

Uso da impressão tridimensional no ensino e na aprendizagem da Anatomia Humana: Uma revisão integrativa de literatura

Using three-dimensional printing in the teaching and learning of Human Anatomy: An integrative literature review

El uso de la impresión tridimensional en la enseñanza y aprendizaje de la Anatomía Humana: Una revisión bibliográfica integradora

Recebido: 07/09/2023 | Revisado: 20/09/2023 | Aceitado: 23/09/2023 | Publicado: 25/09/2023

Emerson André Negrão do Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7783-1182>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: emerson.nascimento@ics.ufpa.br

Flávia Silva Mendonça

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0800-034X>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: flaviasmendonca@gmail.com

Antônio Marcos da Silva Henriques

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0381-4507>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: antonio.henriques@ics.ufpa.br

Rafael Reis de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7591-7604>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: Rafael-r-oliveira2005@hotmail.com

Sofia de Menezes Alves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0194-5500>
Universidade do Estado do Pará, Brasil
E-mail: sofia.dmalves@aluno.uepa.br

Lucas Guimarães Dias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1314-4516>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: lucasguima529@gmail.com

Márcia Consentino Kronka Sosthenes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5239-2179>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: kronka@ufpa.br

Resumo

O estudo da Anatomia Humana tem passado por inúmeras mudanças ao longo do tempo. Os métodos tradicionais de ensino, como o estudo em cadáveres, ao apresentarem limitações, encontraram na produção de modelos anatômicos a partir da impressão tridimensional (3D) uma solução inovadora para ser utilizada nas práticas de ensino. Assim, o objetivo do presente estudo foi analisar a possibilidade da aplicação da impressão tridimensional nas áreas de ensino e aprendizagem da Anatomia Humana nas escolas médicas. Realizou-se uma análise descritiva, baseada em revisão integrativa da literatura, em estudos publicados entre 2013 e 2022, utilizando os termos (DeCS/MeSH): “Three-Dimensional Printing”, “Medical Education” e “Anatomy”, aplicado em Inglês e seus correspondentes em Espanhol e Português. A impressão 3D mostrou-se uma importante ferramenta para o estudo da Anatomia Humana, de forma a permitir melhor identificação das estruturas anatômicas nos diferentes Sistemas, propiciando maior retenção, a longo prazo, das informações estudadas e potencializando o aprendizado anatômico, em conjunto com outros materiais impressos e virtuais, peças cadavéricas e realidade virtual aumentada. Ressalta-se a importância de investimento no uso da impressão 3D em abordagens educacionais e exploração das possíveis melhorias na educação médica.

Palavras-chave: Impressão tridimensional; Educação médica; Ensino; Anatomia.

Abstract

The study of Human Anatomy has undergone numerous changes over time. Traditional teaching methods, such as the study of cadavers, have been limited and the production of anatomical models using three-dimensional (3D) printing has provided an innovative solution for use in teaching practices. The objective of the present study was to analyze the possibility of applying three-dimensional printing to the teaching and learning of Human Anatomy in medical schools.

A descriptive analysis was carried out, based on an integrative literature review of studies published between 2013 and 2022, using the terms (DeCS/MeSH): "Three-Dimensional Printing", "Medical Education" and "Anatomy", applied in English and their correspondents in Spanish and Portuguese. 3D printing is an important tool for studying Human Anatomy, enabling better identification of anatomical points in the different systems, providing greater long-term retention of the information studied and enhancing anatomical learning, in conjunction with other printed and virtual materials, cadaveric parts and augmented virtual reality. The importance of investing in the use of 3D printing in educational approaches and exploring possible improvements in medical education is highlighted.

Keywords: Three-dimensional printing; Medical education; Teaching; Anatomy.

Resumen

El estudio de la Anatomía Humana ha experimentado innumerables cambios a lo largo del tiempo. Los métodos de enseñanza tradicionales, como el estudio de cadáveres, han tenido sus limitaciones, y la producción de modelos anatómicos mediante impresión tridimensional (3D) ha proporcionado una solución innovadora para su uso en las prácticas docentes. El objetivo del presente estudio era analizar la posibilidad de aplicar la impresión tridimensional a la enseñanza y el aprendizaje de la Anatomía Humana en las facultades de medicina. Se realizó un análisis descriptivo, basado en una revisión bibliográfica integradora de estudios publicados entre 2013 y 2022, utilizando los términos (DeCS/MeSH): "Three-Dimensional Printing", "Medical Education" y "Anatomy", aplicados en inglés y sus correspondientes en español y portugués. La impresión 3D es una herramienta importante para el estudio de la Anatomía Humana, permitiendo una mejor identificación de los puntos anatómicos en los diferentes sistemas, proporcionando una mayor retención a largo plazo de la información estudiada y mejorando el aprendizaje anatómico, en conjunto con otros materiales impresos y virtuales, partes cadavéricas y realidad virtual aumentada. Se hace hincapié en la importancia de invertir en el uso de la impresión 3D en los enfoques educativos y explorar posibles mejoras en la educación médica.

Palabras clave: Impresión tridimensional; Educación médica; Enseñanza; Anatomía.

1. Introdução

Desde o século XVII, o estudo da Anatomia Humana baseia-se na prática de dissecação de cadáveres. No entanto, os elevados custos para a preservação dos corpos e dos laboratórios associados, bem como, as questões éticas envolvendo a baixa doação de corpos levaram à procura de novas alternativas de ensino (Radzi *et al.*, 2022). Com o avanço da tecnologia da indústria nos últimos anos e sua inserção junto aos cursos de Saúde, novos dispositivos digitais surgiram no intuito de melhorar a prestação de cuidados à Saúde; destacando-se a adoção da impressão 3D nas escolas médicas, a qual cresceu de modo importante nos últimos 5 anos (Wickramasinghe *et al.*, 2022). Assim, o emprego de modelos tridimensionais impressos para ensino e aprendizagem anatômica surge como alternativa aos métodos tradicionais, pela acessível reprodução de material, somado ao baixo custo de produção (Yuen, 2020). Os relatos do uso de Metodologia inovadora datam da década de 1980, tendo sido implementada pela redução de peças e melhorando o acesso a essa tecnologia.

Inicialmente faz-se importante citarmos que a fabricação de filamentos fundidos (FFF) foi um gatilho importante para a disseminação do Método da impressão 3D, ocorrendo pelo aquecimento do filamento estreito e colorido que posteriormente será extrudado (Silver, 2019). Deste modo, o processo de impressão inicia-se pela transmissão de dados à impressora a partir de um modelo virtual no computador, seguindo-se o comando para fundir o material, que será então, extrudado na base da máquina de impressão e, em seguida, será aplicado de maneira "aditiva", ou seja, por empilhamento de camada a camada, a fim de ser transformado em objeto físico (Ye *et al.*, 2020).

Shelmerdine *et al.* (2018) afirmaram que os dados desses modelos virtuais normalmente são originados de tomografia computadorizada (TC) e, com menor frequência, de ressonância magnética e ultrassonografia. Em seguida, tais dados são segmentados, processados e convertidos em um formato de malha 3D, para então, formar peças complexas. Os materiais mais utilizados são Nylon durável, ácido polilático, gesso, alumínio e materiais têxteis (Shelmerdine *et al.*, 2018; Ye *et al.*, 2020).

A mudança de posição da base da impressora em relação ao bocal em que o material extrudado é liberado permite a formação das estruturas sólidas (Yuen, 2020), sendo que pouca ou quase nenhuma intervenção é realizada no processo. No pós-processamento, há necessidade de lapidação do objeto impresso, onde se inclui a remoção de peças de suporte, o lixamento, o polimento, a montagem – em casos de múltiplas peças – o alisamento químico e a cura UV (Meyer-Szary *et al.*, 2022). Assim que finalizados, os modelos costumam ser aplicados em Aulas Práticas como método de ensino anatômicos (Radzi *et al.*, 2022).

