

MODELAGEM DIGITAL ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E IMPRESSÃO 3D: UMA COLEÇÃO COMPARATIVA DE PROTÓTIPOS CRANIOFACIAIS E CRANIOENCEFÁLICOS PARA O ENSINO MÉDICO

AI-ASSISTED DIGITAL MODELING AND 3D PRINTING: A COMPARATIVE COLLECTION OF CRANIOFACIAL AND CRANIOENCEPHALIC PROTOTYPES FOR MEDICAL EDUCATION

Camila da Silva Esper¹, Maria Gabrielle Góes de Souza¹, Laiz Furlan Balioni²

¹Acadêmicas do curso de Medicina da Afya Faculdade de Medicina de Itajubá (FMIT), Itajubá, Minas Gerais, Brasil. ²Professora do curso de Medicina da Afya Faculdade de Medicina de Itajubá (FMIT), Itajubá, Minas Gerais, Brasil.

laizfurlan@gmail.com

Eixo Temático: 03 - Tecnologia e Inovação

RESUMO

Introdução: A compreensão de alterações craniofaciais e cranioencefálicas exige raciocínio espacial e integração entre embriologia, anatomia, neuroanatomia e clínica, o que pode ser limitado por recursos predominantemente bidimensionais. **Objetivo:** Desenvolver uma coleção comparativa de oito protótipos tridimensionais para o ensino médico, composta por cabeça infantil com anatomia externa de referência, exencefalia, acrania, acromegalia, malformação de Chiari tipo II (Arnold-Chiari), holoprosencefalia, crânio bífido com encefalocele e craniossinostose. **Método:** Pesquisa aplicada, qualitativa, descritiva, exploratória e de desenvolvimento metodológico, em andamento na Afya Faculdade de Medicina de Itajubá. A modelagem digital será realizada na plataforma Tripo3D, com geração assistida por inteligência artificial, curadoria anatômica, refinamento manual, exportação em STL e impressão por deposição de filamento fundido em ácido polilático. Serão registrados conformidade morfológica, imprimibilidade, estabilidade, número de ajustes, tempo de impressão e consumo de material. Após a conclusão dos protótipos, pretende-se aplicá-los em sala de aula, mediante aprovação ética específica, para avaliação de sua utilidade educacional. **Resultados:** Foram definidos os oito modelos, os principais critérios morfológicos e um fluxo técnico comum; a produção e a documentação fotográfica constituem a etapa subsequente. **Discussão:** A coleção permite comparar anatomia de referência com alterações congênicas e uma alteração endócrina de expressão craniofacial, ampliando a integração básico-clínica. **Conclusão:** O protocolo apresenta viabilidade metodológica para construir uma coleção física, acessível e reproduzível, cuja fidelidade anatômica e utilidade educacional deverão ser avaliadas nas etapas seguintes.

Palavras-chave: Impressão Tridimensional. Modelos Anatômicos. Educação Médica. Embriologia. Malformações do Sistema Nervoso.

ABSTRACT

Introduction: Understanding craniofacial and cranioencephalic abnormalities requires spatial reasoning and integration of embryology, anatomy, neuroanatomy, and clinical knowledge, which may be limited by predominantly two-dimensional resources. **Objective:** To develop a comparative collection of eight three-dimensional prototypes for medical education, comprising an infant head with reference external anatomy, exencephaly, acrania, acromegaly, Chiari type II malformation (Arnold-Chiari), holoprosencephaly, cranium bifidum with encephalocele, and craniosynostosis. **Method:** This is an applied, qualitative, descriptive, exploratory, and methodological development study in progress at Afya Faculdade de Medicina de Itajubá. Digital modeling will be performed using the Tripo3D platform, with artificial intelligence-assisted generation, anatomical curation, manual refinement, STL export, and fused deposition modeling using polylactic acid. Morphological conformity, printability, stability, number of adjustments, printing time, and material consumption will be recorded. After the prototypes are completed, their classroom application is intended, pending specific ethical approval, in order to evaluate their educational usefulness. **Results:** The eight models, key morphological criteria, and a common technical workflow have been defined; production and photographic documentation constitute the subsequent stage. **Discussion:** The collection enables comparison between reference anatomy, congenital abnormalities, and an endocrine disorder with craniofacial expression, strengthening basic-clinical integration. **Conclusion:** The protocol is methodologically feasible for building an accessible and reproducible physical collection whose anatomical fidelity and educational usefulness should be evaluated in subsequent stages.

