

A Figura 7 ilustra a montagem experimental utilizada para a caracterização isolada do sistema de aquecimento por radiação infravermelha, com a lâmpada e o refletor parabólico à esquerda e a chapa de ABS suspensa por fios metálicos à direita, em ambiente fechado e com mínima interferência externa.



Figura 7. Montagem experimental do ensaio de caracterização da lâmpada infravermelha com chapa de ABS.

As Figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, os resultados da caracterização do sistema de aquecimento por radiação IR com a lâmpada posicionada a 70 cm e a 20 cm da chapa de ABS, comparando a leitura do termopar em contato com a leitura do sensor ótico sem contato.

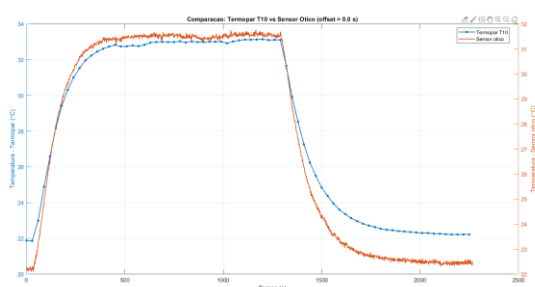


Figura 8. Comparação entre termopar e sensor óptico – lâmpada IR a 70 cm da amostra.

A 70 cm de distância (Figura 8), a temperatura de regime permanente da chapa situou-se em torno de 33°C, com boa concordância entre as leituras do termopar e do sensor ótico ao longo de todo o ensaio. Esse nível de aquecimento é insuficiente para promover qualquer benefício significativo à adesão entre camadas de ABS, já que está muito abaixo da Tg do material (105°C).

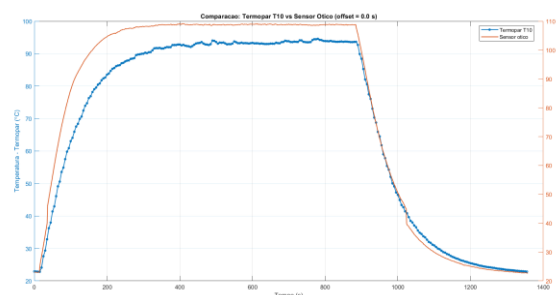


Figura 9. Comparação entre termopar e sensor óptico – lâmpada IR a 20 cm da amostra.

Já a 20 cm de distância (Figura 9), configuração que aproxima a temperatura da chapa da Tg do ABS (próxima a 105°C), a temperatura de regime permanente atingiu cerca de 93°C pelo termopar e 98°C pelo sensor ótico, indicando que a redução da distância lâmpada–amostra é eficaz para elevar a temperatura da peça à faixa de interesse para a impressão. Verificou-se, ainda, uma defasagem maior entre os dois sensores nas distâncias intermediárias, atribuída a um problema de aderência do termopar à chapa observado nos ensaios a 35 cm, o que motivou a adoção do sensor ótico como referência complementar nas próximas etapas do trabalho.

Esses resultados de caracterização isolada são consistentes com os resultados de impressão obtidos por GOVONI et al. (2025) ao utilizar o sistema IR diretamente sobre a célula robótica. Naquele trabalho, foram realizados quatro testes de impressão de placas de ABS sob diferentes temperaturas de mesa, cujos parâmetros de processo estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de impressão padronizados nos ensaios de impressão em ABS (GOVONI et al., 2025).

Parâmetro	Valor
Diâmetro do bico da extrusora	1,75 mm
Rotação da rosca	30 RPM
Velocidade de impressão	25 mm/s
Altura de camada	1,2 mm
Ângulo de raster	45°
Fator de preenchimento	100 %

Como referência para a etapa de integração conjunta dos dois subsistemas, a Figura 10 reproduz os resultados de impressão obtidos por GOVONI et al. (2025), comparando o grau de empenamento das placas de ABS impressas sob as quatro condições de temperatura de mesa descritas anteriormente.



Figura 10. Comparação do empenamento em placas de ABS impressas sob diferentes condições de temperatura (Test 1: sem aquecimento; Test 2: 61,25°C; Test 3: 89,9°C; Test 4: 90,5°C com ajuste de lâmpadas). Fonte: Govoni et al. (2025).

A Figura 11 quantifica esse efeito por meio da medição da variação dimensional na região de canto das placas, evidenciando a redução progressiva do empenamento conforme o aumento e a uniformização da temperatura de mesa entre os testes.

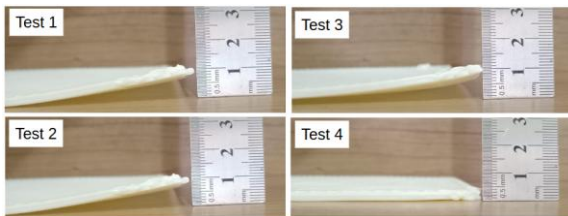


Figura 11. Variação dimensional na região de canto das placas de ABS impressas (Test 1 a Test 4). Fonte: Govoni et al. (2025).

No Test 1, sem aquecimento (temperatura ambiente de 26°C), a peça apresentou descolamento imediato da mesa e empenamento acentuado ao longo das bordas, comportamento consistente com a contração térmica diferencial típica de polímeros amorfos como o ABS na ausência de controle térmico ativo. No Test 2 (61,25°C), a primeira camada atingiu temperatura média de 87,21°C, porém ocorreu empenamento localizado no canto inferior direito, atribuído a regiões onde a temperatura permaneceu abaixo de 90°C. No Test 3 (89,9°C), o empenamento persistiu na mesma região apesar da temperatura média próxima do ideal, demonstrando que a temperatura média da mesa, isoladamente, não é suficiente para garantir estabilidade dimensional — a uniformidade espacial da distribuição térmica é igualmente crítica. Já no Test 4 (90,5°C, com ajuste fino do posicionamento das lâmpadas), a primeira camada atingiu temperatura média de 107°C e não foi observado qualquer empenamento, resultando em uma peça completamente plana e com boa adesão à plataforma de impressão.