Estudos prévios relatam que a inserção da referida tecnologia permitiu a diversificação sobre a abordagem da Anatomia, ilustrando-a das mais variadas formas e cativando a atenção do aluno (Radzi *et al.*, 2022). Esses modelos ganharam maior importância especialmente no período pós-pandêmico de COVID-19, pela possibilidade de ensino com distanciamento social (Iwanaga *et al.*, 2021). Além disso, a possibilidade de o aluno manipular as peças tridimensionais, e não somente observá-las, tem sido registrada positivamente em determinadas escolas, especialmente pelo auxílio à compreensão de órgãos mais complexos e de difícil obtenção, com ou sem alterações patológicas (Radzi *et al.*, 2022; Ye *et al.*, 2020).

Para além do aluno, modelos com alterações patológicas têm sido úteis para elucidar dúvidas de pacientes sobre as suas próprias doenças, com registro de fortalecimento do vínculo médico. A impressão tridimensional também tem destaque na educação e treinamentos cirúrgicos, além de ser um potencial ferramenta didática para autópsia, simulação computacional, modelagem anatômica e plastificação (Meyer-Szary *et al.*, 2022; Ye *et al.*, 2020).

Neste sentido, o presente estudo, através de uma revisão integrativa de literatura, tem por objetivo analisar a possibilidade da aplicação da impressão tridimensional nas áreas de ensino e aprendizagem da Anatomia Humana nas escolas médicas.

2. Metodologia

O presente estudo trata de uma análise descritiva, baseada em uma revisão integrativa de literatura, a qual é o tipo mais amplo de método de revisão de pesquisa, permitindo a inclusão simultânea de pesquisas experimentais e não-experimentais na compreensão do fenômeno de interesse (Whittemore & Knafl, 2005). Para a construção deste estudo, conforme Figura 1 foram seguidas as seguintes etapas: definição do tema; identificação da questão norteadora; busca literária por meio de bases de dados eletrônicas, com estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão para selecionar a amostra a ser analisada; seleção dos estudos encontrados; análise dos resultados e apresentação dos resultados evidenciados. A pesquisa foi realizada nas bases de dados eletrônicas: National Library of Medicine and National Institutes of Health (PubMed), Scientific Eletronic Library Online (SciELO), Biblioteca Virtual da Saúde (BVS) e Cochrane Library, delineando como questão norteadora: “É possível utilizar a impressão 3D no ensino e aprendizagem da Anatomia Humana?”.

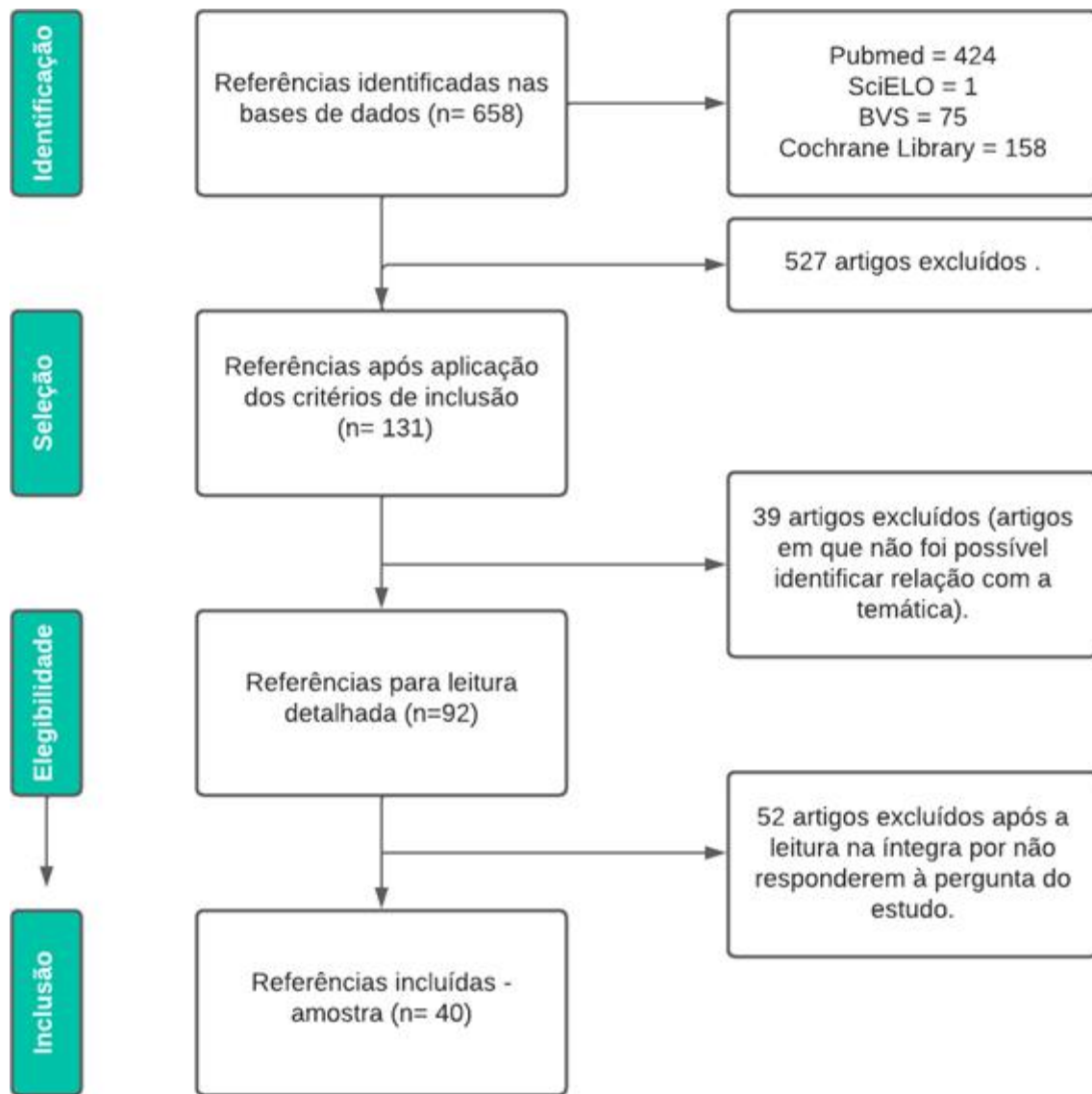
Para responder tal questionamento, foram utilizados os termos (DeCS/MeSH): “Three-Dimensional Printing”, “Medical Education” e “Anatomy”, usando o operador Booleano (AND/OR) aplicado em Inglês e seus correspondentes em Espanhol e Português. A combinação entre os termos utilizada foi: (“Three-Dimensional Printing” OR “Three Dimensional Printing” OR “Three-Dimensional Printings” OR “3-Dimensional Printing” OR “3 Dimensional Printing” OR “3-Dimensional Printings” OR “3-D Printing” OR “3 D Printing” OR “3-D Printings” OR “3D Printing” OR “3D Printings”) AND (“Medical Education” OR “Graduate Medical Education” OR “Continuing Medical Education”) AND (“Anatomy” OR “Anatomies” OR “Morphology” OR “Histology” OR “Anatomy” and “Histology”). A busca dos estudos primários foi realizada no período de janeiro a fevereiro de 2023.

Foram incluídos: estudos publicados em Português, Espanhol ou Inglês, entre os anos de 2013 e 2022; disponibilizados na íntegra e gratuitamente; e artigos originais e/ou revisões que atendiam a temática abordada especificamente. Inicialmente, os artigos que não abordavam a temática sobre a impressão 3D, ou abordavam seu uso em diferentes Áreas (Engenharia e algumas Especialidades Médicas) que não corroboravam com a temática proposta nesta pesquisa foram excluídos. Posteriormente, os artigos que não responderam à questão norteadora também foram removidos.

A busca e a seleção dos estudos foram realizadas por 06 pesquisadores independentes, de maneira padronizada. Os resultados encontrados foram comparados entre os pesquisadores e foram incluídos os consensos. Para os artigos em divergência, buscou-se consenso entre todos os pesquisadores envolvidos na pesquisa. O fluxograma abaixo descreve o processo de seleção dos artigos (Figura 1). Por ser uma revisão integrativa da literatura e, conseqüentemente, não se tratar de uma abordagem com

peçoas, essa pesquisa não foi submetida a um Comitê de Ética em Pesquisa (CEP).

Figura 1 – Fluxograma referente a busca de artigos. Diagrama de fluxo esquemático do processo de decisão dos dados do trabalho; evidenciam-se as etapas de identificação, seguidas de seleção, elegibilidade e inclusão, com a contabilização de referências excluídas em cada fase do estudo.



