

Uso da impressão 3D no desenvolvimento do conhecimento em estudantes de Medicina: uma análise integrativa

Use of 3D printing in the development of knowledge in medical students: an integrative analysis

Paula Cristina Yukari Suzaki Fujii ¹		paulacysfujii@gmail.com
Guilherme Marçal Ferreira Lima ¹		guilherme.lima@aluno.fpp.edu.br
Leonardo Lopes Caetano dos Santos ¹		leonardo.santos@aluno.fpp.edu.br
Louise Knauber ¹		louise.knauber@aluno.fpp.edu.br
Mariana Xavier e Silva ²		mariana.silva@fpp.edu.br
Izabel Cristina Meister Coelho ¹		izabel.coelho@fpp.edu.br
Camila Moraes Marques ¹		camilam14@gmail.com

RESUMO

Introdução: A impressão 3D é uma ferramenta com diversas aplicações na medicina, com ampla utilização para o ensino médico, podendo ser utilizada para pesquisas, educação e simulação para estudantes e residentes, mas com potencial ainda pouco explorado.

Objetivo: O estudo buscou realizar uma síntese analítica do uso da impressão 3D para o ganho de conhecimento entre estudantes de Medicina, em comparação com o ensino tradicional.

Método: Trata-se de uma revisão integrativa de literatura, realizada nas bases de dados ScienceDirect, PubMed e Biblioteca Eletrônica Científica Online (SciELO), nos últimos cinco anos (2020-2024). Foram utilizados os descritores “3D printing”, “medical education” e “engagement learning” na primeira base de dados e “3D printing”, “medical education” e “learning” na segunda e na terceira base, nos idiomas português, inglês e espanhol, com o booleano “AND”.

Resultado: De acordo com os 28 artigos selecionados, a impressão 3D para a construção do conhecimento entre estudantes de Medicina apresenta-se como uma importante ferramenta para o ensino médico, oportunizando uma aprendizagem profunda e significativa, estando relacionada à melhoria do aprendizado em curto prazo, à maior satisfação e ao engajamento do aluno em comparação com métodos tradicionais de ensino. As limitações do uso encontram-se na disponibilidade de materiais para impressão e na quantidade limitada de estudos para avaliação em longo prazo, havendo a necessidade de desenvolvimento de mais pesquisas.

Conclusão: A impressão 3D utilizada de maneira estratégica e bem estruturada é uma ferramenta valiosa no desenvolvimento do conhecimento e das habilidades médicas.

Palavras-chave: Impressão Tridimensional; Manufatura Aditiva; Educação Médica; Aprendizagem.

ABSTRACT

Introduction: 3D printing is a tool with several applications in medicine, with wide use for medical education, and can be used for research, education and simulation for students and residents, but with potential still little explored.

Objective: The study aimed to perform an analytical synthesis of the use of 3D printing for knowledge gain among medical students, compared with traditional teaching.

Method: This is an integrative literature review, conducted in the databases ScienceDirect, PubMed and Biblioteca Eletrônica Científica Online (SciELO), in the last 5 years (2020-2024). The descriptors “3D Printing”, “Medical Education” and “Engagement Learning” were used in the first database and “3D Printing”, “Medical Education” and “Learning” in the second and third database, in Portuguese, English and Spanish, with the Boolean “AND”.

Results: The 28 articles selected showed that the use of 3D printing for the construction of knowledge among medical students is an important tool for medical education, providing a deep and meaningful learning, being related to the improvement of short-term learning, higher student satisfaction and engagement compared to traditional teaching methods. The limitations of use are in the availability of materials for printing and limited number of studies for long-term evaluation, there is a need to develop more research.

Conclusion: The use of 3D printing in a strategic and well-structured way is a valuable tool in the development of medical knowledge and skills.

Keywords: Three-Dimensional Printing; Additive Manufacturing; Medical Education; Learning.

¹ Faculdades Pequeno Príncipe, Curitiba, Paraná, Brasil.

² Faculdades Pequeno Príncipe, Programa de Pós-Graduação em Ensino nas Ciências da Saúde, Curitiba, Paraná, Brasil.

Editora-chefe: Rosiane Viana Zuza Diniz.

Editora associada: Renata Zappala.

Recebido em 20/02/25; Aceito em 02/07/25.

Avaliado pelo processo de double blind review.

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, comumente conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia que tem se revelado uma ferramenta importante para a aprendizagem e o ensino na medicina. Entre seus usos, destacam-se as aplicações cirúrgicas, em que permite melhor compreensão da anatomia complexa e única de cada caso, reduzindo custos e otimizando estratégias cirúrgicas¹⁻⁶. A impressão 3D é utilizada também nos ambientes operatório e pré-operatório, com o propósito de reduzir potencialmente o tempo de procedimento em centro cirúrgico e o tempo de permanência pós-operatória ao simular antecipadamente todas as etapas, resultando em menores taxas de complicações, diminuição da taxa de reintervenção e redução de custos de saúde^{7,8}. Nesse contexto, a bioimpressão também se revela uma possibilidade importante do uso ao permitir a modelagem e impressão de tecidos e órgãos que podem ser usados para testes cosméticos, químicos e farmacêuticos, e personalização de órgãos, representando uma oportunidade para a redução das filas de transplante e para a substituição de modelos animais nos casos de análise de toxicidade medicamentosa⁷.

No que tange à educação médica, a impressão 3D pode ser utilizada em pesquisas, educação e simulação para estudantes e residentes. Além disso, essa ferramenta pode ser adotada no treinamento cirúrgico de procedimentos difíceis, na simulação operatória, no aprimoramento da compreensão sobre anatomia e patologia¹⁻³ e na comunicação médico-paciente^{7,9}. Desse modo, tendo em vista seu caráter inovador e seu impacto na educação médica, a presente revisão buscou realizar uma síntese analítica do uso da impressão 3D para o ganho de conhecimento entre estudantes de Medicina em comparação com o ensino tradicional, partindo da seguinte pergunta de pesquisa: “O uso de simuladores 3D pode ser uma estratégia para otimizar o ganho de conhecimento dos estudantes de Medicina?”

MÉTODO

Trata-se de uma revisão integrativa de literatura que segue os seis passos de desenvolvimento estabelecidos por Mendes et al.¹⁰: elaboração da pergunta norteadora, busca e seleção de estudos primários, extração de dados dos estudos primários, avaliação crítica dos estudos primários, síntese dos resultados da revisão e apresentação da revisão integrativa.

Para o desenvolvimento da pergunta de pesquisa, utilizou-se o acrônimo “PICO”, que representa População, Intervenção, Comparação e Desfecho (*Outcome*). Assim, definiu-se o seguinte: P = estudantes de Medicina, I = uso

de simuladores 3D, C = ensino tradicional e O = ganho de conhecimento. Diante disso, a pergunta norteadora foi: “O uso de simuladores 3D pode ser uma estratégia para otimizar o ganho de conhecimento dos estudantes de Medicina?”. Nesse sentido, utilizaram-se três bases de dados: ScienceDirect, PubMed e Biblioteca Eletrônica Científica Online (SciELO).

Na confecção da estratégia de busca, utilizou-se, na primeira base de dados, a combinação “3D printing AND medical education AND engagement learning”. Na segunda e na terceira base, adotou-se o seguinte: “3D printing AND medical education AND learning”. Selecionaram-se os descritores a partir do Medical Subject Headings (MeSH). A busca por estudos primários foi conduzida durante julho de 2024.