Keywords: Printing, Three-Dimensional. Models, Anatomic. Education, Medical. Embryology. Nervous System Malformations.

INTRODUÇÃO

O ensino das ciências morfológicas depende da capacidade de reconhecer relações espaciais entre estruturas e de correlacionar forma, desenvolvimento e função. Revisões recentes indicam que modelos anatômicos impressos em 3D podem complementar atlas, imagens radiológicas e peças convencionais, sobretudo em conteúdos de maior complexidade espacial, favorecendo visualização tridimensional e manipulação direta.¹⁻³ A inclusão de uma cabeça infantil com anatomia externa de referência amplia essa proposta ao fornecer um padrão comparativo para as alterações representadas.

A inteligência artificial vem sendo incorporada ao ensino anatômico e à criação de recursos digitais, mas sua aplicação exige supervisão humana, pois a geração automatizada pode introduzir distorções de proporção, relações anatômicas incorretas ou superfícies inadequadas para impressão.⁴ No presente projeto, a inteligência artificial é empregada como ferramenta de prototipagem inicial, mantendo-se a curadoria anatômica e o refinamento manual como etapas obrigatórias.

A coleção proposta compreende oito protótipos: cabeça infantil normal, exencefalia, acrania, acromegalia, malformação de Chiari tipo II, holoprosencefalia, crânio bífido com encefalocele e craniossinostose. Exencefalia, acrania e anencefalia compõem um espectro de alterações graves da formação craniana e do tubo neural, com diferenças morfológicas relevantes para o reconhecimento pré-natal.^{5,6} A acromegalia, embora não seja malformação congênita, apresenta alterações craniofaciais relacionadas à exposição crônica ao hormônio do crescimento e ao fator de crescimento semelhante à insulina tipo 1, oferecendo oportunidade de integração entre morfologia e endocrinologia.⁷

Entre as condições selecionadas, a malformação de Chiari tipo II envolve alterações da junção craniocervical e deslocamento caudal de estruturas do rombencéfalo;⁸ a holoprosencefalia decorre de falha na separação do prosencéfalo e apresenta espectro variável de alterações da linha média;⁹ o crânio bífido pode associar defeito ósseo a herniação de meninges e/ou tecido encefálico, no espectro das encefaloceles;¹⁰ e a craniossinostose resulta da fusão prematura de suturas cranianas, modificando o padrão de crescimento e a morfologia craniofacial.¹¹

Diante disso, o objetivo deste estudo é desenvolver uma coleção didática de oito protótipos tridimensionais craniofaciais e cranioencefálicos, utilizando modelagem digital assistida por inteligência artificial na plataforma Tripo3D e impressão 3D, avaliando viabilidade técnica e conformidade morfológica para futura aplicação no ensino médico.

MÉTODO

Trata-se de pesquisa aplicada, qualitativa, descritiva, exploratória e de desenvolvimento metodológico, conduzida na Afya Faculdade de Medicina de Itajubá (FMIT), em Itajubá, Minas Gerais, no período de agosto a setembro de 2026. A unidade de análise compreende arquivos digitais e protótipos físicos, sem recrutamento de participantes, uso de animais ou utilização de imagens clínicas identificáveis.

A coleção será formada por oito peças: (1) cabeça infantil com anatomia externa de referência; (2) exencefalia; (3) acrania; (4) acromegalia; (5) malformação de Chiari tipo II, tradicionalmente denominada Arnold-Chiari; (6) holoprosencefalia; (7) crânio bífido com encefalocele; e (8) craniossinostose.

