



Recozimento e estabilidade dimensional acima da T_g de placas poliméricas obtidas por manufatura aditiva FFF

Maria Heloisa de Siqueira Guerini | maria.hsg2008@aluno.ifsc.edu.br

Bianca Tessaro Coppini | bianca.tc23@aluno.ifsc.edu.br

Vinicius Gonçalves Deon | vinicius.deon@ifsc.edu.br

RESUMO

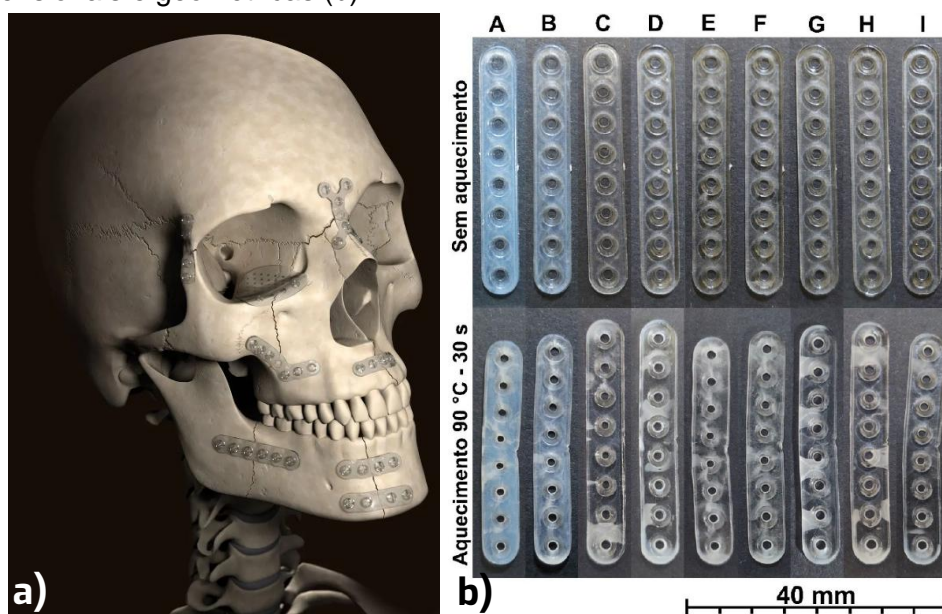
Placas craniofaciais absorvíveis podem sofrer retrações e perdas geométricas quando aquecidas acima da T_g do polímero durante a moldagem intraoperatória, especialmente quando fabricadas pela moldagem por injeção. A manufatura aditiva (MA) pelo processo de fabricação por filamento fundido (FFF) surge como uma alternativa promissora e permite integrar um recozimento simples na própria mesa aquecida para aliviar tensões residuais. Este trabalho desenvolveu placas poliméricas simplificadas em PLA e avaliou sua estabilidade dimensional ao aquecimento (90 °C - 30 s) após diferentes tempos de recozimento na mesa de impressão (100 °C por 0, 20, 40 e 60 min). As placas foram modeladas no Solidworks e impressas em uma impressora Ender 3 (bico 200 °C; mesa 60 °C). As massas das placas foram consistentes entre as condições experimentais ($\approx 0,3700$ g), indicando reprodutibilidade e consistência do processo. Com o recozimento prévio, foram observadas variações dimensionais inferiores em relação às placas não recozidas, evidenciando o alívio de tensões e a reorganização das cadeias poliméricas acima da T_g . Embora 20–60 min tenham melhorado a estabilidade, não foi possível definir um tempo ótimo devido à variabilidade dos resultados. Os resultados demonstraram que o recozimento na própria mesa de impressão é uma estratégia prática e de baixo custo para aumentar a estabilidade térmica de placas finas em PLA produzidas por MA.

Palavras-chave: mecânica; manufatura aditiva; placas absorvíveis; recozimento; fixação óssea.