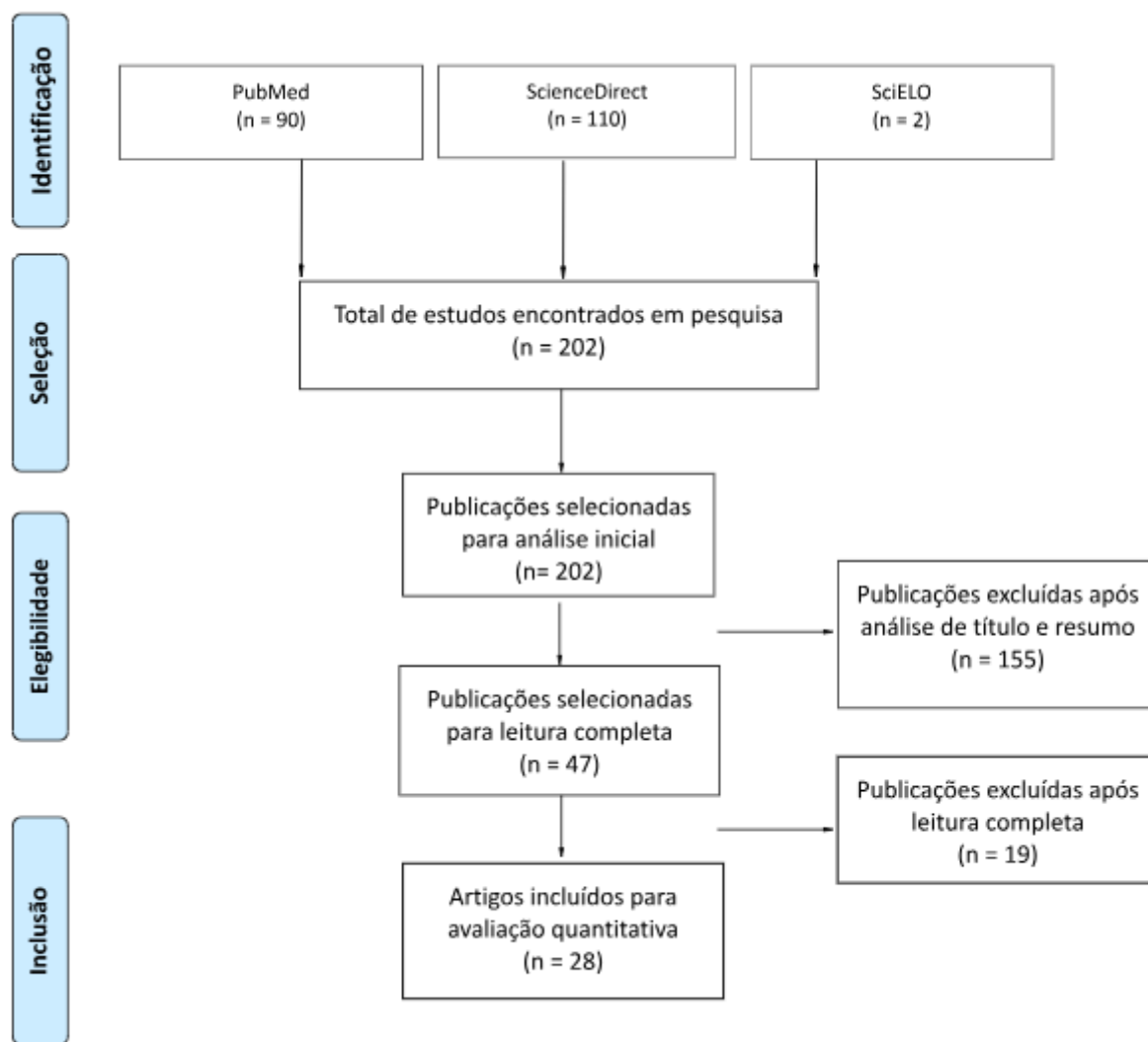
Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos dos últimos cinco anos (2020-2024), nos idiomas inglês, português e espanhol, do tipo revisão e artigo original, acesso aberto, e excluíram-se os estudos que não responderam à pergunta de pesquisa e as duplicatas. Utilizaram-se os critérios de elegibilidade de acordo com o fluxograma PRISMA. A investigação e seleção dos artigos foram efetuadas por dois pesquisadores independentes, conforme um procedimento padronizado. Os resultados obtidos foram comparados e alinhados entre os pesquisadores. Em casos de divergência, buscou-se a concordância de outros pesquisadores envolvidos na pesquisa.

A Figura 1 descreve o processo de seleção dos artigos.

RESULTADOS

Analisaram-se 28 artigos que investigaram o uso da impressão 3D no ensino médico, destacando sua aplicação no aprendizado de estudantes de Medicina. Os estudos selecionados foram desenvolvidos em 11 países – China, Austrália, Canadá, Estados Unidos, Alemanha, França, Singapura, Chile, Colômbia, Irlanda e Itália – e publicados em 11 periódicos, conforme detalhado no Quadro 1.

Os estudos abordaram, majoritariamente, o uso da impressão 3D para o ensino da anatomia óssea, cardíaca, pulmonar, ginecológica e craniofacial, estudo da histologia, o treinamento de procedimentos médicos e a existência de laboratórios de impressão 3D em serviços de saúde. Destaca-se o uso da impressão 3D principalmente para a compreensão de lesões e o desenvolvimento de competências e habilidades práticas, engajamento e satisfação dos estudantes, e desenvolvimento de habilidades técnicas. Todos os estudos trouxeram resultados positivos significativos para a utilização de modelos impressos em 3D para fins de ensino, e a síntese dos achados encontra-se no Quadro 2.

Figura 1. Fluxograma do PRISMA de seleção dos artigos.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Quadro 1. Quadro sinóptico dos artigos selecionados, por país e periódico.

Título do artigo	País	Periódico (ano)
"Make and break your own hand: a review of hand anatomy and common injuries"	Estados Unidos	<i>Journal of Education and Teaching in Emergency Medicine</i> (2020)
"Development of a three-dimensional printed heart from computed tomography images of a plastinated specimen for learning anatomy"	Singapura	<i>Anatomy and Cell Biology</i> (2020)
"Evaluation of a novel 3D-printed urinary catheterization simulation model in undergraduate medical teaching"	Canadá	<i>Cureus</i> (2020)
"The role of 3D printed models in the teaching of human anatomy: a systematic review and meta-analysis"	China	<i>BMC Medical Education</i> (2020)
"The impact of three-dimensional printed anatomical models on first-year student engagement in a block mode delivery"	Austrália	<i>Anatomical Sciences Education</i> (2020)
"Use of tracheobronchial tree 3-dimensional printed model: does it improve trainees' understanding of segmentation anatomy? A prospective study"	Canadá	<i>3D Printing in Medicine</i> (2021)
"Three-dimensional surface imaging and printing in anatomic pathology"	Estados Unidos	<i>Journal of Pathology Informatics</i> (2021)
"Evaluating the impact of medical student inclusion into hands-on surgical simulation in congenital heart surgery"	Canadá	<i>Journal of Surgical Education</i> (2021)

Continua...

Quadro 1. Continuação.