National Library of Medicine and National Institutes of Health (PubMed); Scientific Eletronic Library Online (SciELO); Biblioteca Virtual da Saúde (BVS).

Fonte: Autores (2023).

3. Resultados

Após identificação, seleção e análise dos artigos, foram incluídos 40 estudos, conforme os critérios de seleção adotados, sendo os resultados expostos no Quadro 1, onde constam autoria, objetivo e desfecho do estudo.

Quadro 1 – Principais resultados dos artigos incluídos nesta revisão integrativa. Apresentam-se os resultados por autor e ano, com seus respectivos objetivos e desfechos.

AUTORES – ANO	OBJETIVO DO ESTUDO	DESFECHO – CONCLUSÃO
AbouHashem <i>et al.</i> , 2015.	Descrever o uso bem-sucedido da impressão 3D no ensino da Anatomia Humana.	O uso da impressão 3D (principalmente de ossos) descrito como um sucesso nas universidades de Macquarie, em Sydney e de Western na Austrália, tendo como perspectiva o envolvimento de outras estruturas anatômicas, com ênfase naquelas que são difíceis de observar e manipular, em um futuro próximo.
Asghar <i>et al.</i> , 2022.	O objetivo do estudo foi examinar os benefícios e a adequação do 3DPM e sua comparação com os métodos tradicionais de aprendizado de Anatomia.	Os participantes expostos ao modelo impresso em 3D tiveram melhor desempenho que os participantes que usaram metodologias tradicionais. Assim, o modelo impresso em 3D é uma ferramenta potencial para o ensino de Anatomia.
Baskaran <i>et al.</i> , 2016.	Apresentar os resultados de uma revisão da literatura que investiga os papéis e aplicações da impressão 3D no treinamento anatômico e cirúrgico, bem como, na Neurocirurgia.	Várias aplicações dentro desses campos foram encontradas, com muitas melhorando significativamente a qualidade da Anatomia e da Educação Cirúrgica e a prática da Neurocirurgia. Eles também ofereceram vantagens sobre abordagens e práticas existentes.
Bati <i>et al.</i> , 2020.	Comparar a eficácia do modelo sólido com imagem MRCP, imagem <i>3D-Standard Tessellation Language</i> e modelo em escala 1:1 em 5 cenários diferentes de doença hepatopancreatobiliar apresentados a residentes de Cirurgia Geral.	Os modelos 3D distintos eram extremamente aplicáveis e fáceis de usar a partir de um ponto clínico de ductos pancreatobiliares dilatados para o tratamento de patologias pancreatobiliares. Esta técnica pode melhorar significativamente o resultado da cirurgia pancreatobiliar ao fornecer uma melhor organização pré-operatória e uma ferramenta educacional.
Bohl <i>et al.</i> , 2019.	Avaliar a utilidade de um modelo de coluna personalizado impresso em 3D para ajudar os estagiários cirúrgicos a entender e executar a escala de graduação de osteotomia de Schwab.	Estudantes de Medicina que receberam o modelo 3D tiveram um desempenho significativamente melhor nas avaliações escritas e práticas do que os participantes que receberam apenas o artigo.
Cai <i>et al.</i> , 2020.	Comparar a eficácia do uso dos modelos 3DP, VR e NP para educar os alunos sobre as deformidades anatômicas da JVC (Junção craniovertebral).	Como ferramentas complementares, acredita-se que os modelos 3DP e VR são eficazes para melhorar a compreensão das relações espaciais, fornecendo <i>feedback</i> tátil e patomorfologia 3D da região CVJ.
Cercenelli <i>et al.</i> , 2022.	Desenvolver e testar um protótipo de uma ferramenta inovadora baseada em AR para educação médica em Anatomia Humana.	Os resultados deste estudo piloto sugerem que o modelo colaborativo AeducaAR pode ser uma ferramenta educacional válida que atualmente fornece uma aquisição de conhecimento anatômico comparável aos livros didáticos tradicionais.
Chen <i>et al.</i> , 2017.	Avaliar a eficiência do aprendizado com modelos de crânio impressos em 3D comparando o atlas 2D, crânios cadavéricos e crânios impressos em 3D.	Crânios impressos em 3D facilitam o processo de aprendizagem sobre variações anatômicas, auxiliando mais no reconhecimento das diversas estruturas, quando comparados a crânios cadavéricos e a atlas.
Dong <i>et al.</i> , 2018.	Avaliar a viabilidade da fabricação de modelos 3D bAVM, para validar a fidelidade do modelo intraoperatório e o uso de modelos médicos como adjuvante para planejamento cirúrgico, consulta ao paciente e treinamento de residentes.	O uso de modelos impressos em 3D tem maior valor no recorte do aneurisma, simulação pré-operatória e compreensão precisa da anatomia local. Com os modelos impressos de bAVM, o cirurgião pode conhecer as propriedades estruturais da malformação arteriovenosa cerebral e dos vasos relacionados, orientando no planejamento do tratamento.
Goudie <i>et al.</i> , 2019.	Descrever o desenvolvimento e a aplicação de modelos de vasculatura impressos em 3D dentro de um grupo de interesse em radiologia para determinar sua eficácia como ferramentas de aprendizado suplementares ao ensino tradicional baseado em palestras.	Os resultados dessas avaliações revelam que os modelos impressos em 3D são um meio econômico e avançado para ensinar habilidades processuais de forma mais eficaz quando servem como ferramentas complementares aos métodos tradicionais de aprendizado.
Guliev <i>et al.</i> , 2019.	Determinar a eficácia do uso do modelo dobrável segmentado impresso tridimensional (3D) do sistema pélvico-liceal (SCP) para melhorar a curva de aprendizado dos residentes.	Os modelos colapsáveis segmentados em 3D do PCS, permitem um exame parcial e completo, além de serem promissores para a melhoria da curva de aprendizado dos residentes.
Haleem <i>et al.</i> , 2018.	Analisar e descrever como o cirurgião e o paciente podem se beneficiar com a implementação da manufatura aditiva no manejo de doenças cardiovasculares.	Esta tecnologia atende facilmente a vários requisitos de Cardiologia devido à sua flexibilidade no <i>design</i> e fabricação de modelos 3D de pacientes específicos.
Hu <i>et al.</i> , 2022.	A hipótese principal do estudo era de que o modelo 3D aumentava a competência dos estagiários na leitura de imagens, compreensão anatômica e capacidade de executar cirurgias.	Foi descoberto que os modelos 3DP facilitaram a compreensão da anatomia do tumor e a relação espacial das lesões do tumor com os órgãos e estruturas circundantes.
Javaid & Haleem, 2018.	Demonstrar os benefícios do uso das tecnologias para criar objetos a partir de um modelo virtual.	A popularidade e o avanço dessa tecnologia são para <i>design</i> e fabricação de implantes, engenharia de tecidos, planejamento cirúrgico pré-operatório e até mesmo no treinamento de médicos e cirurgiões.