Será realizado levantamento bibliográfico em PubMed/MEDLINE, SciELO e LILACS, priorizando publicações recentes em português, inglês ou espanhol sobre impressão 3D, modelos anatômicos, educação médica e as condições representadas. A síntese originará uma matriz de critérios morfológicos para cada peça. A cabeça infantil normal funcionará como referência externa de proporção craniofacial. Nos modelos patológicos serão priorizados os elementos que permitam diferenciação visual: exposição ou ausência da calota craniana na sequência acrania-exencefalia; alterações craniofaciais típicas da acromegalia; relações da fossa posterior e junção craniocervical no Chiari II; alterações de linha média na holoprosencefalia; defeito ósseo e conteúdo herniado no crânio bífido com encefalocele; e relação entre sutura fusionada e deformação compensatória na craniossinostose.⁵⁻¹¹

Os parâmetros anatômicos serão convertidos em descrições técnicas para geração e ajuste dos modelos na plataforma Tripo3D. A ferramenta será utilizada como apoio à construção geométrica inicial. Cada modelo gerado será confrontado com a matriz morfológica e submetido à curadoria humana, com correção de proporções, remoção de artefatos, suavização de superfícies, ajuste de espessuras e preparação da malha para manufatura aditiva. A adoção de supervisão humana é coerente com recomendações atuais sobre uso responsável de inteligência artificial no ensino anatômico.⁴

Os arquivos finais serão exportados em STL e impressos por FDM (Fused Deposition Modeling) com filamento de ácido polilático (PLA), ajustando camada, preenchimento e suportes à geometria de cada peça. A análise será descritiva e registrará versões, correções, critérios morfológicos, falhas de malha ou impressão, estabilidade, tempo de impressão, consumo de material e reimpressões.

Como não há, nesta etapa, participação direta ou indireta de seres humanos, animais ou dados clínicos identificáveis, não se aplica número de CAAE. Após a produção dos

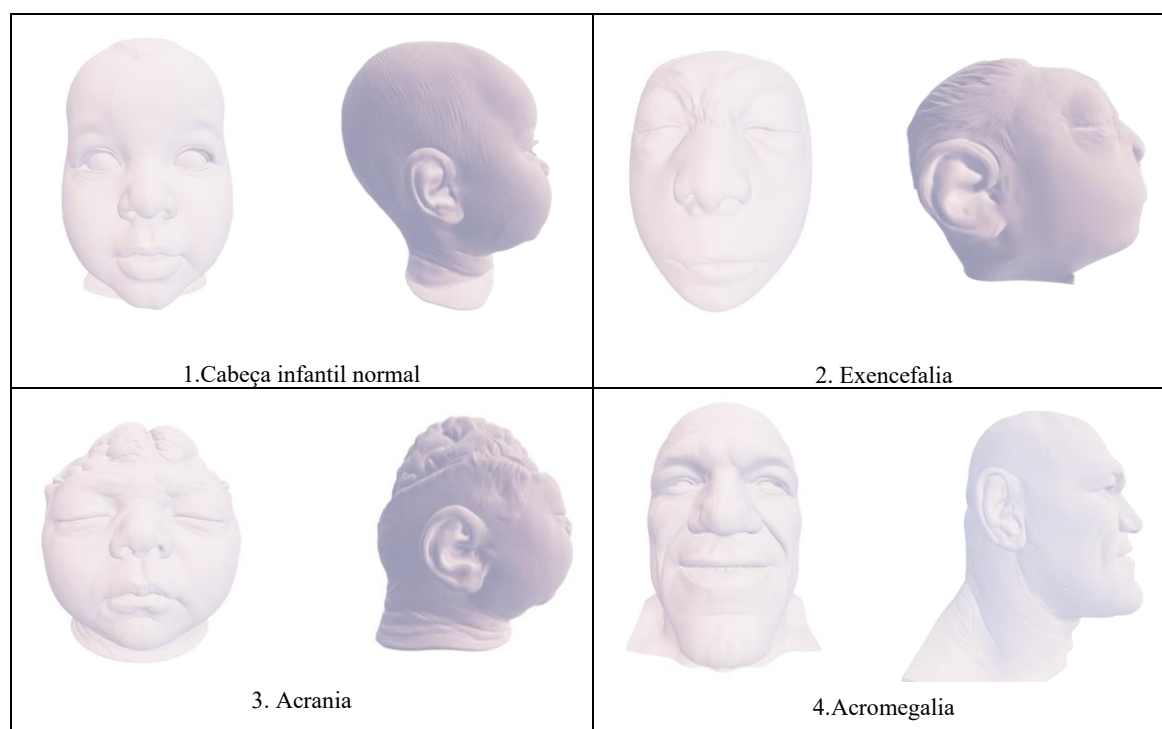
protótipos, pretende-se realizar uma etapa de aplicação em sala de aula com estudantes de Medicina para avaliação da utilidade pedagógica do material, condicionada à submissão e aprovação prévia de protocolo específico pelo Comitê de Ética em Pesquisa, quando aplicável.