Título do artigo	País	Periódico (ano)
<i>"The use of 3D printers in medical education with a focus on bone pathology"</i>	Estados Unidos	<i>Medical Science Educator</i> (2021)
<i>"3D printing Improve the effectiveness of fracture teaching and medical learning: a comprehensive scientometric assessment and future perspectives"</i>	China	<i>Frontiers in Physiology</i> (2021)
<i>"The role of 3D printed heart models in immediate and long-term knowledge acquisition in medical education"</i>	Austrália	<i>Reviews in Cardiovascular Medicine</i> (2022)
<i>"AEducaAR, Anatomical Education in Augmented Reality: a pilot experience of an innovative educational tool combining AR technology and 3D printing"</i>	Itália	<i>International Journal of Environmental Research and Public Health</i> (2022)
<i>"The application of three-dimensional technologies in the improvement of orthopedic surgery training and medical education quality: a comparative bibliometrics analysis"</i>	China	<i>Frontiers in Bioengineering and Biotechnology</i> (2022)
<i>"Evaluating a novel 3D printed model for simulating Large Loop Excision of the Transformation Zone (LLETZ)"</i>	Alemanha	<i>3D Printing in Medicine</i> (2022)
<i>"Evaluating the value of a 3D printed model for hands-on training of gynecological pelvic examination"</i>	Alemanha	<i>3D Printing in Medicine</i> (2022)
<i>"From the ground up: understanding the developing infrastructure and resources of 3D printing facilities in hospital-based settings"</i>	Estados Unidos	<i>3D Printing in Medicine</i> (2022)
<i>"Three-dimensional printing models improve long-term retention in medical education of pathoanatomy: a randomized controlled study"</i>	França	<i>Clinical Anatomy</i> (2022)
<i>"Diseño y fabricación de modelos impresos en 3D como complemento para las clases prácticas de histología médica"</i>	Chile	<i>International Journal of Morphology</i> (2022)
<i>"Hands-on practice on sustainable simulators in the context of training for rural and remote practice through a fundamental skills workshop"</i>	Canadá	<i>Cureus</i> (2022)
<i>"Students' learning experiences of three-dimensional printed models and plastinated specimens: a qualitative analysis"</i>	Singapura	<i>BMC Medical Education</i> (2022)
<i>"Utility of 3D printed models versus cadaveric pathology for learning: challenging stated preferences"</i>	Austrália	<i>Medical Science Educator</i> (2022)
<i>"Efficacy of three-dimensional models for medical education: a systematic scoping review of randomized clinical trials"</i>	Colômbia	<i>Heliyon</i> (2023)
<i>"Evolution in congenital cardiology education: the rise of digital-learning tools"</i>	Irlanda	<i>CJC Pediatric and Congenital Heart Disease</i> (2023)
<i>"Enhancing medical education in respiratory diseases: efficacy of a 3D printing, problem-based, and case-based learning approach"</i>	China	<i>BMC Medical Education</i> (2023)
<i>"An opportunity to see the heart defect physically: medical student experiences of technology-enhanced learning with 3D printed models of congenital heart disease"</i>	Austrália	<i>Medical Science Educator</i> (2023)
<i>"3D printing as a pedagogical tool for teaching normal human anatomy: a systematic review"</i>	França	<i>BMC Medical Education</i> (2023)
<i>"Evaluation of a 3D-printed hands-on radius fracture model during teaching courses"</i>	Alemanha	<i>European Journal of Trauma and Emergency Surgery</i> (2024)
<i>"Integration of case-based learning and three-dimensional printing for tetralogy of fallot instruction in clinical medical undergraduates: a randomized controlled trial"</i>	China	<i>BMC Medical Education</i> (2024)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quadro 2. Quadro sinóptico com síntese dos principais achados dos artigos selecionados.

Autores (ano)	Síntese dos principais achados	Método
Sudario <i>et al.</i> (2020)	Uso da impressão 3D para construção do conhecimento de anatomia, mecanismo das lesões, achados do exame e tratamento das lesões da mão a partir da experiência prática com modelos manuais reforçou o conhecimento e os ajudou a identificar melhor as lesões de forma espacial.	Artigo original
Radzi <i>et al.</i> (2020)	A possibilidade da distinção anatômica em cores em peças impressas em 3D para estudo da anatomia cardíaca demonstrou uma compreensão significativamente em comparação com os monocromáticos, sendo particularmente útil para alunos que estão aprendendo os fundamentos da anatomia.	Artigo original
Gillis <i>et al.</i> (2020)	O modelo impresso em 3D possibilitou o desempenho realista e preciso de um procedimento de cateterismo urinário, permitindo que os alunos aumentassem sua confiança, sua competência e seu conhecimento da técnica.	Artigo original
Ye <i>et al.</i> (2020)	O uso da impressão 3D permite uma aprendizagem mais eficaz, gerando boa satisfação por parte dos estudantes.	Revisão sistemática e metanálise
Tripodi <i>et al.</i> (2020)	A impressão 3D para o aprendizado da anatomia dos membros superiores melhorou o desempenho acadêmico em testes, aumentou o envolvimento do estudante sobre o conteúdo e permitiu a aprendizagem independente, o que resultou em melhora da confiança, redução da ansiedade e facilidade do estudo.	Artigo original
O'Brien <i>et al.</i> (2021)	A impressão 3D para o estudo da anatomia traqueobrônquica apresentou melhores resultados de longo prazo em comparação ao uso de imagens em 2D.	Artigo original (estudo prospectivo)
Bois <i>et al.</i> (2021)	O uso da impressão 3D na educação médica permite melhor compreensão do estudo anatômico sem a restrição imposta pelas amostras com risco biológico, podendo reproduzir precisamente cores e texturas com excelentes resultados sem a utilização de impressoras de alta qualidade.	Artigo original
Hon <i>et al.</i> (2021)	Peças impressas em 3D para o treinamento de cirurgias cardíacas com assistência de estudantes melhoraram as habilidades cirúrgicas, o interesse e a compreensão sobre o tema.	Artigo original
Youman <i>et al.</i> (2021)	Modelos impressos em 3D tornam a aprendizagem sobre tumores ósseos mais inovadora e eficaz.	Artigo original
Shi <i>et al.</i> (2021)	A impressão 3D pode melhorar a eficácia e a extensão do ensino de fraturas.	Revisão de literatura
Lau <i>et al.</i> (2022)	O uso da impressão 3D indicou melhora na aquisição imediata de conhecimento em comparação com métodos tradicionais para o estudo de doenças cardíacas congênitas.	Artigo original
Cercenelli <i>et al.</i> (2022)	O estudo da anatomia do crânio a partir de modelos impressos em 3D permite uma melhor compreensão das estruturas e relações anatômicas.	Artigo original
Shi <i>et al.</i> (2022)	No estudo da ortopedia, a impressão 3D torna a experiência da aprendizagem mais interessante, sendo uma ferramenta importante na promoção do ensino.	Revisão de literatura
Kiesel <i>et al.</i> (2022a)	O uso de modelos impressos em 3D para o ensino e treinamento de exame especular, biópsia e curetagem cervical, e excisão da zona de transformação com alça diatérmica aumentou o conhecimento, a confiança e o preparo dos estudantes.	Ensaio clínico randomizado
Kiesel <i>et al.</i> (2022b)	Peças impressas em 3D para montagem de estruturas para o estudo da anatomia ginecológica permitiram uma compreensão mais profunda e maior retenção das informações obtidas.	Ensaio clínico randomizado
Shine <i>et al.</i> (2022)	Laboratórios de impressão 3D em sistemas de saúde permitiram seu uso para aplicação educacional por meio de pesquisas e simulação entre estudantes e residentes.	Artigo original
Al-Badri <i>et al.</i> (2022)	Houve melhora significativa da retenção do conhecimento em longo prazo a partir do estudo de modelos impressos em 3D para o estudo da anatomia craniofacial em comparação a modelos 2D.	Artigo original
Toledo-Ordoñez <i>et al.</i> (2022)	Modelos impressos em 3D da barreira de filtração glomerular, camada muscular do esôfago e epiderme facilitaram o estudo da histologia.	Artigo original
Siraj <i>et al.</i> (2022)	O uso da impressão 3D para o treinamento de procedimentos de sutura, cricotireoidostomia, episiotomia e acesso intraósseo possibilita a autonomia dos estudantes, sendo um método prático, sustentável e com custos reduzidos.	Artigo original
Radzi <i>et al.</i> (2022)	Peças impressas em 3D apresentam resultado superior para o aprendizado de conceitos fundamentais da anatomia e dos órgãos, em comparação com peças anatômicas cadavéricas.	Ensaio clínico randomizado

Continua...

Quadro 2. Continuação.

Autores (ano)	Síntese dos principais achados	Método
Nusem <i>et al.</i> (2022)	Houve menor preferência pelo uso da impressão 3D para o estudo de patologias cardíacas em comparação com peças cadavéricas, mas maior envolvimento dos estudantes com as peças impressas.	Artigo original
Ardila <i>et al.</i> (2023)	A impressão 3D desenvolveu habilidades de aprendizagem e conhecimento entre estudantes de Medicina, havendo grande satisfação com o uso dessa tecnologia.	Revisão de escopo
Windram <i>et al.</i> (2023)	Ao trazer sobre o papel das ferramentas de simulação, realidade virtual e aumentada na educação médica, cita que a impressão 3D de modelos anatômicos melhora a compreensão dos alunos sobre anatomia complexa.	Artigo original
Yan <i>et al.</i> (2023)	O uso da impressão 3D associada a abordagens pedagógicas como aprendizagem baseada em problemas (<i>problem-based learning</i> – PBL) e aprendizagem baseada em desafios (<i>case-based learning</i> – CBL) melhora a aprendizagem de doenças respiratórias.	Artigo original
Luxford <i>et al.</i> (2023)	O uso de modelos impressos em 3D para o estudo de patologias cardíacas congênitas se associa com um nível maior de satisfação e confiança sobre o tema.	Artigo original
Brumpton <i>et al.</i> (2023)	Modelos anatômicos impressos em 3D são ferramentas eficazes para o ensino de anatomia, destacando-se principalmente na reprodução de áreas anatômicas complexas e nos primeiros períodos do curso de Medicina.	Revisão de literatura
Neijhoft <i>et al.</i> (2024)	O uso de modelo impresso em 3D permitiu a realização de cateterismo urinário de maneira realista, aumentando a confiança, a competência e o conhecimento técnico entre os estudantes.	Artigo original
Zhao <i>et al.</i> (2024)	O uso de modelos impressos em 3D melhorou a aprendizagem em resultados pós-teste e a confiança e satisfação percebidas entre estudantes que utilizaram a CBL para a compreensão da tetralogia de Fallot.	Ensaio clínico randomizado

Fonte: Elaborado pelos autores.

