

Desenvolvimento de Modelos de Cardiopatias Congênitas em Impressão 3D utilizando Metodologia de Baixo Custo – Uma Potencial Ferramenta para Aprimorar o Ensino da Cardiologia Pediátrica

Development of 3D-Printed Congenital Heart Disease Models Using Feasible Low-Cost Workflow – A Potential Tool to Improve Pediatric Cardiology Education

Francisco Candido Monteiro Cajueiro,¹ Ulisses Alexandre Croti,¹ Raimundo Francisco de Amorim Júnior,² Mariana Ribeiro Rodero Cardoso,¹ Carlos Henrique Costa,¹ Carlos Henrique De Marchi,¹ Bruna Cury Borim,¹ Moacir Fernandes de Godoy,¹ Milton Benevides de Freitas,³ Airton Camacho Moscardini¹

CardioPedBrasil® – Centro do Coração da Criança, Hospital da Criança e Maternidade de São José do Rio Preto (FUNFARME/FAMERP),¹ São José do Rio Preto, SP – Brasil

Instituto do Coração de Natal (INCOR Natal),² Natal, RN – Brasil

Universidade de Pernambuco,³ Recife, PE – Brasil

Resumo

Fundamento: As cardiopatias congênitas (CC) demandam profundo conhecimento anatomopatológico. A impressão 3D (Imp3D) é uma ferramenta de ensino promissora para a criação de protótipos físicos a partir de dados de imagem, mas os custos representam um grande obstáculo.

Objetivo: Descrever um fluxo de trabalho factível e de baixo custo para o desenvolvimento de modelos de CC em Imp3D e criar um conjunto de modelos de ensino compartilháveis.

Métodos: Foram utilizados conjuntos de imagens de tomografia cardíaca, seguindo as etapas de aquisição, segmentação, design digital, fatiamento, Imp3D e pós-impressão. Estruturas valvares foram criadas a partir de dados ecocardiográficos utilizando a técnica *cartographic heightmap* e inseridas nos protótipos. Os modelos de CC em Imp3D foram avaliados por uma equipe de especialistas, aprimorados e aplicados a residentes de cardiologia e cirurgia cardíaca durante uma sessão de ensino. Foram utilizados softwares gratuitos, impressora 3D desktop e materiais de baixo custo.

Resultados: Doze modelos de CC em Imp3D foram desenvolvidos, incluindo Comunicação Interventricular, Persistência do Canal Arterial, Comunicação Interatrial, Tetralogia de Fallot, Transposição das Grandes Artérias, Defeito do Septo Atrioventricular, Coarctação de Aorta, Síndrome do Coração Esquerdo Hipoplásico, Atresia Tricúspide, Atresia Pulmonar, Conexão Anômala Total de Veias Pulmonares, *Truncus Arteriosus* e Interrupção de Arco Aórtico. Todos os residentes (100%) concordaram que os protótipos eram “fiéis à anatomia”, “visualmente atraentes”, “motivaram o estudo” e “permitiram uma melhor conceitualização espacial”. Eles relataram que os modelos em Imp3D “são um importante recurso pedagógico” e podem potencialmente beneficiar a educação de “estudantes de graduação” (100%), “equipe interdisciplinar” (100%), “cardiologistas, cirurgiões e residentes” (100%) e “famílias” (93%).

Conclusão: O desenvolvimento de modelos de CC em Imp3D utilizando metodologia de baixo custo é factível. Os arquivos digitais dos modelos desenvolvidos estão disponíveis gratuitamente para download e impressão, com o objetivo de promover a educação de todos os interessados no estudo das CC.

Palavras-chave: Impressão Tridimensional; Cardiopatias Congênitas; Cardiologia.

Abstract

Background: Congenital heart diseases (CHD) require an in-depth anatomopathological understanding. 3D printing is a promising educational tool for creating physical prototypes from imaging data, but costs are a major issue.

Objective: This study aimed to describe a feasible low-cost workflow for the development of 3D-printed (3DP) CHD models and create a shareable educational set.

Correspondência: Francisco Candido Monteiro Cajueiro •

Hospital da Criança e Maternidade de São José do Rio Preto (FUNFARME) – Av. Jamil Feres Kfoury, 60. CEP 15091-240, São José do Rio Preto, SP – Brasil

E-mail: emaildefrancisco@gmail.com

Artigo recebido em 14/06/2025, revisado em 14/07/2025, aceito em 01/10/2025

Editor responsável pela revisão: Nuno Bettencourt

DOI: <https://doi.org/10.36660/abc.20250419>

Methods: Data from cardiac tomography images were used, following the steps of image acquisition, segmentation, digital design, slicing, 3D printing, and post-printing. Valvar structures were created from echocardiographic data using the cartographic heightmap technique and inserted into prototypes. 3DP models were evaluated by an expert team, enhanced, and applied to medical residents during an educational session. Free software, a desktop 3D printer, and low-cost materials were used.

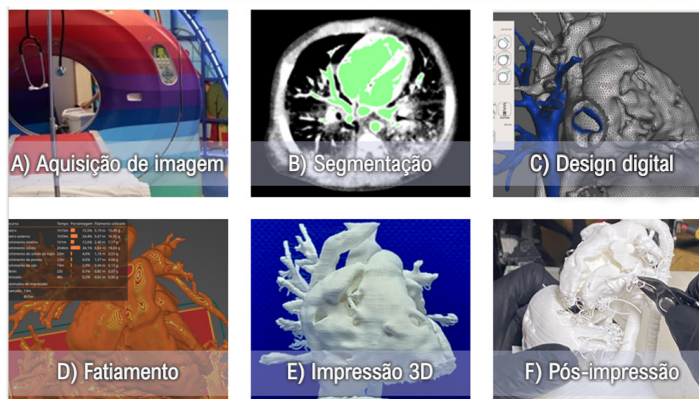
Results: Twelve 3DP models were developed, including ventricular septal defect with patent ductus arteriosus, atrial septal defect, Tetralogy of Fallot, transposition of the great arteries, atrioventricular septal defect, coarctation of the Aorta, hypoplastic left heart syndrome, tricuspid atresia, pulmonary atresia, total anomalous pulmonary venous connection, Truncus arteriosus, and interrupted aortic arch. All residents (100%) agreed that prototypes were “faithful to the anatomy”, “visually appealing”, “motivated the study”, and “allowed better spatial conceptualization”. They related 3DP CHD models “are an important pedagogical resource” and can potentially benefit the education of “undergraduate students” (100%), “interdisciplinary team” (100%), “cardiologists, surgeons and residents” (100%), and “families” (93%).

Conclusion: Development of 3DP CHD models using a low-cost workflow is feasible. Models developed are freely available for download and printing, intending to promote education to all interested in CHD.

Keywords: Three-Dimensional Printing; Congenital Heart Defects; Cardiology.

Full texts in English - <https://abccardiol.org/en/>

Figura Central: Desenvolvimento de Modelos de Cardiopatias Congênitas em Impressão 3D utilizando Metodologia de Baixo Custo – Uma Potencial Ferramenta para Aprimorar o Ensino da Cardiologia Pediátrica



Arq Bras Cardiol. 2026; 123(1):e20250419

Proposta de fluxo de trabalho utilizando software gratuito, uma impressora 3D desktop e materiais acessíveis. 1: Aquisição de imagem cardíaca; 2: Segmentação - InVesalius® 3.1; 3: Design digital - AutoDesk® Meshmixer™ 3.5.474; 4: Fatiamento - PrusaSlicer® 2.4.2; 5: Impressão 3D - Impressora 3D Creality® Ender-3™; 6: Pós-impressão.