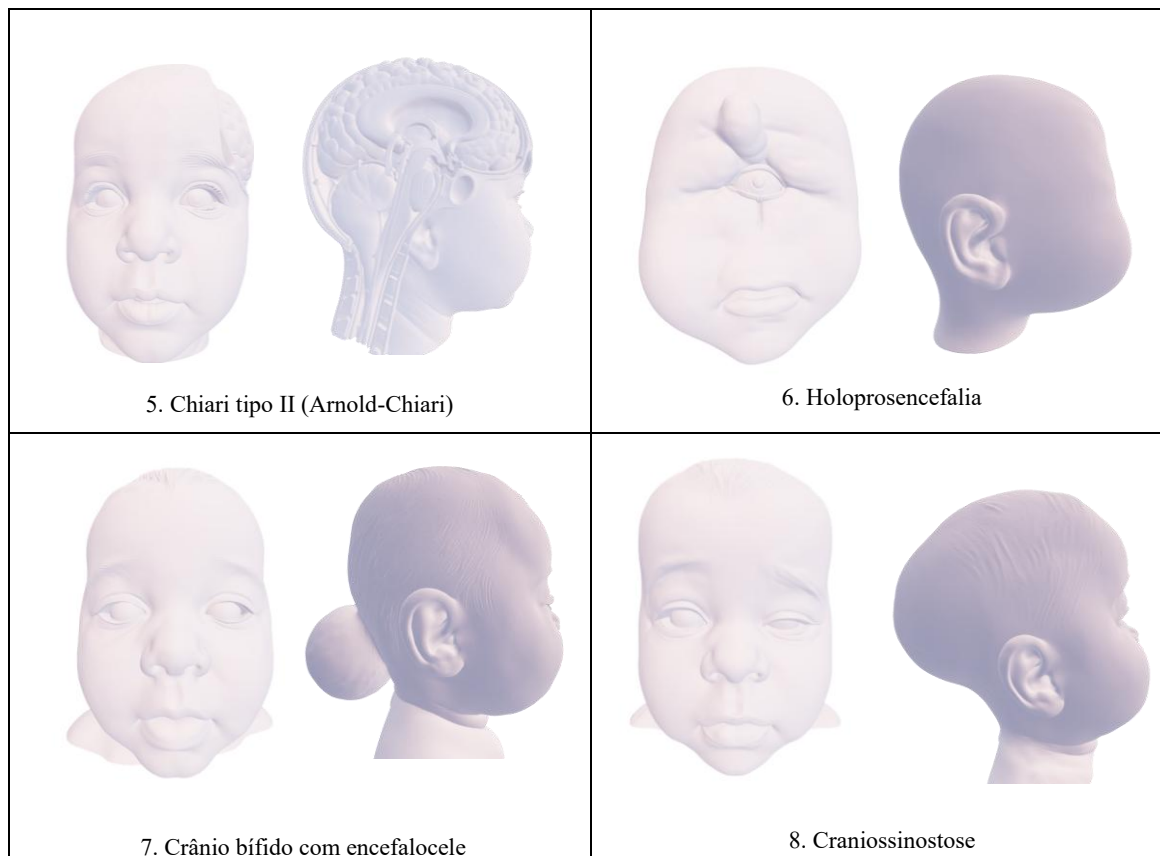
RESULTADOS

Como resultados parciais, foi definida a composição da coleção com oito protótipos e estruturado um fluxo técnico único para sua produção. Foram estabelecidos os critérios morfológicos essenciais de cada peça, além das etapas de modelagem, refinamento, impressão e documentação fotográfica.

Também foram definidos os eixos morfológicos que orientarão a comparação entre as peças: anatomia craniofacial de referência; integridade da calota craniana e relação com tecido encefálico; alterações craniofaciais endócrinas; junção craniocervical; organização da linha média cerebral; defeito ósseo com herniação; e padrão de crescimento condicionado pela fusão sutural. A documentação fotográfica final será inserida após a conclusão da produção física, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Coleção proposta de oito protótipos tridimensionais craniofaciais e cranioencefálicos.





Fonte: Arquivo próprio

DISCUSSÃO

A proposta organiza um conjunto comparativo de oito protótipos tridimensionais voltados ao ensino médico. A presença de uma cabeça infantil normal cria um referencial anatômico que permite observar, lado a lado, como diferentes mecanismos patológicos alteram a forma do crânio, da face ou das estruturas encefálicas. Esse desenho é coerente com evidências de que modelos 3D podem ser especialmente úteis para conteúdos complexos e para estruturas cuja compreensão depende de relações espaciais.¹⁻³

A combinação de exencefalia e acrania permite trabalhar a sequência acrania-exencefalia-anencefalia sem tratar essas entidades como imagens equivalentes.^{5,6} Já a acromegalia introduz uma condição adquirida de expressão craniofacial, permitindo discutir alterações ósseas e de tecidos moles em um contexto endócrino distinto das malformações congênitas.⁷ Essa diversidade aumenta a possibilidade de integração entre embriologia, anatomia, neuroanatomia, endocrinologia e raciocínio clínico.