DISCUSSÃO

Uso da impressão 3D na educação médica

Nos últimos anos, a impressão 3D tem se destacado como uma inovadora ferramenta na área da saúde, transformando tanto a prática médica quanto a educação. Durante a formação médica, essa tecnologia proporciona um aprendizado mais interativo e realista em comparação aos métodos tradicionais, possibilitando ao estudante o estudo de modelos anatômicos de difícil acesso, raros ou complexos com o uso de recursos educacionais tradicionais¹¹.

A impressão 3D permite a criação de réplicas detalhadas de estruturas anatômicas e patológicas, enriquecendo a experiência de aprendizado, visto que os modelos físicos oferecem uma compreensão visuoespacial aprimorada, crucial para a assimilação de anatomias complexas e para a aquisição das habilidades motoras^{3,12,13}. Os benefícios já eram consolidados há alguns anos¹⁴, o que evidencia que os modelos impressos em 3D superam os métodos tradicionais.

No ensino de anatomia, a habilidade de visualizar e manusear modelos 3D detalhados, de modo a visualizar estruturas sobrepostas, facilita a identificação e torna a compreensão mais profunda, desenvolvendo a habilidade visuoespacial, essencial para a compreensão da anatomia mesmo em diversos planos e posições^{5,15-17}.

Além de melhorar a compreensão anatômica, a impressão 3D também promove a inovação pedagógica. O uso dessa tecnologia complementa os métodos de ensino tradicionais ao oferecer novas maneiras de explorar e entender a complexidade do corpo humano, e preparar os estudantes para os desafios da prática médica moderna¹⁵.

Vantagens da impressão 3D na educação médica

Diversos são os benefícios do uso da prototipagem rápida na educação médica, destacando-se o acesso facilitado a anatomias raras e complexas, a possibilidade da modelagem de diferentes anatômicas fisiológicas e patológicas a partir de dados de imagens, e a oportunidade de compartilhamento de modelos 3D entre diferentes instituições. O fácil compartilhamento dos exemplares impressos ou mesmo arquivos digitais para impressão local democratizam o conhecimento, principalmente em locais de difícil acesso ou com poucos recursos^{3,6,18,19}.

Ressaltam-se também a rapidez da impressão, o baixo custo de produção e a precisão das peças em comparação com os originais^{5,20}. Em locais com recursos limitados, a manufatura aditiva permite o acesso a modelos e ferramentas acessíveis a uma fração do custo quando comparado a métodos tradicionais, o que possibilita uma formação médica mais completa sem incorrer em encargos financeiros significativos, haja vista o

decréscimo dos custos de impressão, equipamentos, materiais e *softwares* nos últimos anos^{5,22}.

É sabido também que o uso de modelos anatômicos específicos de pacientes impressos em 3D pode aumentar o desempenho e promover um aprendizado mais rápido entre os estudantes, de modo a melhorar o conhecimento, o gerenciamento e a confiança, revelando seu benefício na educação médica^{5,21,22}.

O uso de impressoras de alta qualidade permite também uma reprodução precisa de cores e texturas, trazendo excelentes resultados em comparação com amostras cadavéricas, pois preserva marcos e referenciais anatômicos que muitas vezes são perdidos ao longo do manuseio de peças a fresco¹⁸. A possibilidade de fabricação em materiais de diferentes resistências, densidades e cores em uma mesma amostra permite uma reprodução mais precisa de modelos impressos e, aliada com a viabilidade de ampliação e redução do tamanho original das peças, acessibiliza necessidades específicas¹³. A capacidade de fabricação de modelos com estruturas removíveis também permite acentuar os detalhes anatômicos, de modo a melhorar a compreensão e visualização de diferentes partes, e facilitar a compreensão e o ganho do conhecimento^{13,15,16,18}.

No que tange ao estudo de órgãos e estruturas complexas, há por vezes dificuldade de visualização mesmo após dissecação, o que prejudica o estudo dessas partes. O uso da impressão 3D permite a compreensão dessas partes complexas da anatomia e patologia, haja vista a possibilidade de apreciação tátil e visual em 3D, apresentando superior custo-benefício em comparação ao estudo com peças cadavéricas que demandam alto custo de obtenção, dissecação e manutenção ou a ambientes de realidade virtual, que carecem de informações táteis importantes^{13,23}.

Destaca-se também que, no estudo de patologias específicas e fraturas, a utilização de cadáveres é escassa por conta da ausência de alterações patológicas que possibilitem o estudo²⁴. Desse modo, a prototipagem rápida permite melhor compreensão anatômica sem as restrições impostas pelo risco biológico dos cadáveres²⁵. Seu uso também é interessante para os estudantes que não podem ter acesso ao estudo anatômico em cadáveres devido a crenças religiosas ou culturais ou para aqueles que possuem dificuldade de acesso aos recursos *online* por não saberem lidar com ferramentas de tecnologia de comunicação²⁵.

Avanços, benefícios e aplicações

Durante a graduação em Medicina, a impressão 3D tem sido utilizada majoritariamente para o estudo da anatomia, pois permite aos estudantes o acesso ao conhecimento de

maneira prática e facilita o aprendizado de temas e anatomias complexos. No que tange ao estudo da anatomia, os trabalhos discutem o uso dessa tecnologia para o ensino da anatomia regional dos membros, do pescoço e dos órgãos, bem como das estruturas cardiovasculares, ósseas, cerebrais, hepáticas e ginecológicas, além do treinamento de procedimentos^{12,13,25-28}.

Sabendo da importância do estudo da anatomia óssea para a construção do conhecimento do estudante, Neijhoft et al.²⁹ propuseram o uso da impressão 3D para o estudo de fraturas de rádio, conjuntamente com radiografias e dados de tomografia computadorizada (TC). Embora não tenham sido encontradas diferenças significativas no aprendizado entre os métodos isolados, as avaliações do modelo impresso foram iguais ou superiores aos outros métodos. As combinações de métodos que incluíam modelos impressos, seja com radiografia ou TC, levaram a melhores resultados. Como o aprendizado é uma experiência única e pessoal, a combinação de abordagens visuais, auditivas e táteis facilita a compreensão e permite uma fixação duradoura do conteúdo.

Diante do desafio do estudo da anatomia ginecológica e da realização do exame pélvico feminino, Kiesel et al.²⁷ investigaram o uso da impressão 3D no ensino da ginecologia. O estudo envolveu estudantes do quinto e sexto anos do curso de Medicina, que receberam um modelo desmontável da pelve feminina impresso em 3D. Os alunos foram instruídos a montar o modelo para aprimorar sua compreensão anatômica, uma vez que os modelos existentes para treinamento de toque vaginal frequentemente dificultam a compreensão das relações anatômicas. Evidenciou-se que o envolvimento ativo dos alunos ao montarem o modelo contribuiu para uma compreensão mais profunda e maior retenção das informações obtidas, revelando que incentivá-los e dar-lhes a possibilidade de participar do aprendizado prático foi percebido positivamente.