Introdução

A cardiologia e a cirurgia cardiovascular pediátrica exigem um profundo conhecimento anatomopatológico, e a capacidade de construir representações mentais em três dimensões é fundamental para a compreensão completa da doença cardíaca congênita.¹

A capacidade de criar protótipos físicos a partir de exames de imagem, como a tomografia computadorizada (TC), tornou a impressão 3D (Imp3D) uma ferramenta valiosa. As aplicações da Imp3D na cirurgia das cardiopatias congênitas podem ser divididas em aplicações clínicas para tomada de decisão e planejamento cirúrgico, simulação cirúrgica pré-operatória e aplicações educacionais como treinamento cirúrgico prático, ensino da morfologia cardíaca congênita “hands-on” e educação de pacientes e familiares.² Essa tecnologia em rápida evolução tem remodelado e aprimorado processos, beneficiando potencialmente todos os envolvidos no tratamento das cardiopatias congênitas (CC).

Diversas condições podem limitar o uso da tecnologia de Imp3D em ambientes com poucos recursos. A criação de um centro de Imp3D em um hospital exige um planejamento financeiro cuidadoso devido aos custos substanciais envolvidos. As despesas anuais com licenças de software podem ultrapassar os 10.000 euros, enquanto as impressoras 3D de alto desempenho podem custar mais de 150.000 euros.³

Este estudo teve como objetivo desenvolver um conjunto de modelos de CC em Imp3D, representativos das doenças mais prevalentes, detalhando um fluxo de trabalho factível e de baixo custo que pode ser reproduzido por qualquer pesquisador em ambientes com poucos recursos, e compartilhar os modelos digitais criados para fins educacionais.

Métodos

Aspectos éticos

O estudo foi submetido à Plataforma Brasil com o Certificado de Apresentação para Apreciação Ética número 48575021.3.0000.5415 e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto em 9 de julho de 2021. O estudo foi concluído em 2024. Todos os dados foram coletados do banco de dados institucional de imagens de pacientes com CC com menos de dois anos de idade que haviam sido submetidos a exames complementares para elucidação diagnóstica ou planejamento perioperatório. Nenhuma criança foi identificada, recrutada especificamente ou submetida a um novo exame para fins de pesquisa. Portanto, não houve necessidade de formulários de consentimento do paciente devido à natureza retrospectiva da coleta de dados. Em relação aos avaliadores, todos foram submetidos ao Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D

A seleção dos casos considerou a prevalência global das CC⁴ e os dados disponíveis na coleção de Radiologia Cardíaca Pediátrica dos arquivos do CardioPedBrasil®.

As CC selecionadas para prototipagem 3D foram: Comunicação Interventricular (CIV), Persistência do Canal Arterial (PCA), Comunicação Interatrial (CIA), Tetralogia de Fallot (TOF), Transposição das Grandes Artérias (TGA), Defeito do Septo Atrioventricular (DSAV), Coartação de Aorta (CoAo), Síndrome do Coração Esquerdo Hipoplásico (SCEH), Atresia Tricúspide (TriAtr), Atresia Pulmonar (PulmAtr), Conexão Anômala Total de Veias Pulmonares (CATVP), *Truncus Arteriosus* e Interrupção de Arco Aórtico (IAA). Buscamos aquisições de imagens de TC otimizadas, visando processamento de alta qualidade durante as etapas de trabalho, e selecionamos o melhor conjunto de imagens de TC para cada CC. Embora cada CC apresente muitos subtipos, buscamos encontrar um caso representativo de cada doença.

O desenvolvimento seguiu as recomendações do *3DPrinting Special Interest Group* (SIG) da *Radiological Society of North America* (RSNA)⁵ e está resumido na Figura Central.

Aquisição de imagens

O protocolo institucional para aquisição de TC cardíaca pediátrica estabelece o uso de contraste iodado intravenoso Guerbet-Henetix® 350 mg/ml, 1,5-2,0 ml/kg, com velocidade de infusão da bomba de 2,0-3,0 ml/s. As aquisições foram: fase de localização (scout), fase sem contraste, fase pré monitoramento, fase arterial (tensão de 80 kV, corrente do tubo de 120 mA/s, protocolo axial, rotação do tubo de 360° em 0,5 s, passo de 1,375, espessura de corte de 1,0 mm, razão de reconstrução volumétrica de 0,625/0,312), fase arterial tardia (ou venosa precoce) (3-6 segundos após a aquisição arterial) e fase venosa tardia. Todos os pacientes receberam suporte anestésico durante os exames de TC.

Segmentação das áreas de interesse

Consiste na conversão de centenas de imagens DICOM de TC 2D (dados nos eixos cartesianos x,y) em uma matriz de voxels 3D (dados nos eixos cartesianos x,y,z), permitindo a continuidade do fluxo de trabalho de modelagem volumétrica 3D. O software Invesalius® 3.1 permitiu a seleção semiautomática de regiões de interesse (ROI) e realizou a extração digital. Os arquivos DICOM foram importados, áreas entre 440 e 1300 HU foram selecionadas e cada imagem adquirida foi otimizada para uma matriz de voxels 3D final. O produto definitivo foi convertido e exportado para o formato STL.

A segmentação cardíaca precisa e a seleção de áreas de interesse dependem da experiência dos operadores tanto na morfologia das CC quanto no processamento digital de imagens. Embora a inteligência artificial possa acelerar e automatizar significativamente esse processo, os altos custos das plataformas disponíveis comercialmente podem limitar a viabilidade de se estabelecer um serviço de Imp3D em ambientes hospitalares com recursos limitados. Felizmente, existem ferramentas gratuitas capazes de converter arquivos DICOM em extensões compatíveis como STL ou OBJ (Object File Wavefront), como InVesalius®, 3DSlicer®, 3DView®, Horos®, ImageJ®, The Medical Imaging Interaction Toolkit®, ITK-Snap® e Seg3D®.

Modelagem 3D

Após a segmentação, o volume 3D resultante é processado em um software de design digital. Nesta fase, é possível eliminar estruturas anatômicas residuais irrelevantes. O processo de renderização permite editar, modelar, refinar, preencher, suavizar, inspecionar e corrigir falhas que poderiam afetar a interpretação precisa dos dados pela impressora 3D.

Utilizando o Autodesk® Meshmixer™ 3.5.474, criamos uma camada externa ao redor da aquisição de contraste da TC (*blood pool*), gerando uma camada (3mm *offset distance*) que envolve a silhueta negativa das câmaras e vasos (tornando-os ocos). Janelas que permitem a inspeção intracardiaca foram criadas para melhor visualização. Uma base plana foi desenvolvida para manter a integridade estrutural dos modelos durante a montagem e diminuir a necessidade de suportes. Exemplos de software gratuito de modelagem 3D incluem: Autodesk® Meshmixer™ e Blender®.

Representação valvar

Os dispositivos ecocardiográficos padrão não permitem a exportação livre de dados em um formato adequado para Imp3D e exigem pacotes de softwares específicos de alto custo, o que dificulta a representação das valvas cardíacas em modelos de CC acessíveis.⁶ Para modelos de CC nos quais a representação do aparelho valvar era essencial, como DSAV e *Truncus Arteriosus*, as valvas cardíacas foram digitalizadas separadamente da partir da ecocardiografia 2D.