Esses resultados, somados à caracterização individual da mesa térmica e do sistema IR apresentada neste trabalho, reforçam que a uniformidade espacial da temperatura — e não apenas seu valor médio — é o fator determinante para a qualidade dimensional final das peças impressas. O comportamento de sobressinal

observado no ensaio da mesa a 90°C (Figura 6) e a defasagem entre sensores observada nos ensaios intermediários da lâmpada IR (Figuras 8 e 9) indicam que a integração dos dois subsistemas deverá considerar não apenas a soma das potências de aquecimento, mas também a sincronização do controle on-off da mesa com o ajuste manual da lâmpada IR, de modo a evitar picos de temperatura acima da faixa desejada para o ABS.

CONCLUSÃO

A caracterização térmica realizada permitiu identificar a resposta dinâmica de cada subsistema de aquecimento da célula robótica de manufatura aditiva de forma independente. A mesa térmica apresentou regime oscilatório estável em 60°C, porém com sobressinal acentuado em 90°C, sinalizando a necessidade de ajuste dos parâmetros de controle on-off para a faixa de temperatura de interesse para o ABS, próxima à T_g de 105°C. O sistema de aquecimento por radiação IR mostrou-se eficaz para elevar a temperatura da amostra à faixa desejada quando posicionado a distâncias menores (20 cm), com boa concordância entre os métodos de medição por contato e óptico.

Os resultados de impressão obtidos anteriormente pelo grupo de pesquisa (GOVONI et al., 2025) confirmam que a uniformidade espacial da distribuição térmica, e não apenas a temperatura média, é o fator determinante para a eliminação do empenamento e a obtenção de peças dimensionalmente estáveis em ABS, com temperaturas de primeira camada próximas a 107°C eliminando completamente os defeitos observados em condições de aquecimento insuficiente ou não uniforme. Os resultados de caracterização individual aqui apresentados são consistentes com esses achados e fornecem subsídios diretos para a próxima etapa do trabalho, que consiste na integração física dos dois subsistemas à célula robótica e na validação conjunta por meio de testes de impressão de peças de ABS de parede fina e grande porte, ainda a serem realizados antes da conclusão do projeto de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica e Tecnológica no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), conforme o Edital ProPq 001/2025 da Coordenadoria dos Programas de Iniciação Científica e Tecnológica (CoPICT) da Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Os autores agradecem ainda à UFSCar pela infraestrutura disponibilizada no Laboratório de Engenharia Aplicada (LEA) para a realização dos ensaios experimentais.



REFERÊNCIAS

- BALAJI, D. Additive manufacturing of polymeric materials. In: Additive Manufacturing with Novel Materials. p. 163–195, 2024.
- BARBOSA, G. F.; SHIKI, S. B.; COSTA, L. C.; ARAÚJO, L. A. O.; MALAVOLTA, A. T.; OLIVEIRA, R. O.; LOVO, J. F. P.; ROQUE, R.; SAVAZZI, J. O.; PULQUERIO, E. C.; LESSA, C. C.; GUERRA-ZUBIAGA, D. A. Sistema de manufatura aditiva de material polimérico robotizada e peças assim obtidas. Patente, INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial, Registro nº BR1020230165214, 2023.
- GARDNER, J. M.; STELTER, C. J.; SAUTI, G.; KIM, J. W.; YASHIN, E. A.; WINCHESKI, R. A.; SCHNIEPP, H. C.; SIOCHI, E. J. Environment control in additive manufacturing of high-performance thermoplastics. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 119, p. 6423–6433, 2022.
- GONCALVES, C. C.; MALAVOLTA, A. T.; ARAÚJO, L. A. O.; BARBOSA, G. F.; SHIKI, S. B. Mesa para manufatura aditiva de produtos poliméricos e seu uso. Patente, INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial, Registro nº BR1020230162215, 2023.
- GONÇALVES, C. D.; MALAVOLTA, A. T.; BARBOSA, G. F.; SHIKI, S. B.; PARRA, E. R. Influence of bed temperature on mechanical resistance, surface and dimensional quality of 3D printed parts by robotized fused pellet modeling. Progress in Additive Manufacturing, v. 10, p. 3827–3841, 2025.
- GOVONI, V. C.; MALAVOLTA, A. T.; SILVA E SILVA, L. Z. A.; SHIKI, S. B.; BARBOSA, G. F.; ARAÚJO, L. A. O. Influence of an infrared heating system on the additive manufacturing of ABS parts. In: 28th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2025), Curitiba, 2025.
- GOVONI, V. C. Processo de aquecimento por radiação com lâmpadas infravermelhas para manufatura aditiva. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta.
- KISHORE, V.; AJINJERU, C.; NYCZ, A.; POST, B.; LINDAHL, J.; KUNC, V.; DUTY, C. Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components. Additive Manufacturing, v. 14, p. 7–12, 2017.
- NYCZ, A.; KISHORE, V.; LINDAHL, J.; DUTY, C.; CARNAL, C.; KUNC, V. Controlling substrate temperature with infrared heating to improve mechanical properties of large-scale printed parts. Additive Manufacturing, v. 33, 101068, 2020.
- SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. Rapid Prototyping Journal, v. 14, p. 72–80, 2008.
- WANG, Z.; ZHOU, K.; XU, P. Infrared on-site heating for material extrusion additive manufacturing of carbon fiber filled polyphenylene sulfide and its nano-graphene-reinforced alternatives. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2024.