Os demais modelos patológicos acrescentam mecanismos morfológicos complementares. No Chiari II, a ênfase recai sobre a junção craniocervical e a relação entre fossa posterior e estruturas do rombencéfalo.⁸ Na holoprosencefalia, a peça deve tornar perceptível a falha de separação das estruturas da linha média.⁹ No crânio bífido com

encefalocele, a relação entre defeito ósseo e conteúdo herniado constitui o elemento didático central.¹⁰ Na craniossinostose, a deformação resultante da fusão prematura de suturas possibilita demonstrar como restrições locais de crescimento produzem compensações em outros eixos cranianos.¹¹

A utilização da plataforma Tripo3D no fluxo metodológico deve ser explicitada para garantir reprodutibilidade. O software, porém, não será tratado como fonte de verdade anatômica: a geração automatizada permanecerá subordinada à literatura, à matriz morfológica e à revisão humana, medida coerente com a necessidade de supervisão especializada no uso educacional da inteligência artificial.⁴

As limitações incluem simplificação monomaterial, redução da variabilidade fenotípica e dependência do refinamento digital e da impressão. A etapa atual não mede aprendizagem, e os protótipos não substituem atlas, imagens ou peças anatômicas. Futuramente, após aprovação ética específica, pretende-se aplicá-los em sala de aula para avaliação da fidelidade morfológica percebida, da utilidade pedagógica e da contribuição para o processo de ensino-aprendizagem.