A técnica *Heightmap* é uma estratégia cartográfica utilizada para criar mapas 3D (com profundidade e altura) a partir de imagens de satélite/aéreas 2D. Ela interpreta a distância de deslocamento (ou “altura”) de acordo com diferentes graus de luminosidade em partes de uma imagem. Geralmente, os mapas são exibidos em escala de cinza, onde o preto representa a altura mínima (áreas baixas) e o branco representa áreas mais altas, com uma gama de intensidades de luminosidade/alturas intermediárias.

Foram selecionadas imagens em .JPG de ecocardiografia 2D do DSAV (janela subcostal ao final da sístole da valva atrioventricular comum) e do *Truncus Arteriosus* (janela paraesternal em eixo curto ao final da diástole final da valva truncal). A matriz de pixels em escala de cinza 2D adquirida (dados dos eixos cartesianos x,y) do ecocardiograma foi convertida para o formato STL utilizando a técnica *Heightmap* na ferramenta online *Fabconvert*®. Em seguida, as valvas foram modeladas graficamente, tiveram seu volume aumentado e o design aprimorado (Autodesk® Meshmixer™ 3.5.474) e inseridas digitalmente nos protótipos (Figura 1).

Fatiamento

Os modelos digitais finalizados (arquivos STL ou OBJ) foram convertidos no software *PrusaSlicer*® 2.4.2. Os fatiadores segmentam o modelo em inúmeras camadas, permitem a adição de parâmetros de impressão importantes, e traduzem dados 3D em extensão de representação gráfica G-code, que contém comandos que permitem à impressora executar o processo físico de fabricação. Exemplos de fatiadores

gratuitos incluem *PrusaSlicer*®, *Cura*®, *Craftware*®, *Repetier*® e *Slic3r*®.

Parâmetros técnicos da impressora 3D

Foram utilizados filamento de ácido polilático (PLA) de 1,75 mm, 1,24 g/cm³, temperatura do bico de 210 °C na primeira camada (205 °C nas subsequentes), temperatura da mesa de 60 °C, velocidade volumétrica máxima de 15 mm³/s, retração de 5 mm e velocidade de retração de 60 mm/s, diâmetro do bico de impressão de 0,4 mm, altura da camada de 0,24 mm na primeira camada (0,2 mm nas subsequentes), preenchimento de 20%, padrão de preenchimento hexagonal, espessura superior e inferior de 3 mm, velocidade de perímetro/pontes/suporte/preenchimento de 60 mm/s, velocidade da primeira camada de 20 mm/s e sobreposição da superfície de 25%, modos especiais, “camadas adaptativas” e “suavidade”.

É essencial conhecer as especificações e configurações para otimizar a impressora, ajustando os principais parâmetros do processo.

Recursos da impressora 3D

Os modelos educacionais de CC foram desenvolvidos pela técnica de Fused Deposition Modeling (FDM) em uma impressora 3D doméstica *Crealty*® Ender 3TM com filamento monofilamento branco *National 3D*® PLA MAXTM de 1,75 mm.

Pós-impressão

Remoção de resíduos termoplásticos e acabamento do modelo.

Protótipos iniciais de cardiopatias congênitas

Doze protótipos de CC em Imp3D foram desenvolvidos representando as seguintes CC e seus subtipos: 1) CIV Perimembranosa Central com PCA; 2) CIA *Ostium Secundum*; 3) TOF com estenose pulmonar; 4) TGA; 5) DSAV forma total tipo A (classificação de Rastelli); 6) CoAo; 7) SHCE; 8) TriAtr tipo IC; 9) PulAtr tipo A (classificação de Barbero-Marcial); 10) CATVP tipo infracardiaco; 11) *Truncus Arteriosus* tipo 1 (classificação de Collett-Edwards); e 12) IAA tipo C (classificação de Celoria-Patton).

Composição da equipe de especialistas e avaliação inicial dos protótipos

Composta por 26 médicos afiliados à *CardioPedBrasil*® de diversas especialidades, incluindo cardiologia pediátrica, ecocardiografia pediátrica, terapia intensiva pediátrica, radiologia cardiovascular pediátrica, cardiologia intervencionista pediátrica e cirurgia cardiovascular pediátrica.

Eles receberam informações sobre os doze protótipos iniciais de CC 3DP e responderam a um questionário estruturado do tipo Likert (Software de Pesquisa *QuestionPro*®). Os dados foram analisados e os modelos foram aprimorados para otimizar a experiência educacional.