Karsenty <i>et al.</i> , 2021.	Avaliar a utilidade de modelos impressos em 3D no ensino de defeitos cardíacos congênitos para estudantes de Medicina.	Os modelos de defeitos cardíacos congênitos impressos em 3D são um recurso útil para o ensino em escolas de medicina, melhorando significativamente a aquisição de conhecimento de CHD para estudantes de Medicina.
Kiesel <i>et al.</i> , 2022.	Avaliar os efeitos de um modelo 3D na educação de estudantes, bem como, a satisfação destes com o modelo e com as habilidades treinadas.	O modelo 3D oferece uma ferramenta que permite uma associação entre a palpação e a visualização durante o exame físico ginecológico, possibilitando uma maior compreensão e retenção das informações obtidas.
Krishnasamy <i>et al.</i> , 2021.	Criar um modelo cardíaco 3D e avaliar a utilidade na área médica.	O modelo pode melhorar a precisão do diagnóstico, auxiliar no planejamento de intervenções complexas e auxiliar na compreensão de doenças cardíacas por estudantes de medicina e residentes.
Lau & Sun, 2018.	Analisar e discutir as principais aplicações clínicas da impressão 3D doenças cardíacas congênitas (DCC), juntamente com a precisão dos modelos cardíacos impressos em 3D na replicação de anatomia e patologia cardíaca complexas.	As aplicações de modelos impressos em 3D de DCC são multidirecionais com alta precisão na replicação de anatomia e patologia cardíaca complexa, particularmente no planejamento pré-operatório, simulação pré-cirúrgica, orientação intraoperatória, educação médica, bem como, como comunicação na prática médica.
Lau & Sun, 2022.	Investigar a aquisição imediata de conhecimento, bem como a retenção de conhecimento a longo prazo entre os estudantes de Medicina com o uso da impressão 3D em comparação com a abordagem de ensino convencional.	Os resultados deste estudo não sugeriram melhora significativa na aquisição e retenção de conhecimento em comparação com os métodos convencionais de ensino. No entanto, o benefício positivo que a impressão 3D pode trazer para melhorar a experiência de aprendizagem dos alunos não deve ser negligenciado.
Lau <i>et al.</i> , 2018.	Investigar a precisão dimensional e o valor clínico do modelo impresso em 3D de doença cardíaca congênita para planejamento pré-operatório, comunicação na prática médica e educação médica.	O modelo de coração flexível impresso em 3D facilita o planejamento pré-operatório e melhora o resultado cirúrgico; melhora a comunicação médico-paciente e interprofissional; e melhora a abordagem no ensino médico.
Li <i>et al.</i> , 2015.	Investigar o impacto de modelos 3D impressos na identificação de fraturas espinais para estudantes de Medicina, assim como, comparar os benefícios relatados, em comparação com imagens 2D e com apresentações 3D.	Este estudo randomizado revelou que os modelos impressos 3D marcadamente melhoraram a identificação da anatomia da fratura espinal por estudantes de Medicina.
Loke <i>et al.</i> , 2017.	Avaliar o impacto de modelos 3D para residentes em Pediatria compreenderem tetralogia de Fallot durante sessões de ensino.	Os modelos 3D melhoram a educação de residentes no que tange à doença cardíaca congênita, especialmente na tetralogia de Fallot.
Noël <i>et al.</i> , 2021.	Avaliar a viabilidade do uso de modelos 3D para ajudar estudantes de Medicina a estudar os territórios vasculares das artérias coronarianas enquanto aprendem a interpretar ECG e imagens ecocardiográficas.	Este estudo mostrou que os modelos de coração impressos em 3D trazem uma experiência tátil e visual que pode complementar a compreensão anatômica no ensino de ultrassom cardíaco “à beira leito”.
Nusem <i>et al.</i> , 2022.	Investigar os comportamentos e interações de alunos com corações cadavéricos e com corações 3D impressos, durante um <i>workshop</i> sobre deformações cardíacas congênitas.	Foi identificado que, embora os estudantes tenham usado os corações cadavéricos por mais tempo, na maioria dos aspectos avaliados, como os tipos de interações, os modelos 3D são amplamente comparáveis.
O’Brien <i>et al.</i> , 2021.	Investigar se o uso de modelos 3D facilita, em iniciantes, o aprendizado de anatomia radiológica na TC multiplanar, quando comparada às ferramentas 2D tradicionais de aprendizado.	O estudo mostrou que o uso de modelos 3D impressos da anatomia traqueobrônquica não teve vantagens imediatas sobre os livros de imagens 2D. Contudo, o uso do modelo 3D implementou a habilidade dos estudantes para reter as informações aprendidas.
Osorio-Toro, 2020.	Construir conhecimento no entendimento da anatomia do ouvido humano com o uso de modelos 3D; e experimentos de dissecação do ouvido, a partir da dissecação e modelamento 3D.	A partir dos modelos 3D, os estudantes compreenderam profundamente a anatomia do ouvido médio e interno, adquiriram destreza cirúrgica, propuseram e analisaram projetos que lhes permitiram participar de eventos acadêmicos.
Radzi <i>et al.</i> , 2020.	Desenvolver um coração 3D impresso para o aprendizado de Anatomia; avaliar as diferenças morfológicas entre os modelos usados e a visão dos estudantes.	Imprimir um coração 3D usando multimateriais foi possível, podendo ser uma ferramenta prática e de baixo custo para o ensino de anatomia.
Radzi <i>et al.</i> , 2022.	Explorar o que os estudantes consideram experiências de aprendizado importantes no uso de espécimes de coração e pescoço plastinados, quando comparadas aos modelos 3D.	Os espécimes plastinados são melhores para anatomia complexa, enquanto o modelo 3D impresso seria mais aplicável ao ensino de anatomia básica, devido à facilidade de manuseio.
Shen <i>et al.</i> , 2019.	Produção de um modelo 3D palpável, o qual aborde todos os detalhes sobre a anatomia, além de auxiliar no estabelecimento de uma base sólida de conhecimento cirúrgico aos estudantes.	Os modelos impressos em 3D podem auxiliar cirurgiões e professores no ensino de anatomia. O modelo pode ser personalizado e projetado repetidamente com baixo custo e alta eficiência.
Su <i>et al.</i> , 2018.	Verificar a eficácia do uso de corações 3D impressos na Educação Médica.	Os modelos 3D foram bem avaliados pelos estudantes, sendo eficaz no ensino médico sobre doença cardíaca congênita.

Tatar <i>et al.</i> , 2020.	Avaliar os efeitos e a eficácia de modelos anatômicos femininos impressos em 3D para treinamento dos procedimentos Sling com fita transobturatória (TOT) e Fita vaginal sem tensão (TVT).	Os modelos 3D são aplicáveis à educação de Anatomia Básica de estudantes e residentes, treinamento de cirurgiões iniciantes antes de cursos com cadáveres, planejamento cirúrgico e informação aos pacientes antes de procedimentos.
Tripodi <i>et al.</i> , 2020.	Examinar o efeito de uma série de atividades de aprendizado interativas com ossos 3D na atração e envolvimento de alunos do primeiro ano de osteopatia.	Os modelos 3D impressos, associados às atividades de aprendizado, são efetivas em aumentar o engajamento dos estudantes nas aulas de Anatomia, além de ajudar na preparação dos estudantes para as práticas <i>in vivo</i> .
Vatankhah <i>et al.</i> , 2021.	Determinar o impacto no aprendizado de residentes de Oftalmologia, usando modelos 3D de tomografias da órbita, para propósitos de treinamento.	Os variados benefícios da impressão 3D incluem reforço abstrato de conteúdos, estímulo da imaginação, ganho de percepção, aumento da retenção de conhecimento, expansão da capacidade de memorização e maior atenção e foco.
Vatankhah <i>et al.</i> , 2022.	Desenvolver um modelo 3D educacional para o treinamento de residentes de Oftalmologia.	A compreensão tridimensional das áreas do corpo descritas, usando modelos criados a partir de TC, proporciona uma visualização espacial mais realística e atinge diferentes áreas anatômicas.
Wilk <i>et al.</i> , 2020.	Rastrear o que os estudantes de Faculdades de Medicina sabem acerca do uso da tecnologia de impressão 3D na Medicina.	Estudantes possuem conhecimentos gerais sobre o uso da tecnologia de impressão 3D na Medicina, sobretudo a combinação de métodos tradicionais de aulas com cadáveres e modelos 3D.
Wu <i>et al.</i> , 2018.	Investigar o uso de modelos 3D impressos versus imagens radiográficas, enquanto técnicas para a educação médica sobre anatomia espacial óssea e fraturas.	Modelos 3D impressos podem aumentar o entendimento, por estudantes de medicina, da anatomia espacial óssea e de fraturas em alguns sítios anatomicamente complexos.
Yao <i>et al.</i> , 2016.	Fazer um levantamento da aplicação da impressão 3D na cirurgia hepática e na medicina.	Alguns benefícios da impressão 3D incluem planejamento cirúrgico, educação médica, educação de pacientes, próteses para implantes, entre outros.
Ye <i>et al.</i> , 2020.	Avaliar a aplicação de modelos 3D impressos na educação médica e compará-los com os métodos tradicionais de ensino, para entender as suas vantagens e desvantagens no ensino de Anatomia.	No ensino da Anatomia Humana usando impressão 3D, os resultados não foram inferiores aos da metodologia tradicional. O grupo que usou 3D obteve melhores pontuações que os que usaram impressão 2D ou cadáveres. Os estudantes do grupo 3D também relataram maior satisfação com o Ensino.
Yuen, 2020.	Investigar o papel da impressão 3D na Educação em Anatomia de estudantes não graduados de Medicina.	A impressão 3D na educação em Anatomia para estudantes não-graduados é barata e replicável; fornece aos educadores meios mais fáceis para demonstrar patologias e variações anatômicas raras.
Zhang <i>et al.</i> , 2021.	Avaliar o efeito da realidade virtual e de modelos 3D na obtenção de entendimento morfológico relacionado à operação de SSRO, para cirurgiões iniciantes.	Os modelos 3D impressos foram efetivos em auxiliar cirurgiões iniciantes a obter entendimento morfológico das estruturas anatômicas associadas ao SSRO. Os modelos de realidade virtual também alcançaram bons resultados no aprendizado da Anatomia.

