MODELAGEM COMPUTACIONAL E PROTOTIPAGEM 3D DE COLUNA VERTEBRAL A PARTIR DE IMAGENS MÉDICAS PARA PLANEJAMENTO CIRÚRGICO

Luiza Vieira Silva (PIBIC/CNPq-FA-UEM), Marcelo Rosolem Luchetti, Marcelo Marques (Orientador). E-mail: mmarques@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Meio Ambiente, Campus Regional de Umuarama.

Área e subárea do conhecimento: Engenharia Biomédica / Engenharia Médica.

Palavras-chave: DICOM; fabricação aditiva; engenharia médica.

RESUMO

A impressão 3D de modelos anatômicos derivados de imagens médicas constitui uma estratégia promissora para ampliar a compreensão espacial de estruturas complexas e apoiar o planejamento pré-operatório. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e testar um fluxo técnico para modelagem computacional e prototipagem tridimensional de segmentos da coluna vertebral a partir de exames de Tomografia Computadorizada e/ou Ressonância Magnética. O processo contemplou organização das imagens, segmentação da estrutura de interesse, reconstrução do modelo tridimensional, correção e otimização da malha, preparação do arquivo para fabricação e impressão por deposição de material. Na etapa de fatiamento foram avaliadas diferentes orientações do modelo e a necessidade de estruturas de suporte, buscando estabilidade durante a fabricação e preservação da geometria anatômica. Como resultado, foram obtidos protótipos físicos de segmento vertebral, demonstrando a viabilidade do fluxo digital-físico proposto e permitindo a visualização tridimensional e a manipulação direta da anatomia. Os modelos produzidos preservaram, em avaliação visual macroscópica, características anatômicas relevantes para reconhecimento espacial, evidenciando o potencial da técnica como recurso de apoio ao ensino e ao planejamento cirúrgico. Conclui-se que a modelagem associada à impressão 3D apresenta viabilidade técnica para produção de modelos anatômicos de coluna, sendo necessária, em etapa subsequente, a validação quantitativa da acurácia e a avaliação sistemática por especialistas quanto à utilidade clínica.

INTRODUÇÃO

A fabricação aditiva possibilita converter modelos digitais complexos em objetos físicos por deposição sucessiva de material, permitindo a produção de geometrias individualizadas e de baixo volume. Na área da saúde, a integração entre imagens médicas, reconstrução tridimensional e impressão 3D tem sido empregada para produzir modelos anatômicos táteis destinados ao ensino, treinamento e planejamento de procedimentos, superando parte das limitações da visualização exclusivamente bidimensional em telas (RENGIER et al., 2010; MITSOURAS et al., 2015). A cadeia de manufatura aditiva envolve etapas de aquisição de dados, geração e correção do modelo, preparação da fabricação, impressão e pós-

processamento, sendo a qualidade de cada etapa determinante para o resultado final (GIBSON et al., 2021).

Na coluna vertebral, a complexidade geométrica das vértebras e a proximidade entre estruturas ósseas, neurais e vasculares tornam relevante a compreensão tridimensional da anatomia durante o planejamento pré-operatório. Modelos físicos obtidos a partir de exames de Tomografia Computadorizada (TC) e Ressonância Magnética (RM) podem complementar reconstruções virtuais, permitindo inspeção direta, manipulação e discussão do caso pela equipe (VENTOLA, 2014). Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi desenvolver e avaliar a viabilidade técnica de um fluxo de modelagem computacional e prototipagem 3D de segmentos da coluna vertebral a partir de imagens médicas, com ênfase na preparação geométrica e na fabricação de protótipos físicos potencialmente aplicáveis ao planejamento cirúrgico.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido como pesquisa exploratória e aplicada, estruturada em fluxo digital-físico. Inicialmente, conjuntos de imagens de TC e/ou RM foram organizados para processamento computacional. As estruturas de interesse foram segmentadas, convertendo-se os dados volumétricos em representação tridimensional; em seguida, a malha foi inspecionada e preparada para fabricação, com correções de continuidade, orientação e escala quando necessárias. Esse fluxo corresponde às etapas previstas no projeto de iniciação científica, que incluem segmentação, reconstrução computacional, otimização da malha e prototipagem física.