1 INTRODUÇÃO

O uso de placas e parafusos em cirurgias craniofaciais é fundamental para garantir estabilidade óssea durante a recuperação do paciente. São produtos fabricados tradicionalmente em ligas de titânio e polímeros absorvíveis. As placas fabricadas em polímeros absorvíveis, mostradas na Figura 1a, utilizam materiais capazes de oferecer suporte temporário e serem degradadas pelo organismo, eliminando a necessidade de uma segunda cirurgia para remoção. A produção dessas placas poliméricas utiliza comercialmente o processo de moldagem por injeção, processo que impõe condições severas de temperatura e pressão sobre o material. Os efeitos dessas condições são percebidos como distorções dimensionais e geométricas nas etapas de aquecimento e moldagem a anatomia óssea do paciente durante cirurgias, conforme mostrado na Figura 1b (Deon, 2024; Neto *et al.*, 2023).

Figura 1 – Ilustração de um crânio e maxilar com placas de fixação óssea em polímeros absorvíveis (a) e de placas submetidas a aquecimento acima da T_g demonstrando retrações e perdas dimensionais e geométricas (b).



Fonte: Adaptado de Medical Expo (2025) e Deon (2024).

Nesse contexto, a manufatura aditiva (MA) surge como uma alternativa ao processo de moldagem por injeção e abre espaço para a personalização e otimização do comportamento dimensional das placas em condição de aquecimento. Ainda, tratando-se de produtos de seção fina, utilizar a mesa de impressão aquecida para o tratamento térmico prévio pode colaborar na melhora da estabilidade térmica dessas placas.

Com isso o objetivo deste trabalho foi desenvolver placas de fixação óssea poliméricas simplificadas por meio de MA para o estudo da estabilidade dimensional e geométrica quando submetidas a aquecimento acima da temperatura de transição vítrea (T_g , ~60 °C para o PLA) após tratamentos térmicos de recozimento na mesa de impressão para o alívio de tensões.

2 METODOLOGIA

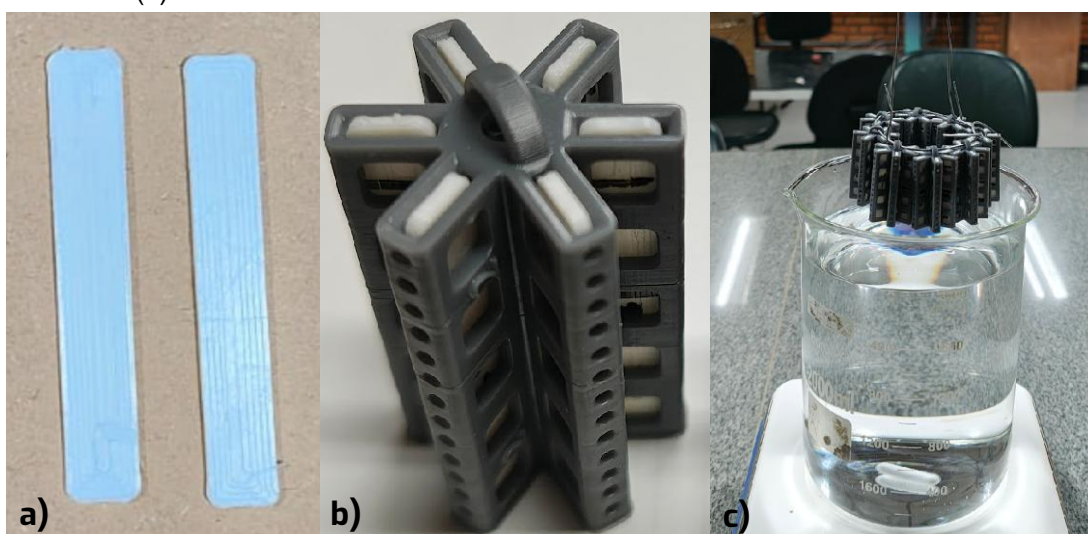
O projeto iniciou com a modelagem das placas no software Solidworks 2022, cujas dimensões eram de 38,70 mm de comprimento, 5,80 mm de largura e 1,20 mm de espessura (Figura 2a). Furos escareados e curvaturas, presentes em placas comerciais, foram removidas para simplificação geométrica. Para a fabricação, utilizou-se o PLA branco da marca 3DLab e uma impressora 3D Ender 3 (Creality, China). Antes das impressões, foi realizada a calibração da mesa aquecida com auxílio de um termopar tipo K para verificação da temperatura real em relação à medida pela impressora.