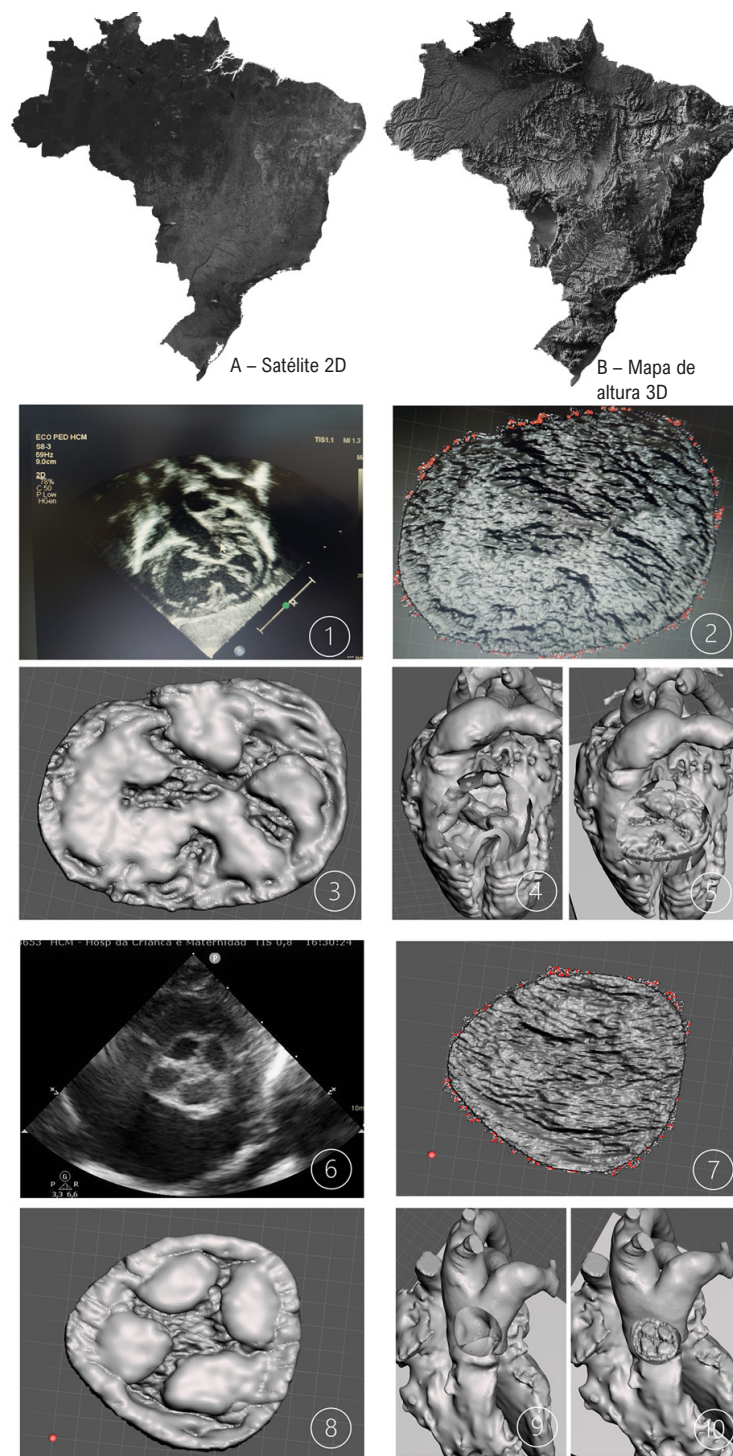


Figura 1 - Utilização da técnica cartographic heightmap para conversão de imagens de satélite 2D em mapas 3D como estratégia alternativa para modelagem de válvulas cardíacas para fins educacionais a partir de uma imagem de ecocardiografia (ECO) 2D. A: Imagem bidimensional de satélite do Brasil; B: Heightmap do Brasil; 1: Imagem de ECO janela subcostal de uma válvula atrioventricular comum ao final da sístole em formato .jpg; 2: Efeito volumétrico após processamento com a técnica Heightmap em formato .stl; 3: Otimização de volume do objeto digital; 4 e 5: Inserção do objeto 3D final dentro da estrutura do modelo de Comunicação Interatrial; 6-10: Mesmo processo aplicado a uma imagem de ECO janela paraesternal eixo curto de uma válvula quadricúspide ao final da diástole para modelagem 3D de um modelo educacional de Truncus Arteriosus.

Modelos finais e criação de um conjunto educacional

Seguindo as recomendações dos especialistas, os modelos finais foram padronizados e aumentados em 10% em comparação com os protótipos originais (Figuras 2 a 6). Os modelos foram acondicionados em caixas de madeira com compartimentos internos e placas informativas identificando cada protótipo.

Cenário de aplicação clínica (sessão de ensino)

Quinze residentes de cardiologia e cirurgia cardíaca foram convidados para um seminário de 3 horas que abordou os principais aspectos de cada um dos 12 modelos de CC propostos. Eles participaram de uma sessão de ensino tradicional com recursos audiovisuais e tiveram acesso à versão final aprimorada de CC em Imp3D. Uma nova avaliação qualitativa foi realizada.

Questões financeiras

O planejamento financeiro é essencial para uma iniciativa sustentável de Imp3D em para CC. Infraestrutura, instalações, equipamentos, manutenção e financiamento são preocupações vitais. Licenças de software, impressoras de alto desempenho e suprimentos de impressão realistas podem ser muito caros. Os custos com as horas de trabalho da equipe de suporte, como radiologista cardíaco pediátrico, engenheiro biomédico, designer digital e todos os recursos humanos integrados ao processo, variam em cada país e precisam ser considerados. O uso de software livre, impressoras 3D de mesa (algumas a partir de menos de US\$ 300 - 2025) e filamentos de baixo custo (PLA de US\$ 10 a US\$ 40 por quilograma - 2025) permite a prototipagem com custos reduzidos. Com o estudo autogerido das etapas de impressão e do funcionamento

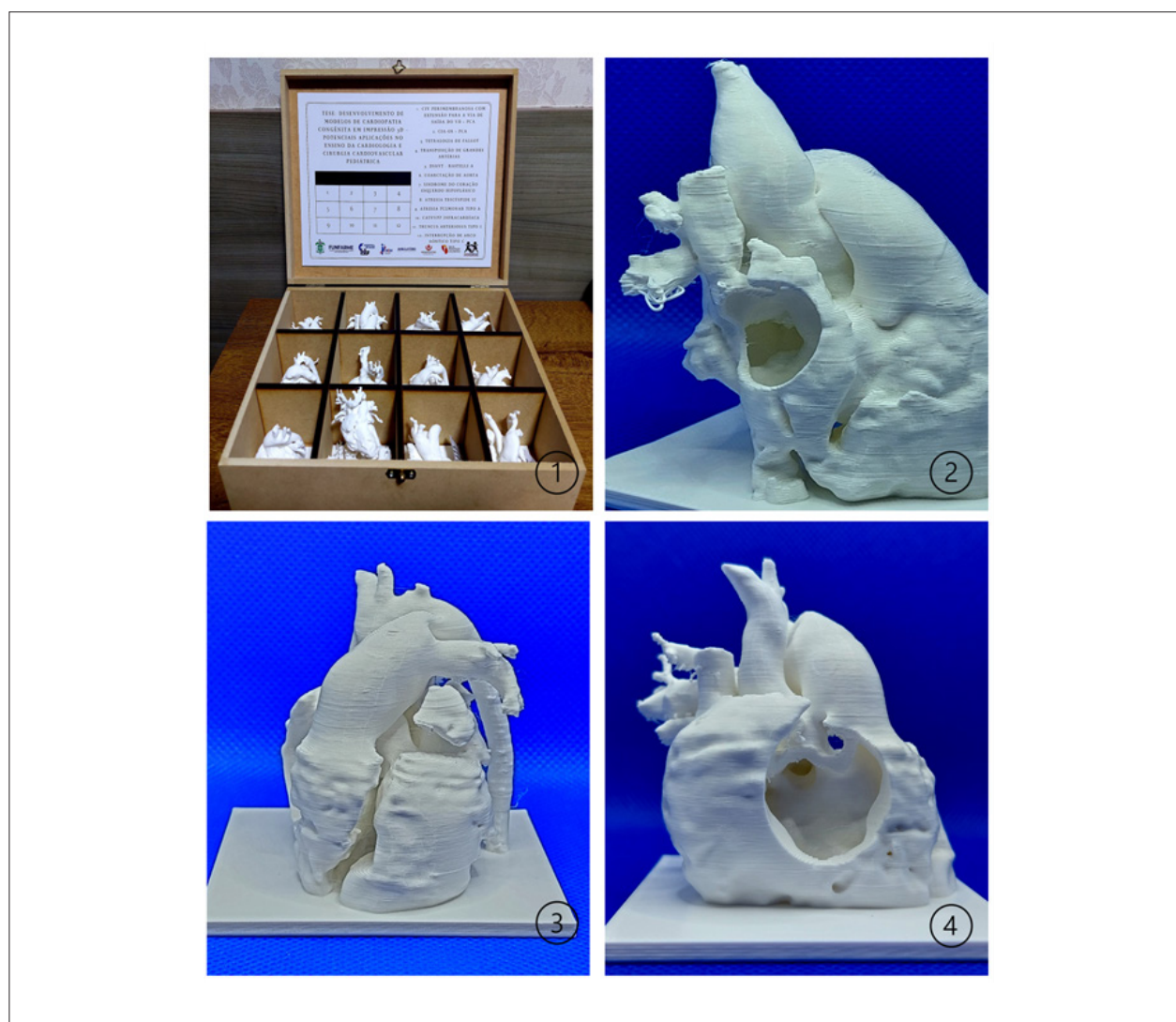


Figura 2 – Modelos representativos de cardiopatias congênitas em impressão 3D. 1: Proposta de box educacional com modelos de CC em impressão 3D; 2: Modelo de comunicação interatrial (CIA) do tipo ostium secundum; 3 e 4: Modelo de comunicação interventricular (CIV) perimembranosa central com persistência do canal arterial (PCA).