Ainda sobre o uso da prototipagem rápida na ginecologia, Kiesel et al.²⁶ realizaram um estudo sobre o uso de modelos impressos em 3D para o treinamento de estudantes de Medicina em excisão de lesões do colo do útero. Nesse ensaio clínico randomizado, foi proposto aos estudantes que realizassem a simulação de exame especular, biópsia e curetagem cervical, além de excisão da zona de transformação com alça diatérmica. Constatou-se que os estudantes que utilizaram o novo simulador relataram maior preparo e confiança para a realização de procedimentos reais, apresentando subjetivamente maior grau de conhecimento técnico cirúrgico e no exame ginecológico²⁶. De modo semelhante, Gillis et al.²⁰ avaliaram a experiência de estudantes após o uso de modelo impresso para a simulação de cateterismo urinário. Os resultados apresentados revelaram, de modo semelhante, um aumento da confiança e competência autorrelatadas na realização da inserção do cateter urinário,

além de representarem uma simulação realista em simulador acessível e de baixo custo.

O treinamento em procedimentos cirúrgicos foi também explorado por Hon et al.¹², os quais realizaram uma simulação cirúrgica prática em cirurgias cardíacas congênitas a partir de modelos impressos em 3D. Na pesquisa, 15 estudantes puderam atuar como assistentes principais em cirurgias cardíacas realizadas nos modelos, após a realização de uma sessão de treinamento com foco em assistência cirúrgica. Os participantes relataram que o uso dos modelos foi útil no aprendizado de anatomia complexa e na compreensão da fisiopatologia em cardiopatia congênita. Destaca-se também que a simulação do procedimento contribuiu fortemente para a melhoria da habilidade cirúrgica, pois isso preparou os estudantes a auxiliar, de forma mais eficaz, em cirurgias e aumentou o interesse deles pelo tema.

Em outro estudo, foi proposto por Sudario et al.²⁸ que residentes e estudantes desenvolvessem o conhecimento de trauma ósseo das extremidades com foco em luxações/subluxações, fraturas, entorses e distensões a partir da impressão dos ossos da mão. A partir da impressão e organização do modelo anatomicamente correto da mão, além da construção dos complexos funcionais de tendões flexores e extensores das falanges, os estudantes tiveram acesso prático ao conhecimento. Essa experiência fez com que os estudantes expressassem ao final da sessão que a prática com os modelos manuais reforçou o conhecimento e os ajudou a identificar melhor as lesões de forma espacial. O estudo destaca que a construção dos modelos foi especialmente útil para a compressão sobre o funcionamento dos tendões e das lesões. Embora os modelos apresentassem limitações na funcionalidade anatômica, ainda foram úteis para visualizar a interação espacial entre ossos e tendões²⁸. De modo semelhante, a revisão de Shi et al.²⁴ apresentou o benefício dos modelos em 3D para o aprendizado e treinamento em relação a fraturas, visto que sua simulação traz um ambiente mais próximo da situação real, sendo superior ao uso de modelos convencionais e ao uso de realidade virtual.

Tripodi et al.²⁵ exploraram o uso da impressão 3D no ensino da anatomia do membro superior para estudantes do primeiro ano de Bases Científicas da Osteopatia 1, que inclui anatomia, biomecânica e fisiologia aplicada ao membro superior. O estudo, que envolveu 111 estudantes, forneceu a cada um conjunto de ossos impressos em 3D e massinha de modelar para a criação de músculos e articulações. Os estudantes foram encorajados a levar os materiais para casa e repetir as atividades, o que aumentou seu envolvimento com o conteúdo e a prática. Ao final do estudo, relatou-se que a utilização dos materiais aumentou os níveis de envolvimento dos alunos com as atividades da aula e com o conteúdo da

unidade. Essa maior relação foi associada à versatilidade e às naturezas tátil e cinestésica dos ossos impressos, que podem ser desenhados e usados para ajudar a identificar marcos anatômicos importantes. Entre as limitações presentes no estudo, há a orientação em que os ossos foram impressos, tendo sido apenas fornecida uma lateralidade para os estudantes, e a precisão em relação aos marcos anatômicos, que facilitaria a diferenciação dos pontos de referência. Apesar dos benefícios encontrados, a revisão de Shi et al.²⁴ aponta que, para o estudo da anatomia pouco complexa, como a dos membros superiores e inferiores, o efeito de ensino proporcionado pela impressão 3D não é tão significativo, sendo o uso de imagens de TC em 2D ou imagens de reconstrução 3D suficiente para atingir efeitos de ensino de alto nível a baixo custo.

Diferentemente dos demais estudos que tratam do uso da impressão 3D para o ensino da anatomia macroscópica, Toledo-Ordoñez et al.³⁰ abordam a impressão 3D para o ensino da histologia. Em seu estudo, os autores propuseram a construção de modelos impressos em 3D para complementação das aulas práticas de histologia, a fim de permitir melhor compreensão da barreira de filtração glomerular em seu estado fisiológico, da síndrome nefrótica, da histologia do esôfago e das camadas da pele. Apesar da limitação da ausência da análise em relação à percepção e ao benefício do uso na aprendizagem dos estudantes que tiveram acesso aos modelos, relatam-se o potencial para favorecer o aprendizado de histologia, o baixo custo de fabricação e a biossegurança.

A impressão 3D também foi utilizada em um *workshop* para o treinamento de estudantes de Medicina e profissionais em áreas rurais e remotas⁶. A partir de modelos impressos, os participantes puderam treinar procedimentos de sutura, cricotireoidostomia, episiotomia e acesso intraósseo. Os resultados apresentados foram positivos, principalmente pela possibilidade de autonomia dos estudantes na impressão de modelos, realização de atividade prática de acordo com a velocidade de aprendizado individual, praticidade, sustentabilidade e redução de custos, haja vista os altos custos de simuladores⁶.

Impacto na aprendizagem e no desempenho dos estudantes

Quando se trata da aprendizagem do estudante, é essencial o envolvimento dele para uma aprendizagem profunda, a qual é associada a uma maior confiança acadêmica percebida e maior satisfação global com a graduação²⁵. A implementação de uma aprendizagem profunda pode ser efetiva ao incentivar o estudante a ter um papel essencial na busca do conhecimento. Esse tipo de aprendizagem contrapõe a aprendizagem superficial, em que o estudante

apenas memoriza fatos e conteúdos sem aplicações ou com propósitos reais, o que ocorre quando há o ensino com o educador como apresentador do conhecimento e o discente como consumidor. Essa última predispõe um menor envolvimento dos estudantes com o conteúdo e com a sala de aula, incorrendo em piores resultados²⁵.

O uso da impressão 3D permite melhorar e complementar as formas de aprendizagem, o que resulta numa compreensão mais profunda e significativa. Yan et al.⁴, em seu estudo com 442 estudantes de Medicina, comparam o uso da impressão 3D associado à aprendizagem baseada em problemas (*problem-based learning*) e à aprendizagem baseada em desafios (*case-based learning*) com métodos tradicionais para o aprendizado de doenças respiratórias. Os estudantes com acesso ao modelo impresso em 3D e às discussões em grupo obtiveram pontuações superiores nas avaliações pós-teste da aula, entretanto apresentaram resultados semelhantes na avaliação principal sobre o tema ocorrida duas semanas após. Desse modo, sugere-se uma pouca vantagem na manutenção do conhecimento teórico em comparação à metodologia tradicional. Entretanto, os estudantes que tiveram acesso ao modelo impresso apresentaram pontuações superiores em autoavaliação e grau de satisfação em termos de formação de pensamento clínico, iniciativa de aprendizagem, domínio do conhecimento anatômico, confiança na aprendizagem, capacidade de analisar e resolver problemas, compreensão do conhecimento e nível de satisfação com o método de ensino.

Ao compararem o uso da impressão 3D entre dois grupos que utilizaram a aprendizagem baseada em desafios para a compreensão da tetralogia de Fallot, Zhao et al.³¹ constataram que o uso da impressão revelou melhorias significativas no desempenho pós-teste, particularmente em anatomia patológica e interpretação de dados de imagem. Além disso, os estudantes apresentaram níveis mais altos de satisfação e confiança em comparação com aqueles que não tiveram acesso aos modelos impressos em 3D, destacando o impacto positivo da incorporação destes no ambiente de aprendizagem.