Fonte: Autores (2023).

4. Discussão

Na avaliação comparativa entre o uso do presente tipo de ferramenta pedagógica e as demais abordagens do Ensino tradicional, determinou-se os principais contrapontos: associação com a realidade, nível de detalhe estrutural e limitação de acervo. Ao utilizar estritamente recursos visuais unidimensionais, como apresentações em dispositivos e atlas anatômicos, estudantes submetidos a testes teóricos não apresentaram dificuldade significativa ao responderem os questionários. Isso porque esse tipo de avaliação requer apenas a habilidade de memória associativa entre palavras e imagens. No entanto, ao submeter tais estudantes a testes práticos, observa-se certa limitação para o reconhecimento de estruturas anatômicas.

Em estudos com testes realizados após aulas utilizando peças em três dimensões, é possível identificar uma maior capacidade associativa com a realidade, que é multidimensional, especialmente em estruturas com acidentes anatômicos complexos, a exemplo de vasos sanguíneos, ouvido média, base do crânio e árvore brônquica (Chen *et al.*, 2017; O'Brien *et al.*, 2021; Vatankhah *et al.*, 2021; Goudie *et al.*, 2019).

Comparando, ainda, com o uso de peças cadavéricas em instituições com limitação de recursos financeiros e sem maiores possibilidades de atualização do acervo, peças tridimensionais impressas mostraram-se mais eficazes para retenção de conhecimento (Osorio- Toro, 2020). O motivo para tal é a defasagem das peças cadavéricas que ocorre com o tempo, por questões biológicas de conservação, pelo manuseio e pela necessidade de preparo e manutenção. Ocorre, então, pelo tempo cronológico,

a danificação de pontos anatômicos e uma nova dificuldade para diferenciar reais variações anatômicas de falhas estruturais criadas por tais influências.

Uma das alternativas para tais dificuldades com cadáveres, ainda no Ensino tradicional, é o uso da plastinação, uma técnica que envolve a infiltração de um cadáver desidratado com um composto sintético, numa tentativa de desacelerar o processo de degradação de determinada peça. No entanto, tal abordagem ainda compartilha dos mesmos desafios supracitados: requer a aquisição de um número suficiente de material cadavérico, mão de obra para produzir as segmentações desejadas, armazenamento e uso de materiais sintéticos para estruturar o produto. Em contrapartida, a impressão tridimensional possui menor degradação, contando com a possibilidade de produção ilimitada de peças, e apresentando uma relevante vantagem em relação à plastinação e ao uso de espécimes (Baskaran *et al.*, 2016; Radzi *et al.*, 2022).

A depender do tipo de filamento utilizado para impressão das peças, muitas dessas intempéries de produção e armazenamento podem ser contornadas ou, pelo menos, postergadas. O custo para isso é interessante, especialmente quando pensamos no processo de aquisição de ambas as peças: para a cadavérica, são necessárias várias formalidades burocráticas, pelo peso ético de utilizá-las e o valor monetário para conservá-las; para a peça em 3D, importa às Instituições de Ensino, principalmente o modelo virtual e o custo para imprimi-lo, apesar de estudos apontarem certa preferência de estudantes por peças cadavéricas (Nusem *et al.*, 2022; Yao *et al.*, 2016).

Nesse contexto, um dos desafios a serem elencados em relação à impressão 3D é a necessidade de conhecimentos básicos em Informática, o que requer capacitação da equipe, do profissional do Magistério ou, ainda, a participação de um profissional habilitado para reproduzir os modelos de processamento disponíveis e já testados em estudos prévios (Shen *et al.*, 2019). Além disso, estudos identificam as limitações acerca de baixa fidelidade na replicação das propriedades físicas de cor e textura dos tecidos moles (Yuen, 2020).

Novamente, em termos de vantagem, um estudo randomizado realizado por Cai *et al.* (2020) atestou a eficácia do uso de modelos tridimensionais impressos a partir de análise de aprendizagem em estruturas cranianas e de vértebras. Os estudantes foram submetidos a testes com cadáveres, aulas expositivas e leitura de atlas anatômico, realidade virtual (RV) e impressão tridimensional, apresentando feedback subjetivo mais favorável às duas últimas ferramentas, especialmente pela facilidade do uso. Com testes quantitativos, os grupos que utilizaram peças em 3D junto à RV obtiveram maiores taxas de acertos na identificação de pontos anatômicos, em comparação aos demais métodos.

Dessa forma, a realidade aumentada é uma potencialidade para melhoria do uso de imagens em 3D impressas. Quando em conjunto, observou-se que elas melhoram a percepção topográfica, a partir da interação humano-computador e aprimoramento da percepção sensorial do usuário. Decerto, com tal combinação tecnológica, acadêmicos da Área da Saúde podem experimentar, por exemplo, a dissecação de peças, sem os riscos que lhe atribuímos quando feito em cadáveres e com a vantagem de reiniciar o processo para que outro acadêmico treine (Cercenelli *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2021).

Cercenelli *et al.* (2022) obtiveram resultados favoráveis ao sinergismo entre VR e peças tridimensionais em seu estudo, durante os seis anos de graduação em Medicina, mas, principalmente no segundo ano de Curso, que representa o período focado em Anatomia Macroscópica. O estudo ressalta como a interação com profissionais da Área de Tecnologia da Informação e da Engenharia Biomédica é fundamental para o desenvolvimento tecnológico e melhorias da ferramenta.

Nessa perspectiva, o estudo randomizado de Zhang *et al.* (2021) demonstrou que os modelos VR e impressão 3D foram instrumentos complementares eficazes no aprendizado da Morfologia relacionada especificamente à osteotomia sagital do ramo mandibular. Além disso, os modelos 3D forneceram feedback tátil interativo e estimularam a iniciativa de aprendizado subjetivo, o que ajudou os cirurgiões iniciantes a entender melhor as relações espaciais entre as estruturas anatômicas. Ademais, a visão desempenha o papel mais importante no aprendizado da morfologia anatômica devido ao seu rápido processamento, relativa confiabilidade e paralelismo. No entanto, é inadequado usar apenas o sentido visual para aprender estruturas complexas e

procedimentos cirúrgicos. Logo, os modelos 3D atendem à demanda por estimulação multissensorial (Cai *et al.*, 2020; Cercenelli *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021).

A maioria dos estudos que criam modelos reproduzíveis de peças em 3D utiliza a tomografia computadorizada como base de dados. Dos resultados do exame, são extraídos arquivos em formato DICOM, um padrão universal de arquivos tomográficos, os quais são posteriormente submetidos à segmentação para, então, gerar o modelo virtual 3D em escala real, já como um arquivo em formato de estereolitografia (STL). Com a devida autorização dos pacientes, tal exame oferece uma considerável variedade de peças patológicas, especialmente as alterações congênicas de vísceras e de ossos (Haleem *et al.*, 2018; Javaid & Haleem, 2018; Radzi *et al.*, 2020).

Nas áreas de Neuroanatomia, Anatomia cardíaca e abdominal, estudos de meta-análise e de recomendação sustentam que a impressão 3D é uma ferramenta útil para o estudo da Anatomia normal, incomum e patológica (Ye *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2018).