A impressão foi conduzida com bico de latão de 0,6 mm aquecido a 200 °C e mesa a 67 °C (para atingir cerca de 60 °C reais). Foram realizadas quatro impressões com 30 placas simultâneas, cada uma submetida a diferentes tempos de permanência na mesa aquecida a 110 °C (~100 °C real) para relaxação de tensões, sendo: 0 minutos (Exp01), 20 minutos (Exp02), 40 minutos (Exp03) e 60 minutos (Exp04).

No total, 12 placas de cada experimento foram selecionadas aleatoriamente como amostras representativas para as caracterizações. Foram medidos o comprimento e a largura e espessura em três pontos distintos. O comprimento foi medido com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. As larguras e espessuras foram avaliadas com micrômetro milesimal. A massa das placas foi determinada em balança analítica com quatro casas após a vírgula.

Na sequência, simulando condições térmicas encontradas em salas cirúrgicas e intraoperatórias, as placas foram colocadas em um dispositivo e submetidas a um aquecimento a 90°C por 30 segundos por imersão em água destilada (Figura 2b e 2c), seguido por resfriamento por convecção natural até a temperatura ambiente (21° C, padrão de salas cirúrgicas). As dimensões foram determinadas antes e após o aquecimento a 90°C.

Figura 2 – Placas obtidas por MA via processo FFF (a), placas montadas no dispositivo para suporte durante o aquecimento a 90 °C (b) e placas sendo imersas em água destilada aquecida a 90 °C (c).



Fonte: Autores (2025).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A medição das massas das placas demonstrou que o processo de fabricação foi consistente e apresentou pouca variabilidade entre os experimentos avaliados. As massas obtidas foram $0,3702 \pm 0,0024$ g, $0,3709 \pm 0,0018$ g, $0,3700 \pm 0,0038$ g e $0,3702 \pm 0,0017$ g para as condições experimentais Exp01, Exp02, Exp03 e Exp04, respectivamente.

Os resultados dimensionais, apresentados na Tabela 1, também demonstraram a obtenção de peças com boa uniformidade dimensional, com comprimentos variando entre $40,46 \pm 0,07$ mm e $40,08 \pm 0,07$ mm, larguras entre $6,38 \pm 0,13$ mm e $6,22 \pm 0,10$ mm e espessuras entre $1,249 \pm 0,031$ mm e $1,206 \pm 0,032$ mm. A análise inicial das placas no estado inicial, sem o aquecimento a 90°C , também demonstrou para os comprimentos e as larguras uma tendência de redução dimensional com os tratamentos térmicos de recozimento a 100°C sobre a mesa de impressão. Ainda, foi observado um incremento de espessura com o recozimento em virtude da redução do comprimento e largura.

Após o aquecimento a 90°C , foi observado que recozer as placas a 100°C sobre a mesa de impressão resultou em variações dimensionais reduzidas quando comparadas a condição não recozida (Exp01). Esses resultados corroboram com a análise dimensional inicial, demonstrando que o recozimento induziu alívio de tensões que resultaram em maior estabilidade dimensional durante o aquecimento acima da T_g . Ainda, ficou evidente que aplicar tratamentos térmicos de recozimento na mesa de impressão para produtos finos ou com pouca espessura é viável em impressoras 3D abertas, como o equipamento utilizado, e pode impactar positivamente a estabilidade dimensional durante ciclos térmicos.

Tabela 1 - Dimensões das placas para as condições experimentais avaliadas, antes e após os tratamentos térmicos de recozimento.