Youman et al.³², em outro estudo que comparou o aprendizado em osteocondroma e osteossarcoma entre estudantes do primeiro ano de Medicina, a partir do uso de imagens 2D e modelos impressos 3D, não encontraram melhores pontuações entre os grupos que utilizaram imagens 2D e modelos 3D. Entretanto, semelhantemente ao estudo anterior, os estudantes consideraram a atividade de aprendizagem como “eficaz” e “inovadora”, revelando que o uso da impressão 3D pode tornar a aprendizagem ainda mais significativa, corroborando os resultados de outros

estudos em que os grupos de impressão 3D levaram menos tempo para responder às perguntas em comparação aos grupos convencionais²¹.

Tal resultado corrobora outros trabalhos sobre o uso de modelos a partir da prototipagem para o estudo de patologias cardíacas complexas^{12,13} e as revisões sobre a eficácia de modelos tridimensionais para educação médica^{5,21,22}. De acordo com esses estudos, o envolvimento dos estudantes com os modelos aumenta a satisfação, motivação e confiança na aprendizagem, permitindo uma fixação do conhecimento de forma mais profunda e um aprimoramento das habilidades^{5,12,13,21,22}.

Tripodi et al.²⁵ relatam também que a utilização dos materiais impressos em 3D para o estudo da anatomia reduziu os níveis de ansiedade. Pela possibilidade de estudar com os ossos fora da universidade e do horário de aula, houve maior autonomia para o aprendizado, levando a um aumento do desempenho, da *performance* e do interesse. Entre os estudantes, destacou-se que o fato de poder olhar e tocar os modelos permitiu que o aprendizado fosse mais eficaz que apenas a leitura, os *slides* e a observação de imagens.

Quando se trata da avaliação da aprendizagem dos estudos e do ganho de conhecimento dos discentes, outros estudos também corroboram a vantagem da manufatura aditiva para o ensino de alunos nos períodos iniciais do curso, como apontam Radzi et al.³³ e Radzi et al.³⁴. Radzi et al.³³ compararam o ganho de conhecimento pelo uso da impressão 3D em comparação com peças anatômicas cadavéricas para o estudo da anatomia cardíaca e da cabeça e pescoço. O resultado das peças impressas foi superior para o aprendizado de conceitos fundamentais da anatomia e órgãos, enquanto as peças cadavéricas foram consideradas mais adequadas para o estudo de regiões complexas. Por sua vez, Radzi et al.³⁴ destacaram a possibilidade da distinção anatômica em cores, já que se constatou uma compreensão significativamente melhor dos participantes em modelos coloridos em comparação com os monocromáticos, sendo particularmente útil para alunos que estão aprendendo os fundamentos da anatomia.

De modo semelhante, ao compararem peças cadavéricas a modelos impressas em 3D para o estudo da anatomia cardíaca, Nusem et al.¹⁹ apontam como benefício um maior envolvimento dos estudantes, visto que eles tendem a manipular mais as peças impressas, sem o medo de causar danos. Entretanto, diferentemente de outros estudos, houve uma discreta preferência inicial por corações de cadáveres em vez de corações impressos em 3D. Lim et al.³⁵, em um estudo mais antigo, corroboram esses achados e mencionam que o uso de peças em 3D anatomicamente precisas pode servir como uma base útil para induzir familiaridade, facilitar níveis de conforto e quebrar inibições psicológicas ao eventual uso de

cadáveres. O uso de tal ferramenta pode ultrapassar barreiras que muitas vezes limitam o aprendizado, como a apreensão, o estresse e a ansiedade que são significativos durante os encontros iniciais com cadáveres, além da tendência inicial de evitar o contato com material cadavérico entre os estudantes de períodos iniciais.

Desafios, limitações e direções futuras

Destaca-se que a impressão 3D não se restringe apenas ao estudo anatômico, histológico ou microscópico de peças. Segundo Shine et al.² em um estudo sobre as instalações de impressão 3D em sistemas de saúde, a existência dessas instalações facilita o acesso à impressão levando em conta a vasta utilidade dela na área da saúde. Na maior parte das instalações, há o trabalho de uma equipe multidisciplinar, que é majoritariamente liderado por médicos, seguida de engenheiros e em alguns casos de estudantes, desenvolvendo nos participantes habilidades de liderança e trabalho em equipe.

Tem sido sugerido que uma formação com competências técnicas em modelagem e impressão 3D pode melhorar a capacidade espacial, desenvolver o pensamento crítico e incentivar a criatividade⁵, reforçando a importância não somente da facilidade das peças, mas também de todo o processo envolvido na impressão 3D no ensino médico. Desse modo, as habilidades desenvolvidas nessas instalações mostram-se extremamente relevantes, pois permitem aos estudantes a fabricação desde o projeto até a impressão do modelo final.

Outro ponto interessante é o envolvimento e a produção científica dos grupos, com publicação de trabalhos e apresentação em congressos médicos, de manufatura aditiva e inovação². Para a formação acadêmica do estudante, a existência dessas instalações permite a ele não apenas o conhecimento da impressão 3D, mas também o contato com a equipe multidisciplinar, reforçando o tripé básico das universidades: ensino, pesquisa e extensão³⁶.

Atualmente, uma das principais limitações da impressão 3D encontra-se nos custos e na disponibilidade de materiais para impressão. As peças impressas por vezes podem apresentar falta de flexibilidade ou menor qualidade tátil em comparação com as peças reais, sendo restritos os materiais que apresentam propriedades elásticas que se assemelham ao tecido humano que seriam ideais para a impressão de modelos de treinamento específico, e, quando disponíveis, os custos tornam-se um importante impeditivo¹⁶.

Destacam-se também as implicações éticas relacionadas aos modelos impressos, em razão do armazenamento dos arquivos para impressão de órgãos ou protótipos fetais e do possível compartilhamento de dados. Sem a permissão do doador, a impressão 3D do corpo ou mesmo de suas partes pode

levar a uma falta de consentimento eticamente questionável, tornando a situação ainda mais preocupante no caso da venda dos modelos ou arquivos de impressão visando ao lucro²¹.

Acredita-se que, futuramente, os materiais impressos, a fim de imitarem tecidos mais “suaves/moles”, deverão ser fabricados pela combinação de componentes, de modo a imitar, tanto quanto possível, as propriedades biomecânicas dos tecidos e das estruturas, como sugerem estudos mais antigos^{8,37}. Espera-se que a existência de mais pesquisas sobre o tema permita que a impressão 3D apresente não apenas a fidelidade anatômica, mas também a tecidual.

Outra limitação importante em relação ao uso da impressão 3D na educação médica encontra-se no uso e impacto da aprendizagem por modelos 3D³⁸. Embora os estudos apontem perguntas e provas práticas para a avaliação do conhecimento pré e pós-teste dos estudantes, esses métodos ainda trazem limitações sobre a utilização e o lugar da impressão 3D no currículo médico, além do impacto do seu uso no aprendizado dos discentes, principalmente na avaliação em longo prazo do uso de modelos.

Em um dos poucos estudos que avaliaram a aquisição de conhecimento imediato e em longo prazo entre estudantes que fizeram uso da impressão 3D em comparação com a utilização de métodos tradicionais para o estudo de doenças cardíacas congênitas, Lau et al.¹¹ mencionam que essa ferramenta indicou melhora na aquisição imediata de conhecimento. Contudo, os autores salientam que os estudantes que fizeram uso da impressão 3D apresentaram um desempenho ligeiramente inferior ao grupo de controle na retenção de conhecimento em longo prazo. Por conta disso, ambos os resultados têm pouca relevância estatística. Sendo assim, os resultados do estudo não sugeriram nenhuma melhoria significativa na aquisição e retenção de conhecimento no uso da impressão 3D em comparação com os métodos de ensino convencionais. Apesar dos resultados, o estudo menciona que o benefício positivo da impressão 3D para melhorar a experiência de aprendizagem não deve ser negligenciado e que é necessária a realização de mais pesquisas.

Em outro estudo que também avalia esse impacto em longo prazo, Al-Badri et al.³⁹ avaliaram a retenção do conhecimento em longo prazo para o estudo da anatomia craniofacial a partir de modelos impressos em 3D. Como resultado, constatou-se que os modelos impressos em 3D de estruturas com complexidade espacial, como vários padrões de craniossinostose, melhoraram significativamente a retenção em longo prazo de estudantes de Medicina, indicando sua eficácia educacional.