CONCLUSÃO

O projeto propõe uma coleção comparativa de oito protótipos, composta por cabeça infantil de referência, exencefalia, acrania, acromegalia, malformação de Chiari tipo II, holoprosencefalia, crânio bífido com encefalocele e craniossinostose. O emprego da plataforma Tripo3D, associado à curadoria anatômica e à impressão FDM em PLA, apresenta viabilidade metodológica para a construção de um recurso físico acessível e reprodutível.

A principal contribuição esperada é permitir comparação tridimensional direta entre anatomia de referência e alterações com mecanismos distintos. Após a produção e documentação dos oito protótipos, pretende-se realizar sua aplicação em sala de aula, condicionada à aprovação prévia do Comitê de Ética em Pesquisa quando aplicável, para avaliar a conformidade morfológica e a efetividade educacional do conjunto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brumpt E, Bertin E, Tatu L, Louvrier A. 3D printing as a pedagogical tool for teaching normal human anatomy: a systematic review. *BMC Med Educ.* 2023;23(1):783. doi:10.1186/s12909-023-04744-w.
2. Salazar D, Thompson M, Rosen A, Zuniga J. Using 3D printing to improve student education of complex anatomy: a systematic review and meta-analysis. *Med Sci Educ.* 2022;32(5):1209-1218. doi:10.1007/s40670-022-01595-w.
3. Chytas D, Noussios G, Salmas M, Demesticha T, Vasiliadis AV, Troupis T. The effectiveness of three-dimensional printing in undergraduate and postgraduate anatomy

education: a review of reviews. *Morphologie*. 2024;108(361):100759. doi:10.1016/j.morpho.2023.100759.

4. Joseph TS, Gowrie S, Montalbano MJ, Bandelow S, Clunes M, Dumont AS, et al. The roles of artificial intelligence in teaching anatomy: a systematic review. *Clin Anat*. 2025;38(5):552-567. doi:10.1002/ca.24272.

5. Society for Maternal-Fetal Medicine; Monteagudo A. Exencephaly-anencephaly sequence. *Am J Obstet Gynecol*. 2020;223(6):B5-B8. doi:10.1016/j.ajog.2020.08.176.

6. Bijok J, Dąbkowska S, Kucińska-Chahwan A, Massalska D, Nowakowska B, Gawlik-Zawiślak S, et al. Prenatal diagnosis of acrania/exencephaly/anencephaly sequence (AEAS): additional structural and genetic anomalies. *Arch Gynecol Obstet*. 2023;307(1):293-299. doi:10.1007/s00404-022-06584-3.

7. Giustina A, Biermasz N, Casanueva FF, Fleseriu M, Mortini P, Strasburger C, et al. Consensus on criteria for acromegaly diagnosis and remission. *Pituitary*. 2024;27(1):7-22. doi:10.1007/s11102-023-01360-1.

8. Cools MJ, Wellons JC 3rd, Iskandar BJ. The nomenclature of Chiari malformations. *Neurosurg Clin N Am*. 2023;34(1):1-7. doi:10.1016/j.nec.2022.08.003.

9. Malta M, AlMutiri R, Saint Martin C, Srour M. Holoprosencephaly: review of embryology, clinical phenotypes, etiology and management. *Children (Basel)*. 2023;10(4):647. doi:10.3390/children10040647.

10. Markovic I, Bosnjakovic P, Milenkovic Z. Occipital encephalocele: cause, incidence, neuroimaging and surgical management. *Curr Pediatr Rev*. 2020;16(3):200-205. doi:10.2174/1573396315666191018161535.

11. Stanton E, Urata M, Chen JF, Chai Y. The clinical manifestations, molecular mechanisms and treatment of craniosynostosis. *Dis Model Mech*. 2022;15(4):dmm049390. doi:10.1242/dmm.049390.

12. Mathijssen IMJ; Working Group Guideline Craniosynostosis. Updated guideline on treatment and management of craniosynostosis. *J Craniofac Surg*. 2021;32(1):371-450. doi:10.1097/SCS.0000000000007035.