Importantes resultados comprovam a efetividade do uso da impressão 3D no ensino de doenças congênicas (Loke *et al.*, 2017; Lau & Sun, 2018; Su *et al.*, 2018; Lau *et al.*, 2018). No estudo de Karsenty *et al.*, em 2021, estudantes de Medicina sextanistas assistiram aulas direcionadas para doenças cardíacas congênicas, tendo sido gerados randomicamente um grupo com o uso de impressão tridimensional e um grupo controle, sem o uso da peça patológica. Foi observada melhora na obtenção de conhecimento do primeiro grupo, em avaliação pós-teste objetivo.

O valor da impressão 3D foi demonstrado em uma ampla gama de aplicações, como treinamento de residentes de Cirurgia Cardiorácica. Em 2021, Noël *et al.* demonstraram a praticidade dos modelos cardíacos impressos em 3D e as percepções positivas dos alunos em relação à sua utilidade como uma ferramenta de ensino complementar ao ensino de ultrassom à beira do leito e treinamento de interpretação de ECG. Mais de 90% dos entrevistados acharam que os modelos de coração impressos em 3D facilitaram o aprendizado do ultrassom cardíaco, além da compreensão da estrutura e orientação do ultrassom 2D. Estes resultados sugerem que os modelos 3D podem ser usados como recurso para aumentar a experiência dos alunos durante a aquisição de habilidades.

Considerável parte dos estudos extraídos das bases de dados realiza testes randomizados com peças em 3D sobre o sistema esquelético. A associação das radiografias de ossos fraturados com suas respectivas imagens impressas parece ter um bom efeito na aprendizagem sobre a anatomia espacial óssea em locais anatomicamente complexos (Wu *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2015).

O uso de modelos impressos mostrou-se útil para compreensão de classificações de determinados padrões de doenças e suas respectivas indicações cirúrgicas. Em 2019, Bohl *et al.* testaram o efeito de um modelo de coluna vertebral no desempenho de osteotomias por estudantes de Medicina e internos. Para entender melhor a escala de graduação de osteotomia de Schwab – um sistema conceitual em cirurgia da coluna que requer conhecimento detalhado da Anatomia – os envolvidos foram randomizados em grupos com ou sem o modelo de coluna impresso para estudo, com desempenho significativamente melhor no grupo que utilizou a peça em três dimensões.

O uso dos modelos impressos é recorrente nos cursos de subespecialidades na residência médica, com o enfoque voltado para a Anatomia Patológica e seu respectivo plano cirúrgico. O benefício obtido da impressão de imagens radiológicas é a oportunidade de personalizar o atendimento do paciente e auxiliar o residente a reconhecer as variações da Anatomia normal. Além disso, oportuniza a previsão do ato cirúrgico seguindo a anatomia específica do paciente (Bati *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2022, Tatar *et al.*, 2020).

Uma outra vantagem já explorada é o redimensionamento das imagens patológicas obtidas em exames radiológicos, de modo a destacar apenas a alteração de determinada enfermidade, a fim de que o estudante possa observar com detalhes não vistos em livros-atlas e ao mesmo tempo manipular a peça. A fixação entre partes de peças com ímãs é uma realidade que permite

também isolar detalhes da peça sem perda da configuração do restante do modelo. Essa metodologia de ensino associada ao toque estimula mais áreas corticais para o processamento de informações, podendo criar memórias significativas de longa duração (Li *et al.*, 2015; Asghar *et al.*, 2022; Lau & Sun, 2022; Guliev *et al.*, 2019).

No campo da Anatomia Radiológica, um estudo prospectivo investigou se o uso de modelo impresso em 3D poderia facilitar o aprendizado por iniciantes em tomografia computadorizada (TC) quando comparado a ferramentas de aprendizado tradicionais baseadas em 2D. Os estudantes de Medicina do primeiro ao terceiro ano foram recrutados, pareados por gênero e nível de treinamento e randomizados para o grupo 2D ou 3D. Os resultados deste estudo mostraram desempenho semelhante entre alunos usando modelos 2D e 3D quando testados imediatamente após a atividade de aprendizagem. No entanto, ao avaliar a retenção do conhecimento, foi encontrado melhor desempenho daqueles que estudam com um modelo impresso em 3D (O'Brien *et al.*, 2021).

Para além do laboratório de Anatomia, essa tecnologia foi testada em espaços acadêmicos de simulação realística, associando à prática clínica. Em 2022, um estudo avaliou o valor de um modelo de pelve feminina impresso em 3D para ensino de exame ginecológico a estudantes de Medicina. Concluiu-se que o grupo que utilizou a peça em 3D para treinar previamente obteve melhor resultado no teste sobre anatomia pélvica, em detrimento do grupo que não treinou as habilidades com o modelo (Kiesel *et al.*, 2022).

Um importante amostra de interesse no presente estudo é a experiência dos discentes da Área da Saúde, sendo a percepção de alunos objeto de estudo de muitos autores. Numa visão geral, Wilk *et al.* (2020) apontam que a principal fonte de conhecimento de estudantes em relação ao assunto advém da internet e que poucos sabem de todas as suas aplicações na Medicina. Pelos resultados, o estudo em questão diz não haver dúvida dos alunos sobre o aspecto ético dessa abordagem pedagógica e conclui que há uma necessidade de incorporar informações sobre a tecnologia de impressão tridimensional junto ao currículo.

Para residentes de Oftalmologia de um Hospital Universitário de Mashhad, no Irã, a única crítica para o uso de modelos 3D em um treinamento sobre Anatomia Patológica foi o receio na realização de provas e notas. Da amostra, 100% demonstraram-se satisfeitos com a metodologia, pela dimensão real que as peças podem ter e pela possibilidade de tocar diferentes áreas anatômicas, o que, segundo os relatos, implementou a visão espacial e a capacidade de aprendizado sobre as estruturas oftalmológicas (Vatankhah *et al.*, 2022).

No cenário da forma de produção, a manufatura aditiva está emergindo como uma ferramenta importante no campo da Medicina (Haleem *et al.*, 2018; Javaid & Haleem, 2018), podendo-se facilmente fabricar um modelo físico tridimensional de determinado órgão em caso específico em um curto espaço de tempo, usando várias tecnologias especializadas a partir de imagens virtuais digitalizadas adquiridas previamente (criadas por TC ou RM). Esta tecnologia atende facilmente a vários requisitos de Cardiologia devido à sua flexibilidade no design e fabricação de modelos 3D de pacientes específicos (Haleem *et al.*, 2018; Krishnasamy *et al.*, 2021).

Além disso, junto à Ortopedia, a manufatura aditiva desenvolve facilmente próteses e implantes personalizados – de qualquer forma e tamanho desejado – apresentando-se um recurso valioso (AbouHashem *et al.*, 2015; Javaid & Haleem, 2018; Tripodi *et al.*, 2020). O modelo impresso em 3D pode ajudar consideravelmente os cirurgiões a terem uma compreensão visual e tátil da Patologia e Anatomia específicas do paciente ortopédico, além de melhorar a segurança do paciente quanto ao procedimento. Também é útil para o treinamento de médicos e de estudantes de Medicina buscando-se compreender melhor os vários tipos de fraturas, tornando-se uma solução para redução do tempo de procedimento em comparação às técnicas cirúrgicas tradicionais (AbouHashem *et al.*, 2015; Baskaran *et al.*, 2016).

5. Considerações Finais

A partir da análise dos artigos selecionados, percebe-se que a impressão 3D constitui importante ferramenta para o estudo da Anatomia Humana, de forma a proporcionar melhor identificação de estruturas anatômicas nos diferentes Sistemas, propiciando maior retenção, a longo prazo, das informações estudadas e potencializando o aprendizado anatômico, em conjunto com outros materiais impressos e virtuais uni- e bidimensionais, peças cadavéricas e realidade virtual aumentada.

A presente revisão buscou identificar a efetividade do uso da técnica para o ensino e compressão da Anatomia, além de explorar os diferentes cenários em que a tecnologia pode ser implementada para tal fim. Ademais, os achados podem incentivar Instituições e profissionais do Magistério a investir no uso da impressão 3D em suas abordagens educativas, explorando possíveis melhorias na Educação Médica.

Dessa maneira, estudos futuros são necessários a fim de fomentar o aperfeiçoamento das técnicas de impressão já existentes para a produção de modelos 3D, tornando-os cada vez mais acessíveis e fidedignos aos tecidos orgânicos humanos, além de apresentar outras aplicações voltadas ao ensino-aprendizagem e ao exercício da Medicina (clínico-cirúrgica).