O'Brien et al.²³, ao avaliarem a retenção de conhecimento em longo prazo sobre a anatomia

traqueobrônquica, compararam os discentes que estudaram por 20 minutos com modelos impressos em 3D com aqueles que usaram apenas imagens em 2D. Após duas semanas, os estudantes que utilizaram modelos impressos mantiveram o nível de conhecimento, enquanto o grupo que usou imagens em 2D apresentou uma queda em suas pontuações. Embora o grupo de imagens em 2D tenha mostrado desempenho ligeiramente melhor imediatamente após o estudo, a diferença não foi significativa. Esses resultados sugerem que há uma maior retenção de informações dos estudantes por meio de métodos de aprendizagem visual e tátil em comparação com o uso de livros didáticos convencionais ou aprendizagem baseada em 2D. Entretanto, destaca-se a limitação em relação à amostra, tendo sido o estudo realizado apenas com 31 estudantes, sendo necessário a cautela na interpretação e generalização dos dados.

Dada a quantidade limitada de estudos, as divergências encontradas e o crescente interesse em modelos de anatomia 3D, revela-se a necessidade do desenvolvimento de mais pesquisas com enfoque na avaliação da retenção de conhecimento e na eficácia em longo prazo do uso de modelos 3D, avaliando principalmente os impactos duradouros da impressão 3D no ganho de conhecimento.

Para uma avaliação mais profunda do impacto da impressão 3D no conhecimento dos discentes, é necessário que futuros estudos incluam amostras maiores e comparem o uso da impressão 3D com métodos tradicionais de ensino, utilizando grupos de controle adequados. Esse enfoque comparativo auxiliará a delinear os benefícios específicos e as possíveis limitações da tecnologia 3D em relação às práticas convencionais.

Por fim, para uma integração efetiva dessa ferramenta nos currículos médicos e o desenvolvimento de novas pesquisas, é essencial implementar programas de formação para educadores. Esses programas devem capacitar os docentes no uso e na integração da impressão 3D no currículo médico, garantindo que os benefícios dessa tecnologia sejam plenamente aproveitados na educação de futuros profissionais de saúde.

Limitações

A presente pesquisa apresenta algumas limitações. Primeiramente, a seleção de artigos restrita a publicações de acesso aberto (*open access*) pode ter excluído estudos relevantes publicados em periódicos pagos. A delimitação de idiomas em português, inglês e espanhol pode, potencialmente, ter excluído contribuições importantes em outros idiomas. A restrição do período de publicação aos últimos cinco anos também pode ter omitido estudos mais antigos que ainda são relevantes para o tema.

Outra limitação significativa é a variabilidade nos métodos e parâmetros dos estudos revisados, o que pode dificultar comparações diretas e a generalização dos resultados. A falta de uniformidade nos critérios de avaliação e nos modelos de estudo utilizados impede uma análise mais consistente sobre o impacto da impressão 3D no desenvolvimento do conhecimento entre estudantes de Medicina.

A maioria dos estudos disponíveis se concentra na avaliação de curto prazo do impacto da impressão 3D na educação médica. Há uma escassez de pesquisas que investiguem os efeitos em longo prazo, incluindo a retenção de conhecimento e a aplicação prática das habilidades adquiridas. Assim, destaca-se a necessidade de estudos futuros que tragam essas questões e ofereçam uma visão mais abrangente dos benefícios e das limitações da impressão 3D no ensino médico.

CONCLUSÃO

O uso da impressão 3D para a construção do conhecimento entre estudantes de Medicina associa-se a uma aprendizagem profunda e significativa, estando relacionado à melhoria do aprendizado em curto prazo, à maior satisfação e ao engajamento do discente em comparação com os métodos tradicionais de ensino. No entanto, há limitações em relação ao seu uso, principalmente na disponibilidade de materiais para impressão e na quantidade limitada de estudos para avaliação em longo prazo. Assim, são essenciais investimentos em pesquisa, infraestrutura e formação de educadores para maximizar o impacto e integrar essa tecnologia de forma eficaz no currículo médico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à instituição de ensino Faculdades Pequeno Príncipe e à Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná que proporcionaram, por meio de projeto de iniciação científica, o desenvolvimento desta pesquisa.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Paula Cristina Yukari Suzaki Fujii, Guilherme Marçal Ferreira Lima, Leonardo Lopes Caetano dos Santos e Louise Knauber participaram da concepção do estudo, da metodologia do projeto, da análise de dados e da escrita do projeto. Mariana Xavier e Silva, Camila Moraes Marques e Izabel Cristina Meister Coelho participaram da concepção do estudo, da metodologia do projeto, da orientação e da revisão e edição do manuscrito.

CONFLITO DE INTERESSES

Declaramos não haver conflito de interesses.

FINANCIAMENTO

Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná, TC nº 209/2022 PDI.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS

Os dados de pesquisa estão disponíveis no corpo do documento.
Research data is available in the body of the document.