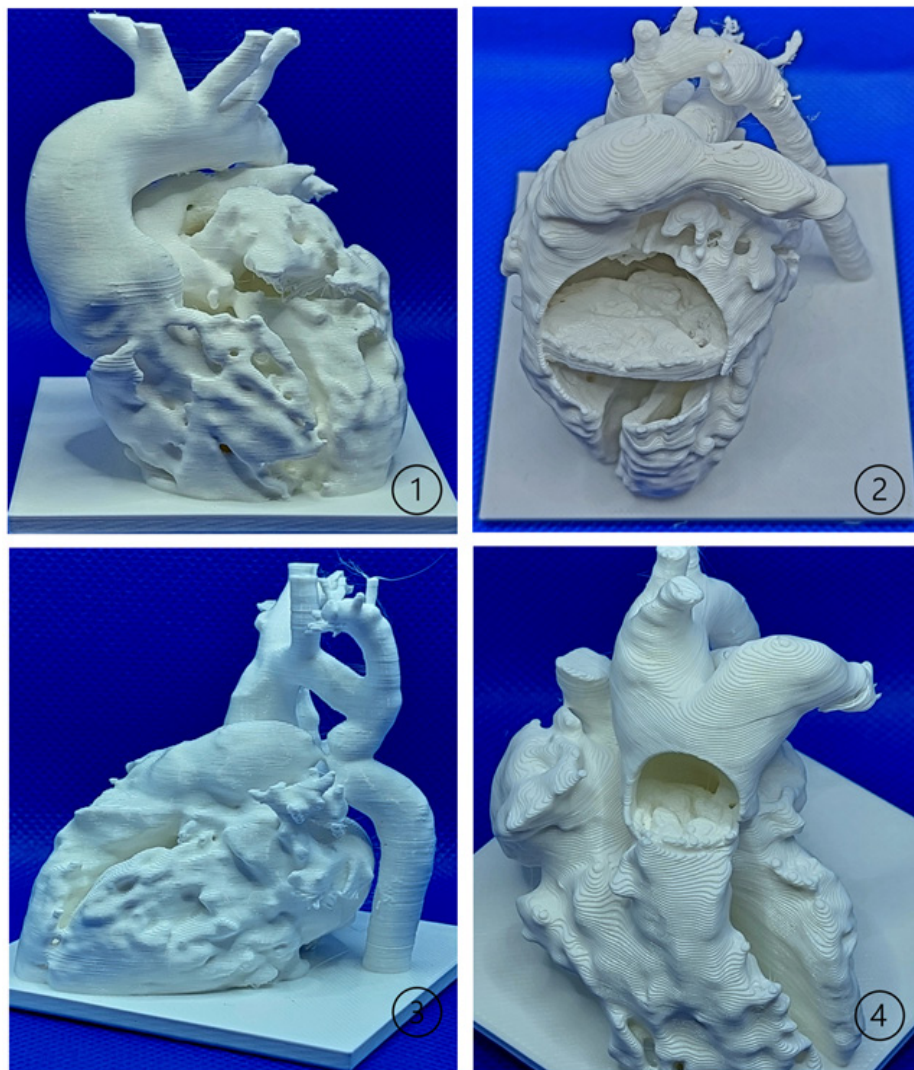


Figura 3 – Modelos representativos das cardiopatias congênitas impressos em 3D. 1: Modelo de Transposição das Grandes Artérias (TGA); 2: Modelo de Defeito do Septo Atrioventricular (DSAV) forma total tipo A (classificação de Rastelli); 3: Modelo de Coartação de Aorta (CoAo); 4: Modelo de Truncus Arteriosus tipo 1 (classificação de CollettEdwards).

dos softwares (segmentação, design digital e fatiamento), os custos com horas de trabalho profissional podem ser drasticamente reduzidos, e qualquer pesquisador pode desenvolver seu próprio conjunto de protótipos.

Resultados

Todos os residentes concordaram totalmente com a afirmação: “Considero a dificuldade de visualização espacial um dos principais obstáculos para a compreensão das cardiopatias congênitas”. Oitenta por cento deles não tinham conhecimento prévio sobre Imp3D na área médica.

Ao avaliar cada modelo individualmente, 100% dos residentes concordaram totalmente que foram capazes de identificar as principais características anatômicas que

definem CIV + PCA, CIA, TGA, CoAo, SCEH, PulmAtr, CATVP, *Truncus Arteriosus* e IAA; as avaliações dos demais modelos individualmente (concordo totalmente/ concordo parcialmente/discordo parcialmente/ discordo totalmente) foram: TOF (86,6%/13,3%/0%/0%), CAV (73,3%/26,6%/0%/0%) e TriAtr (86,6%/13,3%/0%/0%). A análise das principais características relacionadas ao conjunto de modelos está expressa na Figura 7.

Os avaliadores identificaram como grupos potencialmente beneficiados educacionalmente pelo ensino das CC utilizando modelos em Imp3D os “estudantes de graduação” (100%), a “equipe interdisciplinar” (100%), os “cardiologistas, cirurgiões cardíacos e residentes” (100%) e “familiares e cuidadores de crianças” (93%) (Figura 8).

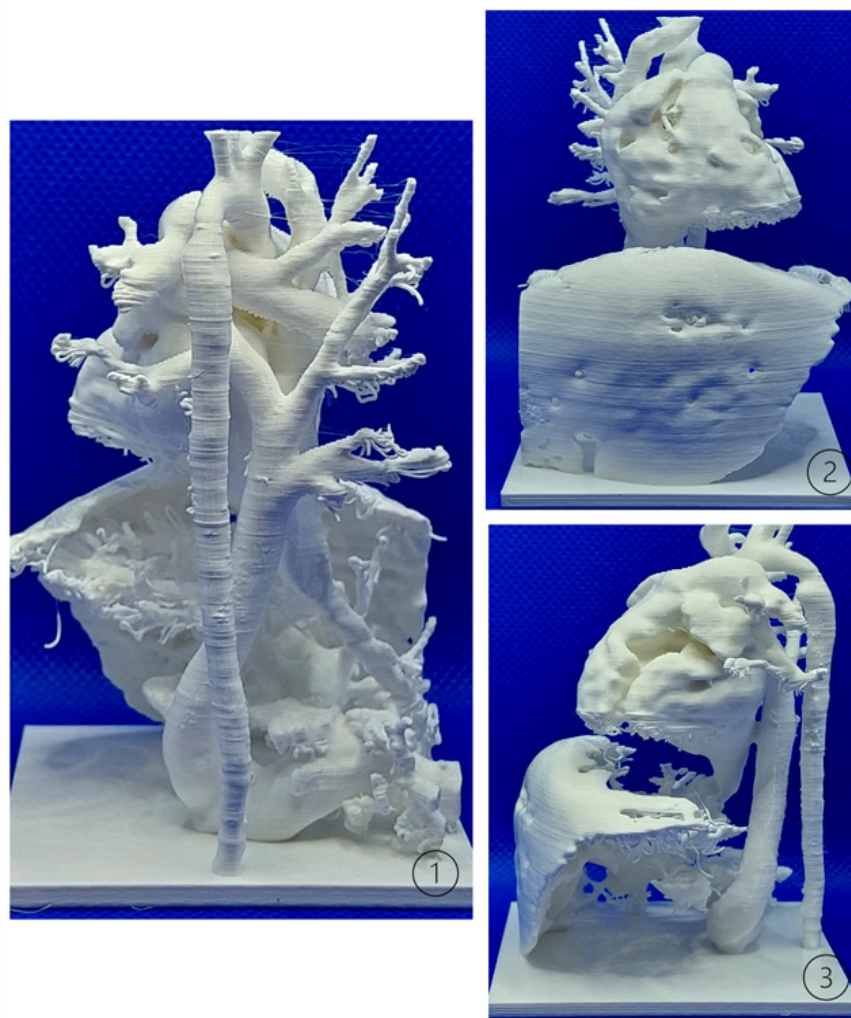


Figura 4 – Modelo representativo em impressão 3D da Conexão Anômala Total de Veias Pulmonares (CATVP) do tipo infracardiaca. 1: Vista geral; 2 e 3: Vistas detalhadas.