Conflito de interesses

Os autores declaram que a pesquisa foi conduzida na ausência de quaisquer relações comerciais ou financeiras que possam ser interpretadas como um potencial conflito de interesses.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Dúvidas adicionais podem ser dirigidas ao autor correspondente.

Declaração de Ética

O estudo foi conduzido sem a necessidade de submissão à Comitê de Ética relacionado, pelo perfil da análise empreendida.

Contribuições dos Autores

EANN, FSM, AMSH, RRO, SMA, LGD e MCKS participaram do desenvolvimento e desenho metodológico. EANN, FSM, AMSH, RRO, SMA e LGD participaram da coleta, tratamento dos dados e análise dos dados. EANN, FSM, AMSH, RRO, SMA, LGD e MCKS participaram da interpretação dos dados, redação e revisaram criticamente o manuscrito.

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Extensão (PIBEX), ofertado pela Universidade Federal do Pará (UFPA), por financiar o presente trabalho. Ao Projeto Galennus e à Liga Acadêmica de Anatomia Humana do Pará (LAAHP) por possibilitarem vivências com a impressão 3D e, conseqüentemente, a idealização do estudo. Ao Laboratório de Investigações em Neurodegeneração e Infecção (LNI), Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UFPA), Laboratório de Anatomia Humana e Funcional (LAHF/ICB/UFPA), Hospital Universitário João de Barros Barreto (HUJBB/UFPA), Universidade Federal do Pará, (Belém/PA, Brasil), pela estrutura e condições na análise dos estudos.

Referências

AbouHashem, Y., Dayal, M., Savannah, S. & Štrkalj G. (2015). The application of 3D printing in anatomy education. *Medical Education Online*. 20:29847. 10.3402/meo.v20.29847.

- Asghar, A., Naaz, S., Patra, A., Ravi K.S. & Khanal, L. (2022). Effectiveness of 3D-printed models prepared from radiological data for anatomy education: A meta-analysis and trial sequential analysis of 22 randomized, controlled, crossover trials. *Journal of Education and Health Promotion*. 11:353. 10.4103/jehp.jehp_199_22.
- Baskaran, V., Štrkalj, G., Štrkalj, M. & Di Ieva, A. (2016). Current Applications and Future Perspectives of the Use of 3D Printing in Anatomical Training and Neurosurgery. *Frontiers in Neuroanatomy*. 10:69. 10.3389/fnana.2016.00069.
- Bati, A. H., Guler, E., Ozer, M. A., Govsa, F., Erozkhan, K., Vatanserver, S., Ersin, M. S., Elmas, Z. N. & Harman, M. (2020) Surgical planning with patient-specific three-dimensional printed pancreaticobiliary disease models - Cross-sectional study. *International Journal of Surgery*. 80:175-183. 10.1016/j.ijso.2020.06.017.
- Bohl, M. A., Zhou, J. J., Mooney, M.A., Repp, G. J., Cavallo, C., Nakaji, P., Chang, S. W., Turner, J. D. & Kakarla, U. K. (2019). The Barrow Biomimetic Spine: effect of a 3-dimensional-printed spinal osteotomy model on performance of spinal osteotomies by medical students and interns. *Journal of Spine Surgery*. 5(1):58-65. 10.21037/jss.2019.01.05.
- Cai, S., He, Y., Cui, H., Zhou, X., Zhou, D., Wang, F. & Tian, Y. (2020). Effectiveness of three-dimensional printed and virtual reality models in learning the morphology of craniovertebral junction deformities: a multicentre, randomised controlled study. *BMJ Open*. 10(9):e036853. 10.1136/bmjopen-2020-036853.
- Cercenelli, L., De Stefano, A., Billi, A.M., Ruggeri, A., Marcelli, E., Marchetti, C., Manzoli, L., Ratti, S. & Badiali, G. (2022). AEDucaAR, Anatomical Education in Augmented Reality: A Pilot Experience of an Innovative Educational Tool Combining AR Technology and 3D Printing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(3):1024. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031024>.
- Chen, S., Pan, Z., Wu, Y., Gu, Z., Li, M., Liang, Z., Zhu, H., Yao, Y., Shui, W., Shen, Z., Zhao, J. & Pan, H. (2017). The role of three-dimensional printed models of skull in anatomy education: a randomized controlled trial. *Scientific Reports*. 7(1):575. 10.1038/s41598-017-00647-1.
- Dong, M., Chen, G., Li, J., Qin, K., Ding, X., Peng, C., Zhou, D. & Lin, X. (2018). Three-dimensional brain arteriovenous malformation models for clinical use and resident training. *Medicine (Baltimore)*. 97(3):e9516. 10.1097/MD.00000000000009516.
- Goudie, C., Kinnin, J., Bartellas, M., Gullipalli, R. & Dubrowski, A. (2019). The Use of 3D Printed Vasculature for Simulation-based Medical Education Within Interventional Radiology. *Cureus*. 11(4):e4381. 10.7759/cureus.4381.
- Guliev, B., Komyakov, B. & Talyshinskii, A. (2019). The use of the three-dimensional printed segmented collapsible model of the pelvicalyceal system to improve residents' learning curve. *Turkish Journal of Urology*. 46(3):226-230. 10.5152/tud.2019.19161.
- Haleem, A., Javaid, M. & Saxena, A. (2018). Additive manufacturing applications in cardiology: A review. *Egyptian Heart Journal*. 70(4):433-441. 10.1016/j.ehj.2018.09.008.
- Hu, P., Sun, J., Wei, F. & Liu, HX. (2022). Patient-Tailored 3D-Printing Models in the Subspecialty Training of Spinal Tumors: A Comparative Study and Questionnaire Survey. *World Neurosurg*. 161:e488-e494. 10.1016/j.wneu.2022.02.042.
- Iwanaga, J., Loukas, M., Dumont, A.S. & Tubbs, R.S. (2021). A review of anatomy education during and after the COVID-19 pandemic: Revisiting traditional and modern methods to achieve future innovation. *Clinical Anatomy*, 34(1), 108-114. 10.1002/ca.23655.
- Javaid, M. & Haleem, A. (2018). Additive manufacturing applications in orthopaedics: A review. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. 9(3):202-206. 10.1016/j.jcot.2018.04.008.
- Karsenty, C., Guitarte, A., Dulac, Y., Briot, J., Hascoet, S., Vincent, R., Delepaul, B., Vignaud, P., Djedjai, C., Hadeed, K. & Acar, P. (2021). The usefulness of 3D printed heart models for medical student education in congenital heart disease. *BMC Medical Education*. 21:480. 10.1186/s12909-021-02917-z.
- Kiesel, M., Beyers, I., Kalisz, A., Wöckel, A., Quenzer, A., Schläß, T., Wulff, C. & Diessner, J. (2022). Evaluating the value of a 3D printed model for hands-on training of gynecological pelvic examination. *3D Printing in Medicine*. 8, 20. <https://doi.org/10.1186/s41205-022-00149-5>.
- Krishnasamy, S., Mokhtar, R. A. R., Singh, R., Sivallingam, S., Aziz, Y. F. A. & Mathaneswaran, V. (2021). 3D Rapid Prototyping Heart Model Validation for Teaching and Training - A Pilot Project in a Teaching Institution. *Brazilian Society of Cardiovascular Surgery*. 36(5):707-716. 10.21470/1678-9741-2020-0433.
- Lau, I. & Sun, Z. (2018). Three-dimensional printing in congenital heart disease: A systematic review. *Journal of Medical Radiation Sciences*. 65(3):226-236. 10.1002/jmrs.268.
- Lau, I. & Sun, Z. (2022). The role of 3D printed heart models in immediate and long-term knowledge acquisition in medical education. *Reviews in Cardiovascular Medicine*. 23(1):22. 10.31083/j.rem2301022.
- Lau, I.W.W., Liu, D., Xu, L., Fan, Z. & Sun, Z. (2018). Clinical value of patient-specific three-dimensional printing of congenital heart disease: Quantitative and qualitative assessments. *PLOS ONE*. 13(3):e0194333. 10.1371/journal.pone.0194333.
- Li, Z., Li, Z., Xu, R., Li, M., Li, J., Liu, Y., Sui, D., Zhang, W. & Chen, Z. (2015). Three-dimensional printing models improve understanding of spinal fracture—A randomized controlled study in China. *Scientific Reports*. 5:11570. 10.1038/srep11570.
- Loke, Y.H., Harahsheh, A.S., Krieger, A. & Olivieri, L.J. (2017). Usage of 3D models of tetralogy of Fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease. *BMC Medical Education*. 17:54. <https://doi.org/10.1186/s12909-017-0889-0>.
- Meyer-Szary, J., Luis, M.S., Mikulski, S., Patel, A., Schulz, F., Tretiakow, D., Fercho, J., Jaguszewska, K., Frankiewicz, M., Pawłowska, E., Targoński, R., Szarpak, L., Dądela, K., Sabiniewicz, R. & Kwiatkowska, J. (2022). The role of 3D printing in planning complex medical procedures and training of medical professionals—cross-sectional multispecialty review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3331. 10.3390/ijerph19063331.
- Noël, G. P. J. C., Ding, W. & Steinmetz, P. (2021). 3D Printed Heart Models Illustrating Myocardial Perfusion Territories to Augment Echocardiography and Electrocardiography Interpretation. *Medical Science Educator*. 31(2):439-446. 10.1007/s40670-020-01177-8.