REFERENCES

- Perica E, Sun Z. Patient-specific three-dimensional printing for pre-surgical planning in hepatocellular carcinoma treatment. *Quant Imaging Med Surg.* 2017 Dec;7(6):668-77. doi: <https://doi.org/10.21037/qims.2017.11.02>.
- Shine KM, Schlegel L, Ho M, Boyd K, Pugliese R. From the ground up: understanding the developing infrastructure and resources of 3D printing facilities in hospital-based settings. *3D Print Med.* 2022 July 11;8(1):21. doi: <https://doi.org/10.1186/s41205-022-00147-7>.
- Windram JD, Neal A, McMahon CJ. Evolution in congenital cardiology education: the rise of digital-learning tools. *CJC Pediatr Congenit Heart Dis.* 2022 Dec 28;2(2):93-102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjpc.2022.12.005>.
- Yan X, Zhu Y, Fang L, Ding P, Fang S, Zhou J, et al. Enhancing medical education in respiratory diseases: efficacy of a 3D printing, problem-based, and case-based learning approach. *BMC Med Educ.* 2023 July 17;23(1):512. doi: <https://doi.org/10.1186/s12909-023-04508-6>.
- Ardila CM, González-Arroyave D, Zuluaga-Gómez M. Efficacy of three-dimensional models for medical education: a systematic scoping review of randomized clinical trials. *Heliyon.* 2023 Feb 1;9(2):e13395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13395>.
- Siraj S, Sivanathan M, Abdo S, Micallef J, Gino B, Buttu D, et al. Hands-on practice on sustainable simulators in the context of training for rural and remote practice through a fundamental skills workshop. *Cureus.* 2022 Sept 6;14(9):e28840. doi: <https://doi.org/10.7759/cureus.28840>.
- Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The role of 3D printing in medical applications: a state of the art. *J Healthc Eng.* 2019 Mar 21;2019(10):1-10. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/5340616>.
- García J, Yang Z, Mongrain R, Leask RL, Lachapelle K. 3D printing materials and their use in medical education: a review of current technology and trends for the future. *BMJ Simul Technol Enhanc Learn.* 2018 Jan;4(1):27-40. doi: <https://doi.org/10.1136/bmjstel-2017-000234>.
- Sanchez AU, Silva AMS, Heilmann RM, Tube MIC, Almeida MBV, Rolim Filho EL. Impressão 3D na relação médico-paciente: relato de experiência da integração entre ensino, inovação e assistência. *Rev Bras Educ Med.* 2024;48(3):e083,2024. doi: <https://doi.org/10.1590/1981-5271v48.3-2023-0012>.
- Mendes KS, Silveira RC, Galvão CM. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto Contexto Enferm.* 2008;17(4):758-64. doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-07072008000400018>.
- Lau I, Sun Z. The role of 3D printed heart models in immediate and long-term knowledge acquisition in medical education. *Rev Cardiovasc Med.* 2022 Jan 17;23(1):022. doi: <https://doi.org/10.31083/j.rcm2301022>.
- Hon NWL, Hussein N, Honjo O, Yoo SJ. Evaluating the impact of medical student inclusion into hands-on surgical simulation in congenital heart surgery. *J Surg Educ.* 2021 Jan-Feb;78(1):207-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2020.06.023>.
- Luxford JC, Cheng TL, Mervis J, Anderson J, Clarke J, Croker S, et al. An opportunity to see the heart defect physically: medical student experiences of technology-enhanced learning with 3D printed models of congenital heart disease. *Med Sci Educ.* 2023 Aug 1;33(5):1095-107. doi: <https://doi.org/10.1007/s40670-023-01840-w>.
- Preece D, Williams SB, Lam R, Weller R. "Let's get physical": advantages of a physical model over 3D computer models and textbooks in learning imaging anatomy. *Anat Sci Educ.* 2013 July-Aug;6(4):216-24. doi: <https://doi.org/10.1002/ase.1345>.
- Cercenelli L, De Stefano A, Billi AM, Ruggeri A, Marcelli E, Marchetti C, et al. AEDucaAR, Anatomical Education in Augmented Reality: a pilot experience of an innovative educational tool combining AR technology and 3D printing. *Int J Environ Res Public Health.* 2022 Jan 18;19(3):1024. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph19031024>.
- 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 Oct 20;23(1):783. doi: <https://doi.org/10.1186/s12909-023-04744-w>.
- Shah K, Ahmed J, Shenoy N. How different are students and their learning styles? *Int J Res Med Sci.* 2013 July;1(3):1. doi: <https://doi.org/10.5455/2320-6012.ijrms20130808>.
- Bois MC, Morris JM, Boland JM, Larson NL, Scharrer EF, Aubry MC, et al. Three-dimensional surface imaging and printing in anatomic pathology. *J Pathol Inform.* 2021 May 18;12:22. doi: https://doi.org/10.4103/jpi.jpi_8_21.
- Nusem E, Bray L, Lillia J, Schofield L, Scott KM, Gunasekera H, et al. Utility of 3D printed models versus cadaveric pathology for learning: challenging stated preferences. *Med Sci Educ.* 2022 Nov 16;32(6):1513-20. doi: <https://doi.org/10.1007/s40670-022-01684-w>.
- Gillis CJ, Bishop N, Walsh G, Harvey D. Evaluation of a novel 3D-printed urinary catheterization simulation model in undergraduate medical teaching. *Cureus.* 2020 May 31;12(5):e8377. doi: <https://doi.org/10.7759/cureus.8377>.
- Ye Z, Dun A, Jiang H, Nie C, Zhao S, Wang T, et al. The role of 3D printed models in the teaching of human anatomy: a systematic review and meta-analysis. *BMC Med Educ.* 2020 Sept 29;20(1):335. doi: <https://doi.org/10.1186/s12909-020-02242-x>.
- Shi J, Cavagnaro MJ, Xu S, Zhao M. The application of three-dimensional technologies in the improvement of orthopedic surgery training and medical education quality: a comparative bibliometrics analysis. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022 Mar 22;10:852608. doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.852608>.
- O'Brien C, Souza CA, Sheikh A, Miguel O, Wood T. Use of tracheobronchial tree 3-dimensional printed model: does it improve trainees' understanding of segmentation anatomy? A prospective study. *3D Print Med.* 2021 Jan 6;7(1):2. doi: <https://doi.org/10.1186/s41205-020-00092-3>.
- Shi J, Fu S, Cavagnaro MJ, Xu S, Zhao M. 3D printing improve the effectiveness of fracture teaching and medical learning: a comprehensive scientometric assessment and future perspectives. *Front Physiol.* 2021 Dec;12:726591. doi: <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.726591>.
- Tripodi N, Kelly K, Husaric M, Wospil R, Fleischmann M, Johnston S, et al. The impact of three-dimensional printed anatomical models on first-year student engagement in a block mode delivery. *Anat Sci Educ.* 2020 Nov;13(6):769-77. doi: <https://doi.org/10.1002/ase.1958>.
- Kiesel M, Beyers I, Kalisz A, Wöckel A, Löb S, Schlaiss T, et al. Evaluating a novel 3D printed model for simulating Large Loop Excision of the Transformation Zone (LLETZ). *3D Print Med.* 2022a Jun 8;8(1):15. doi: <https://doi.org/10.1186/s41205-022-00143-x>.
- Kiesel M, Beyers I, Kalisz A, Wöckel A, Quenzer A, Schläiß T, et al. Evaluating the value of a 3D printed model for hands-on training of gynecological pelvic examination. *3D Print Med.* 2022b July 6;8(1):20. doi: <https://doi.org/10.1186/s41205-022-00149-5>.
- Sudario G, Wray A, Janson R. Make and break your own hand: a review of hand anatomy and common injuries. *J Educ Teach Emerg Med.* 2020 Jan 15;5(1):SG1-SG16. doi: <https://doi.org/10.21980/J8PH0Z>.
- Neijhofs J, Sterz J, Rüsseler M, Britz V, Bepler L, Freund V, et al. Evaluation of a 3D-printed hands-on radius fracture model during teaching courses. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2024 Feb;50(1):49-57. doi: <https://doi.org/10.1007/s00068-023-02327-4>.

30. Toledo-Ordoñez I, Oneto N, Concha M, Sanhueza S, Osses M, Padilla-Meza J, et al. Diseño y fabricación de modelos impresos en 3D como complemento para las clases prácticas de histología médica. *Int J Morphol.* 2022;40(2):355-9. doi: <https://doi.org/10.4067/S0717-95022022000200355>.
31. Zhao J, Gong X, Ding J, Xiong K, Zhuang K, Huang R, et al. Integration of case-based learning and three-dimensional printing for tetralogy of fallot instruction in clinical medical undergraduates: a randomized controlled trial. *BMC Med Educ.* 2024 May 24;24(1):571. doi: <https://doi.org/10.1186/s12909-024-05583-z>.
32. Youman S, Dang E, Jones M, Duran D, Brenseke B. The use of 3D printers in medical education with a focus on bone pathology. *Med Sci Educ.* 2021 Feb 24;31(2):581-88. doi: <https://doi.org/10.1007/s40670-021-01222-0>.
33. Radzi S, Tan HKJ, Tan GJS, Yeong WY, Ferenczi MA, Low-Beer N, et al. Development of a three-dimensional printed heart from computed tomography images of a plastinated specimen for learning anatomy. *Anat Cell Biol.* 2020 Mar;53(1):48-57. doi: <https://doi.org/10.5115/acb.19.153>.
34. Radzi S, Chandrasekaran R, Peh ZK, Rajalingam P, Yeong WY, Mogali SR. Students' learning experiences of three-dimensional printed models and plastinated specimens: a qualitative analysis. *BMC Med Educ.* 2022 Sept 28;22(1):695. doi: <https://doi.org/10.1186/s12909-022-03756-2>.
35. Lim KH, Loo ZY, Goldie SJ, Adams JW, McMenamin PG. Use of 3D printed models in medical education: a randomized control trial comparing 3D prints versus cadaveric materials for learning external cardiac anatomy. *Anat Sci Educ.* 2016 May 6;9(3):213-21. doi: <https://doi.org/10.1002/ase.1573>.
36. Moita FMGSC, Andrade FCB. Ensino-pesquisa-extensão: um exercício de indissociabilidade na pós-graduação. *Rev Bras Educ.* 2009;14(41):269-80. doi: <https://doi.org/10.1590/S1413-24782009000200006>.
37. Waran V, Narayanan V, Karuppiah R, Owen SL, Aziz T. Utility of multimaterial 3D printers in creating models with pathological entities to enhance the training experience of neurosurgeons. *J Neurosurg.* 2014 Feb;120(2):489-92. doi: <https://doi.org/10.3171/2013.11.JNS131066>.
38. Azer SA, Azer S. 3D anatomy models and impact on learning: a review of the quality of the literature. *Health Prof Educ.* 2016 Dec;2(2):80-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hpe.2016.05.002>.
39. Al-Badri N, Touzet-Roumazielle S, Nuytten A, Ferri J, Charkaluk ML, Nicot R. Three-dimensional printing models improve long-term retention in medical education of pathoanatomy: A randomized controlled study. *Clin Anat.* 2022 July;35(5):609-15. doi: <https://doi.org/10.1002/ca.23878>.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.