Experimento	Comprimento			Largura			Espessura		
	S/A* (mm)	C/A** (mm)	Variação (%)	S/A (mm)	C/A (mm)	Variação (%)	S/A (mm)	C/A (mm)	Variação (%)
Exp01 ($100^\circ\text{C} - 0$ min)	40,46 $\pm 0,07$	39,89 $\pm 0,08$	-1,42 $\pm 0,06$	6,38 $\pm 0,13$	6,35 $\pm 0,12$	-0,34 $\pm 0,18$	1,206 $\pm 0,032$	1,244 $\pm 0,032$	3,16 $\pm 1,25$
Exp02 ($100^\circ\text{C} - 20$ min)	40,25 $\pm 0,15$	40,01 $\pm 0,06$	-0,59 $\pm 0,30$	6,29 $\pm 0,08$	6,30 $\pm 0,08$	0,17 $\pm 0,17$	1,241 $\pm 0,018$	1,250 $\pm 0,019$	0,75 $\pm 0,85$
Exp03 ($100^\circ\text{C} - 40$ min)	40,08 $\pm 0,07$	39,94 $\pm 0,06$	-0,35 $\pm 0,11$	6,22 $\pm 0,10$	6,23 $\pm 0,10$	0,04 $\pm 0,36$	1,249 $\pm 0,031$	1,253 $\pm 0,037$	0,12 $\pm 1,15$
Exp04 ($100^\circ\text{C} - 60$ min)	40,11 $\pm 0,11$	39,95 $\pm 0,11$	-0,40 $\pm 0,10$	6,28 $\pm 0,11$	6,28 $\pm 0,11$	0,00 $\pm 0,27$	1,232 $\pm 0,026$	1,241 $\pm 0,030$	0,77 $\pm 0,96$

*S/A = placas sem aquecimento, no estado "como fabricado"; **C/A = placas aquecidas a 90°C por 30 s.

Fonte: Autores (2025)

Esses comportamentos dimensionais estão de acordo com o observado em outros trabalhos para placas absorvíveis moldadas por injeção e aquecidas acima da T_g do polímero (Deon, 2024; Neto *et al.*, 2023). Nesses trabalhos, ao se aquecer as placas acima da T_g , foram

observadas menores variações dimensionais para as placas com os menores níveis de tensões residuais associados. As tensões residuais são induzidas durante a fabricação pelo alinhamento das cadeias poliméricas no sentido do fluxo do material, associado também a um resfriamento rápido que congela as cadeias num estado estirado e, portanto, não ideal. Ao sofrer novo aquecimento acima da T_g , a energia térmica fornecida é suficiente para permitir a reorganização das cadeias poliméricas e o alívio de tensões. Em placas craniofaciais poliméricas e absorvíveis, essa reorganização das cadeias resulta em retrações no comprimento e largura associados a um incremento de espessura (Deon, 2024; Neto *et al.*, 2023), conforme observado nos resultados deste trabalho.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho produziu placas craniofaciais poliméricas simplificadas em PLA. O objetivo foi investigar a influência do tratamento térmico de recozimento na mesa de impressão sobre a estabilidade térmica desses produtos quando submetidos a aquecimento acima da T_g do polímero.

Os resultados, de maneira geral, demonstraram que o recozimento foi efetivo e proporcionou melhora na estabilidade dimensional das placas submetidas ao aquecimento acima da T_g (90 °C, T_g de ~60 °C para o PLA). Essa melhora está associada ao alívio de tensões e reorganização das cadeias poliméricas durante o recozimento. Entretanto, não foi possível determinar a condição de tempo ideal para tratamento térmico devido à variabilidade nos resultados.

Os resultados demonstram que adotar o recozimento na própria mesa de impressão é uma estratégia válida e de baixo custo para aumentar a estabilidade térmica de placas finas em PLA produzidas por MA via processo FFF.



REFERÊNCIAS

DEON, Vinicius Gonçalves. Moldagem por injeção de placas craniofaciais em PLGA 85:15: influência dos parâmetros do processo e da localização do ponto de injeção. 2024. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

MACHUCA NETO, Fernando; DEON, Vinicius Gonçalves; ROESLER, Carlos Rodrigo de Mello; FANCELLO, Eduardo Alberto; SALMORIA, Gean Vitor. Effect of Thermo-mechanical Post-treatments on Injection-Molded PLGA 85:15 Maxillofacial Plates. **Biomedical Materials & Devices**, v. 1, n. 1, p. 524–533, mar. 2023. DOI: 10.1007/s44174-022-00024-1.

MEDICAL EXPO. **Placa de compressão óssea para esqueleto facial CPS™**. Disponível em: <https://www.medicaexpo.com/pt/prod/inion/product-91001-671685.html>. Acesso em: 16 out. 2025.