Na fase de fabricação, o modelo foi importado em software de fatiamento, no qual foram testadas diferentes orientações sobre a mesa de impressão e configuradas estruturas de suporte para regiões em balanço. A prototipagem experimental foi realizada por extrusão de material (FDM), utilizando perfil de PLA e equipamento Creality K1 com bico de 0,4 mm, conforme os registros do processo apresentados nas imagens do estudo. A avaliação desta etapa concentrou-se na viabilidade de fabricação e na inspeção visual macroscópica do protótipo, considerando preservação das formas anatômicas reconhecíveis, estabilidade de impressão e ocorrência de regiões que demandaram suporte. A validação dimensional quantitativa e a avaliação sistemática por cirurgiões foram tratadas como etapas subsequentes da investigação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fluxo implementado permitiu avançar da representação digital ao modelo físico da coluna vertebral. Durante o fatiamento, a geometria irregular das vértebras, caracterizada por saliências e reentrâncias, exigiu análise da orientação da peça e geração de suportes, especialmente nas regiões projetadas para fora do eixo principal de deposição. A comparação de diferentes posicionamentos no ambiente de fatiamento mostrou que a orientação constitui etapa relevante para reduzir áreas suspensas e favorecer a estabilidade da fabricação.



Figura 1 - Etapas da prototipagem: (a) preparação e orientação do modelo no fatiador; (b) impressão por deposição de material; (c) protótipo vertebral obtido. Fonte: autores (2026).

A impressão resultou em protótipo físico no qual são visualmente reconhecíveis os principais contornos do segmento vertebral representado. A obtenção da peça demonstra a viabilidade técnica da sequência de processamento, preparação e fabricação adotada, além de evidenciar a possibilidade de transformar dados anatômicos digitais em objeto manipulável. Esse resultado é coerente com a literatura, que destaca o potencial de modelos físicos derivados de imagens para favorecer a percepção espacial e apoiar a comunicação e o planejamento de procedimentos complexos (RENGIER et al., 2010; MITSOURAS et al., 2015).

Entretanto, a inspeção visual do protótipo não substitui a avaliação de acurácia. Os materiais analisados nesta etapa não apresentam medidas quantitativas de desvio dimensional em relação ao modelo digital nem resultados sistematizados de avaliação por cirurgiões; portanto, não é possível inferir, a partir desta fase, ganho clínico ou precisão cirúrgica. A principal contribuição obtida é a demonstração do processo e sua viabilidade como prova de conceito. A continuidade do estudo deve incluir comparação dimensional entre modelo digital e peça impressa, padronização dos parâmetros de fabricação e avaliação por especialistas quanto à utilidade para planejamento pré-operatório.

CONCLUSÕES

O fluxo de modelagem computacional e impressão 3D mostrou-se tecnicamente viável para a produção de protótipos físicos de segmentos da coluna vertebral a partir de imagens médicas. A etapa de fatiamento confirmou a importância da orientação e dos suportes diante da complexidade geométrica vertebral, e o protótipo obtido preservou características anatômicas reconhecíveis em inspeção macroscópica. A metodologia apresenta potencial para aplicações educacionais e de planejamento cirúrgico, mas sua utilização clínica requer validação dimensional e avaliação sistemática por especialistas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UEM, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e ao Comitê Assessor do Programa de Iniciação Científica; ao CNPq e à Fundação Araucária, pelo incentivo e fomento à pesquisa; ao Technopark, pela colaboração técnica; e à Comissão Organizadora do EAIC, pela realização do evento.

REFERÊNCIAS

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.; KHORASANI, M. **Additive manufacturing technologies.** 3. ed. Cham: Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7.

MITSOURAS, D. et al. **Medical 3D printing for the radiologist.** RadioGraphics, v. 35, n. 7, p. 1965-1988, 2015. DOI: 10.1148/rg.2015140320.

RENGIER, F. et al. **3D printing based on imaging data: review of medical applications.** International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, v. 5, n. 4, p. 335-341, 2010. DOI: 10.1007/s11548-010-0476-x.

VENTOLA, C. L. **Medical applications for 3D printing: current and projected uses.** Pharmacy and Therapeutics, v. 39, n. 10, p. 704-711, 2014.