- Nusem, E., Bray, L., Lillia, J., Schofield, L., Scott, K. M., Gunasekera, H. & Cheng, T. L. (2022). Utility of 3D Printed Models Versus Cadaveric Pathology for Learning: Challenging Stated Preferences. *Medical Science Educator*. 32(6):1513-1520. 10.1007/s40670-022-01684-w.
- O'Brien, C., Souza, C.A., Sheikh, A., Miguel, O. & Wood, T. (2021). Use of tracheobronchial tree 3-dimensional printed model: does it improve trainees' understanding of segmentation anatomy? A prospective study. *3D Printing in Medicine*. 7:2. <https://doi.org/10.1186/s41205-020-00092-3>.
- Osorio-Toro, S. (2020). Práctica Experimental de Disección y Modelación 3D de Oído Medio e Interno para la Construcción Significativa de Conocimiento en el Área de Anatomía Humana. *International Journal of Morphology*, 38(4), 997-1002. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022020000400997>.
- Radzi, S., Tan, H. K. J., Tan, G. J. S., Yeong, W. Y., Ferenczi, M. A., Low-Beer, N. & Mogali, S. R. (2020). Development of a three-dimensional printed heart from computed tomography images of a plastinated specimen for learning anatomy. *Anatomy and Cell Biology*. 53(1):48-57. 10.5115/acb.19.153.
- Radzi, S., Chandrasekaran, R., Peh, Z. K., Rajalingam, P., Yeong, W. Y. & Mogali, S. R. (2022). Students' learning experiences of three-dimensional printed models and plastinated specimens: a qualitative analysis. *BMC Medical Education*. 22(1):695. 10.1186/s12909-022-03756-2.
- Shelmerdine, S. C., Simcock, I. C., Hutchinson, J. C., Aghwane, R., Melbourne, A., Nikitichev, D. I., Ong, J. L., Borghi, A., Cole, G., Kingham, E., Calder, A. D., Capelli, C., Akhtar, A., Cook, A. C., Schievano, S., David, A., Ourselin, S., Sebire, N. J. & Arthurs, O. J. (2018). 3D printing from microfocus computed tomography (micro-CT) in human specimens: education and future implications. *The British journal of radiology*, 91(1088), 20180306. <https://doi.org/10.1259/bjr.20180306>.
- Shen, Z., Yao, Y., Xie, Y., Guo, C., Shang, X., Dong, X., Li, Y., Pan, Z., Chen, S., Xiong, G., Wang, F.Y. & Pan, H. (2019). The process of 3D printed skull models for anatomy education. *Computer Assisted Surgery (Abingdon)*. 24(sup1):121-130. 10.1080/24699322.2018.1560101.
- Silver, A. (2019). Five innovative ways to use 3D printing in the laboratory. *Nature*, 565(7737), 123-124. 10.1038/d41586-018-07853-5.
- Su, W., Xiao, Y., He, S., Huang, P. & Deng, X. (2018). Three-dimensional printing models in congenital heart disease education for medical students: a controlled comparative study. *BMC Medical Education*. 18(1):178. 10.1186/s12909-018-1293-0.
- Tatar, I., Selçuk, I. & Huri, E. (2020). Evaluation of a 3D Printed Female Anatomical Model for the Hands on Training of Trans-Obturator Tape (TOT) and Tension Free Vaginal Tape (TVT) Sling Procedures. *International Journal of Morphology*, 38(2), 292-298. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022020000200292>.
- Tripodi, N., Kelly, K., Husaric, M., Wospil, R., Fleischmann, M., Johnston, S. & Harkin, K. (2020). The Impact of Three-Dimensional Printed Anatomical Models on First-Year Student Engagement in a Block Mode Delivery. *Anatomical Sciences Education*. 13(6):769-777. 10.1002/ase.1958.
- Vatankhah, R., Emadzadeh, A., Nekooei, S., Yousefi B.T., Rezaian, M.K., Moonaghi, H.K. & Razavi, M.E. (2021). 3D Printed Models for Teaching Orbital Anatomy, Anomalies and Fractures. *Journal of Ophthalmic and Vision Research*. 16(4):611-619. 10.18502/jovr.v16i4.9751.
- Vatankhah, R., Razavi, M.E., Nekooei, S., Rezaian, M.K., Yousefi, B.T., Moonaghi, H.K. & Emadzadeh, A. (2022). Three-dimensional (3D) Visualization Educational Modeling for Ophthalmology Residents' Training: Viewpoints. *Medical Journal of the Islamic Republic of Iran*. 36:115. 10.47176/mjiri.36.115.
- Whittemore, R. & Knafelz, K. (2005). The integrative review: updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, 52(5), 546-553. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x>.
- Wickramasinghe, N., Thompson, B. R. & Xiao, J. (2022). The opportunities and challenges of digital anatomy for medical sciences: Narrative review. *JMIR Medical Education*, v. 8, n. 2, p. e34687. 10.2196/34687.
- Wilk, R., Likus, W., Hudecki, A., Syguła, M., Różycka-Nechoritis, A. & Nechoritis, K. (2020). What would you like to print? Students' opinions on the use of 3D printing technology in medicine. *PLOS ONE*. 15(4):e0230851. 10.1371/journal.pone.0230851.
- Wu, A.M., Wang, K., Wang, J.S., Chen, C.H., Yang, X.D., Ni, W.F. & Hu, Y.Z. (2018). The addition of 3D printed models to enhance the teaching and learning of bone spatial anatomy and fractures for undergraduate students: a randomized controlled study. *Annals of Translational Medicine*. 6(20):403. 10.21037/atm.2018.09.59.
- Yao, R., Xu, G., Mao, S.S., Yang, H.Y., Sang, X.T., Sun, W. & Mao, Y.L. (2016). Three-dimensional printing: review of application in medicine and hepatic surgery. *Cancer Biology & Medicine*. 13(4):443-451. 10.20892/j.issn.2095-3941.2016.0075.
- Ye, Z., Dun, A., Jiang, H., Nie, C., Zhao, S., Wang, T. & Zhai, J. (2020). The role of 3D printed models in the teaching of human anatomy: a systematic review and meta-analysis. *BMC Medical Education*. 20(1):335. 10.1186/s12909-020-02242-x.
- Yuen, J. (2020). What Is the Role of 3D Printing in Undergraduate Anatomy Education? A Scoping Review of Current Literature and Recommendations. *Medical Science Educator*. 30(3):1321-1329. 10.1007/s40670-020-00990-5.
- Zhang, H., He, Y., Chen, Y., Liu, J., Jin, Q., Xu, S., Fu, X., Qiao, J., Yu, B. & Niu, F. (2021). Virtual Reality and Three-Dimensional Printed Models Improve the Morphological Understanding in Learning Mandibular Sagittal Split Ramus Osteotomy: A Randomized Controlled Study. *Frontiers in Surgery*. 8:705532. 10.3389/fsurg.2021.705532.