Discussão

Esta é uma iniciativa brasileira para desenvolver um conjunto de modelos de CC em Imp3D, baseados em casos de pacientes reais, potencialmente úteis como ferramenta para o ensino da cardiologia e da cirurgia cardiovascular pediátrica. Objetivamos nessa pesquisa descrever um fluxo de trabalho de baixo custo, metodologicamente reproduzível para qualquer pesquisador, profissional ou estudante, utilizando softwares livres e de fácil acesso para download. Existem cursos online gratuitos voltados para o ensino de segmentação, design digital, fatiamento e tecnologia de impressão. A pesquisa original, com todos os detalhes, e todos os modelos 3D de CC criados estão disponíveis gratuitamente em <http://sites.google.com/view/3dpequenoscoracoes> e <http://cardiopedbrasil.com.br/pesquisa> como arquivos STL para impressão 3D.

Esperamos que todos possam imprimir seus próprios conjuntos de modelos 3D e aplicá-los em suas realidades para compartilhar conhecimento. No Brasil, exemplos na área de Imp3D, CC e educação foram publicados, destacando a crescente importância deste tema.⁷⁻¹¹ A educação é, e sempre deverá ser, o principal objetivo dos esforços para qualificar todas aquelas dedicadas às crianças com CC.

Independentemente do recurso educacional utilizado, os métodos tradicionais de ensino se limitam a representações anatômicas em superfícies planas. Sejam livros didáticos, diagramas, radiografias, ecocardiografias, cateterismos ou projeções de reconstrução 3D e exames de TC ou ressonância magnética, quando apresentados em uma tela ou monitor, todos representam, em última análise, o coração em dois planos.¹²



Figura 5 – Modelos representativos das cardiopatias congênitas em impressão 3D. 1 e 2: Modelo de Tetralogia de Fallot (TOF) com estenose pulmonar; 3 e 4: Síndrome do Coração Esquerdo Hipoplásico (Modelo SCEH).

Embora a dissecação e o estudo de espécimes patológicos tenham historicamente permanecido como o padrão ouro do ensino de anatomia, existem limitações para a manutenção dessa prática.¹³ De fato, na maioria das instituições de saúde em todo o mundo, a observação direta de espécimes durante procedimentos cirúrgicos, autópsias ou em laboratórios de patologia é limitada ou inexistente. Iwanaga et al., ao revisarem métodos modernos de ensino de anatomia, destacaram a importância de uma abordagem multidisciplinar, incluindo Imp3D, realidade aumentada e realidade virtual. Eles relataram que o aprendizado por meio de Imp3D é geralmente percebido como agradável e eficaz.¹⁴

A Imp3D é um método de fabricação rápida usado para criar objetos físicos tridimensionais a partir de arquivos digitais. Os recentes avanços tecnológicos e a expiração de patentes industriais reduziram significativamente os custos de equipamentos e suprimentos para Imp3D, tornando essa tecnologia mais acessível. Assim, abordagens de baixo custo têm sido exploradas. Gómez-Ciriza et al. desenvolveram

modelos de CC usando software livre, impressoras 3D desktop e materiais de baixo custo, mantendo grande precisão anatômica e alta qualidade, sendo considerados adequados para a prática clínica.¹⁵ Sun et al. mostraram que modelos de CC em Imp3D de baixo custo são precisos na reprodução da anatomia, destacando a viabilidade da tecnologia de Imp3D na educação médica e na prática clínica.¹⁶ Grieshaber et al. descreveram um fluxo de trabalho baseado exclusivamente no uso de softwares de código aberto e hardwares financeiramente acessíveis, adequado para regiões com poucos recursos econômicos.¹⁷

A qualidade dos modelos 3D é influenciada pelas características de cada modalidade de imagem. Neste estudo, modelos 3D educacionais foram desenvolvidos com base em angiotomografias cardíacas (angioTC) conhecidas por sua excelente visualização de estruturas vasculares. Consequentemente, os modelos 3D que caracterizam predominantemente defeitos extracardíacos, como TGA, CoAo, SHCE, CATVP, IAAo, PulmAtr e *Truncus Arteriosus*,

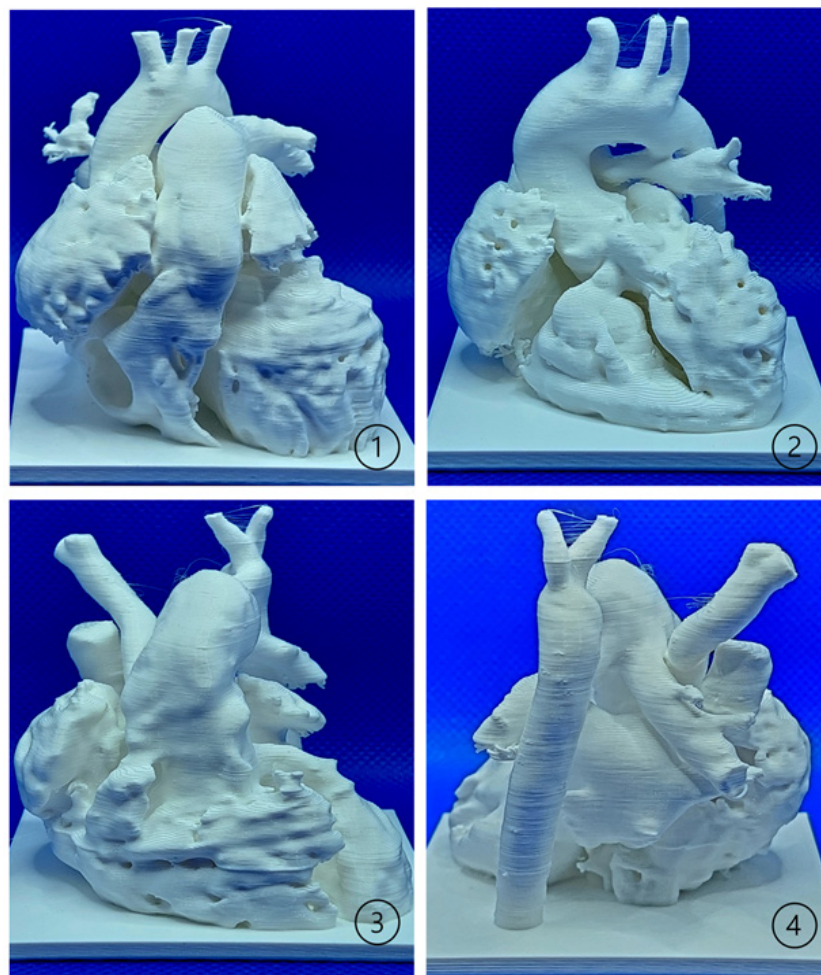


Figura 6 – Modelos representativos das cardiopatias congênitas em impressão 3D. 1: Modelo de Atresia Tricúspide (TricAtr) tipo 1C; 2: Modelo de Atresia Pulmonar (PulAtr) com comunicação interventricular tipo A (classificação de Barbero-Marcial). 3 e 4: Modelo de Interrupção de Arco Aórtico (IAAo) tipo C (classificação de Celoria-Patton).

receberam avaliações mais altas dos avaliadores em comparação com protótipos que representam defeitos intracardíacos, como TOF, DSAV e TriAtr.

Muitos fatores podem afetar a precisão dimensional de estruturas anatômicas impressas em 3D, incluindo a qualidade da aquisição de imagem, segmentação, design digital, configuração dos parâmetros de fatiamento, resolução da impressora 3D e tipo de filamento.¹⁸ A precisão anatômica de modelos em Imp3D foi estudada por Lee, Squelch e Sun, quem compararam os modelos em Imp3D com os originais angiotomográficos de pacientes com CC. Após analisar múltiplos marcos anatômicos, observaram uma excelente correlação anatômica ($r = 0,99$) e diferenças mínimas entre os modelos 3D impressos e as imagens originais, todas medindo menos de 0,5 milímetros (média = $0,21 \pm 0,37$ mm; diferença percentual média

variando entre 0,4 e 0,9%), sem diferença estatisticamente significativa.¹⁹ Em nosso estudo, 93,3% dos residentes de cardiologia e cirurgia cardíaca participaram do estudo e 93,3% concordaram totalmente que os modelos de CC em Imp3D “fiéis à anatomia da doença”, “visualmente atraentes” e “de tamanho adequado”.

A obtenção de imagens de alta qualidade é essencial para o processo de prototipagem. No entanto, a TC nem sempre é o exame complementar necessário para o diagnóstico e manejo das CC. Nesse contexto, para desenvolver alguns dos modelos de Imp3D apresentados neste estudo, buscamos conjuntos de imagens de pacientes com CC que haviam sido submetidos à TC cardíaca para investigar morbididades associadas. Por exemplo: um lactente diagnosticado com CIV e sintomas respiratórios obstrutivos, que foi submetido à TC para investigar compressão extrínseca das vias aéreas.

Os modelos educacionais de cardiopatias congênitas em impressão 3D são:

DECLARAÇÃO	Concordo totalmente	Concordo	Discordo	Discordo totalmente	Geral
Fielis à anatomia da doença	14 93,3%	1 6,6%	0 0%	0 0%	15 100%
Visualmente atraentes	14 93,3%	1 6,6%	0 0%	0 0%	15 100%
Tamanho adequado	14 93,3%	1 6,6%	0 0%	0 0%	15 100%
Fáceis de manipular	15 100%	0 0%	0 0%	0 0%	15 100%
Aparentemente resistentes	15 100%	0 0%	0 0%	0 0%	15 100%
Capazes de motivar o estudo das cardiopatias congênitas	15 100%	0 0%	0 0%	0 0%	15 100%

Utilizados durante uma sessão educacional, os modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D:

AFIRMAÇÕES	Concordo totalmente	Concordo	Discordo	Discordo totalmente	Geral
Me ajudaram a entender melhor as cardiopatias congênitas	15 100%	0 0%	0 0%	0 0%	15 100%
São um importante recurso pedagógico	15 100%	0 0%	0 0%	0 0%	15 100%
Aumentaram meu interesse no estudo das cardiopatias congênitas	15 100%	0 0%	0 0%	0 0%	15 100%
Permitem uma melhor conceitualização espacial e estrutural das doenças	15 100%	0 0%	0 0%	0 0%	15 100%
Úteis para a compreensão de doenças cardíacas mais complexas	15 100%	0 0%	0 0%	0 0%	15 100%

Figura 7 – Avaliação, por residentes, dos modelos de cardiopatias congênitas (CC) impressos em 3D desenvolvidos nesta pesquisa (n=15).

Essa estratégia possibilitou encontrar imagens de CIA, TOF, DSAV e TGA. As imagens selecionadas foram processadas para eliminar detalhes irrelevantes, enfatizando apenas as lesões de interesse didático.

As valvas cardíacas e seu aparato de suporte são marcos anatômicos importantes da morfologia cardíaca. Os folhetos, cordas tendíneas e músculos papilares são estruturas delicadas e em constante movimento, e a replicação dessa anatomia em 3D é um desafio, especialmente no desenvolvimento de modelos Imp3D financeiramente acessíveis. A ecocardiografia oferece visualização superior do aparelho valvar, mas a ausência de um formato de armazenamento padronizado e as dificuldades na conversão de arquivos para DICOM são fatores limitantes. Centros especializados são capazes de desenvolver valvas cardíacas 3D muito realistas usando abordagens híbridas combinando diferentes modalidades de imagem, ferramentas gráficas

de design digital e materiais de impressão flexíveis.²⁰⁻²² Em nossa pesquisa, não tivemos acesso a softwares comerciais de ecocardiografia. Considerando como os mapas topográficos 3D são produzidos a partir de imagens de satélite bidimensionais, utilizamos a técnica cartográfica Heightmap para converter arquivos de ecocardiografia 2D em STL, otimizá-los graficamente e integrar as valvas (anulo e folhetos) aos modelos.

Conceitos em cardiologia pediátrica são rotineiramente compartilhados por um grupo heterogêneo, incluindo estudantes, residentes, médicos, enfermeiros, fisioterapeutas, familiares e pacientes. A capacidade de visualização espacial se refere à capacidade cognitiva de compreender e manipular mentalmente objetos conceituais, entendendo a relação entre objetos no espaço. Nesse contexto, o aprimoramento da capacidade de visualização espacial oferece vantagens educacionais na compreensão da

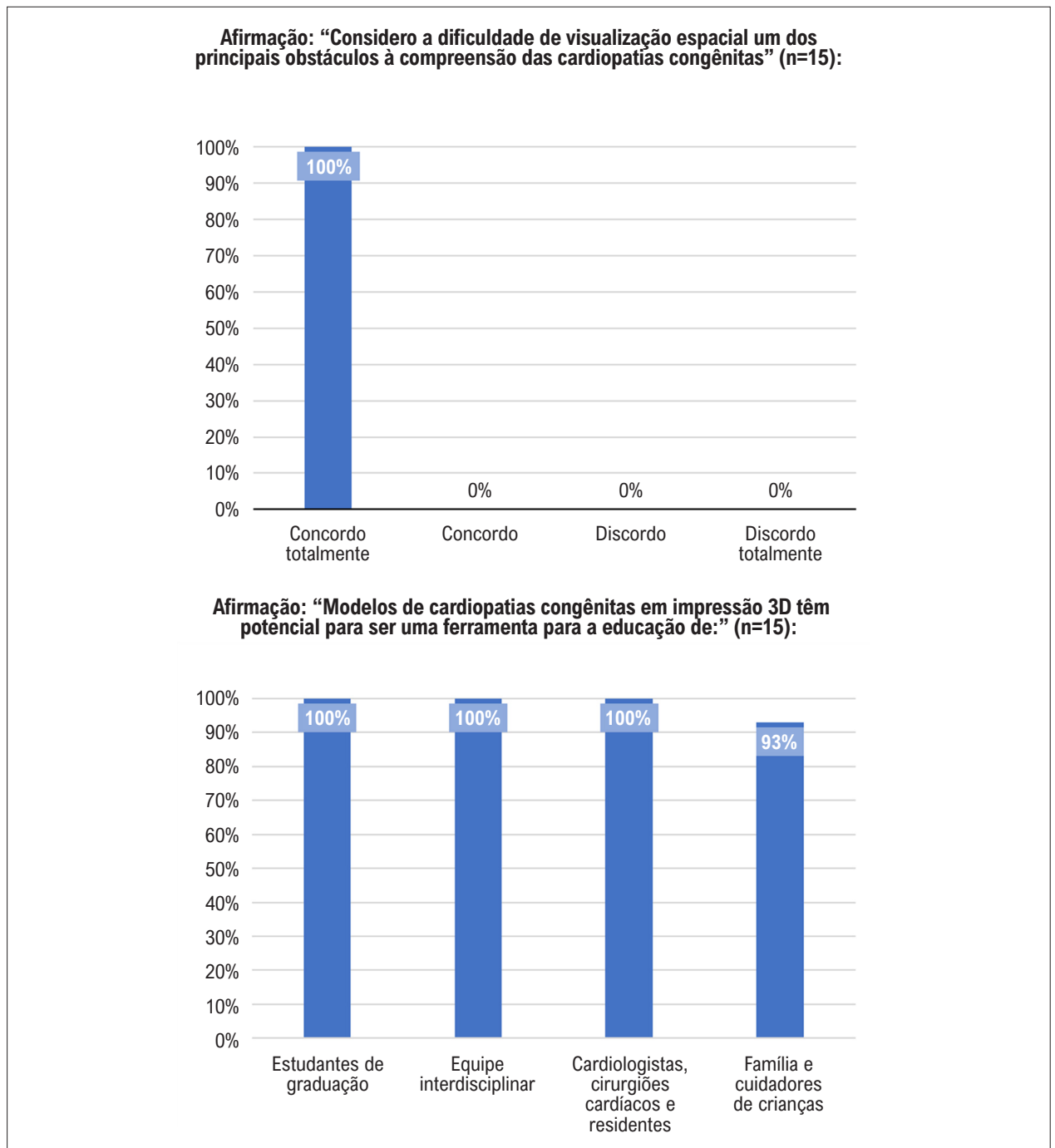


Figura 8 – As respostas dos residentes foram baseadas nas afirmações apresentadas. (n=15).

anatomia e no desenvolvimento de habilidades motoras.²³ Nosso estudo revelou que, para 100% dos entrevistados, “a dificuldade de visualização espacial é um dos principais obstáculos para a compreensão das cardiopatias congênitas.”

Devido à complexidade da anatomia das CC, os modelos 3D de CC são considerados como adjuvantes aos métodos de ensino tradicionais, pois são capazes de superar as limitações das representações 2D de estruturas 3D.

Em um ensaio clínico randomizado, Karsenty et al. demonstraram os benefícios educacionais do uso de modelos 3D de CC para o ensino. O grupo exposto aos modelos apresentou níveis superiores de conhecimento objetivo e satisfação em comparação ao grupo de controle. A possibilidade de compartilhar e manipular os modelos 3D influenciou positivamente as avaliações.²⁴ Su et al. demonstraram que os modelos 3D oferecem vantagens sobre

Artigo Original

outras ferramentas pedagógicas, pois fornecem informações espaciais e estruturais ricas e podem ser otimizados para fins educacionais. Os modelos 3D foram mais eficazes do que outras estratégias em termos de aquisição de conhecimento e conceitualização estrutural.²⁵ Para a coorte de Tarca et al., o grupo Imp3D apresentou um aumento significativo em termos de confiança subjetiva, conhecimento e pontuação no exame pós-intervenção. 92% dos participantes classificaram os modelos 3D como “muito úteis” ou “úteis” (classificação média de 4,7/5,0).²⁶ Em nosso contexto, 100% dos avaliadores residentes consideraram que os modelos de CC em Imp3D “são um importante recurso pedagógico”, “fáceis de manipular”, “aparentemente resistentes” e “capazes de motivar o estudo”.

As propriedades táteis dos modelos 3D podem oferecer uma avaliação positiva da experiência de aprendizagem. Lau e Sun compararam grupos de estudantes de medicina que participaram de uma sessão de ensino de 1,5 hora e tiveram acesso a materiais didáticos idênticos (diagramas 2D, modelos digitais 3D, imagens DICOM). Um grupo de intervenção utilizou modelos 3D de CC. Eles não apresentaram melhora estatisticamente significativa na aquisição de conhecimento sobre CC a curto e longo prazo (6 semanas depois), mas os estudantes indicaram que o método de ensino foi “interativo e interessante”, “fácil de entender”, “o conhecimento sobre cardiopatias congênicas melhorou” e “desempenhou um papel importante em ajudá-los a entender as cardiopatias congênicas”.²⁷ Em nosso estudo observamos respostas positivas dos residentes que interagiram com os modelos de CC em Imp3D ao afirmarem que os modelos “permitem uma melhor conceitualização espacial e estrutural” e são “úteis para a compreensão de doenças cardíacas mais complexas”.

Hessen et al. desenvolveram um programa de ensino inovador que inclui a Imp3D como ferramenta para o ensino de anatomia a estudantes de medicina. Alunos de medicina da graduação foram treinados para construir modelos 3D e/ou protótipos de realidade estendida. Perguntas qualitativas da pesquisa (pontuações mínimas e máximas de 1 a 5) indicaram que os alunos consideraram que os modelos anatômicos construídos “chamou minha atenção (4,4)”, eram “construídos de forma atraente (4,1)”, “fáceis de usar (4,0)”, “me estimulou a me envolver ativamente (4,7)”, “foram gratificantes de se trabalhar (4,2)”, “proporcionou satisfação (4,1)” e “me motivou a estudar anatomia (4,5)”.²⁸ Respostas semelhantes foram encontradas na avaliação de nossos residentes.

Biglino et al. avaliaram o potencial de modelos específicos para cada paciente na melhoria da compreensão dos pais durante as consultas. A análise do feedback revelou que os modelos 3DP eram rapidamente compreensíveis, estimulavam a curiosidade e podiam ser particularmente úteis. Os autores concluíram que esses modelos otimizavam a comunicação e impactavam positivamente a aceitação psicológica do tratamento.²⁹ Os mesmos pesquisadores avaliaram o efeito do uso de modelos 3DP de CC em consultas com adolescentes de 15 a 18 anos. Observou-se uma melhora significativa na confiança dos participantes em explicar sua própria condição ($p=0,008$), no nível de conhecimento sobre a doença ($p=0,005$) e na satisfação com a consulta ($p=0,005$).^{30,31}

Os avanços tecnológicos possibilitaram a incorporação do uso de realidade virtual (RV), realidade aumentada (RA), modelagem computacional e inteligência artificial (IA) na prática clínica de CC. Esses métodos complementam as técnicas de imagem padrão e proporcionam medicina personalizada. Ferramentas de visualização imersiva podem otimizar oportunidades educacionais, comunicação durante consultas, planejamento cirúrgico, tomada de decisões, projetos de fabricação de dispositivos, simulação computacional de fluidos e simulação dinâmica da circulação. Essas ferramentas também exigem computadores, headsets de RV, processos avançados de imagem médica e conhecimento especializado. Embora estática, a Imp3D oferece propriedades táteis e a possibilidade de armazenamento físico de peças a longo prazo, em um cenário de escassez de espécimes patológicos de CC. A engenharia de tecidos é um campo emergente que busca a promessa da bioimpressão 3D de estruturas vasculares, válvulas, coração, remendos de tecido, miocárdio e, em última instância, corações pulsantes.

Limitações e perspectivas futuras

Os protótipos foram fabricados utilizando uma impressora 3D desktop (doméstica) equipada com um único bico extrusor, permitindo o uso de apenas um tipo de filamento e cor por vez.

O filamento PLA foi escolhido por ser de fácil acesso, baixo custo e capaz de gerar modelos com características físicas satisfatórias para fins educacionais.

As valvas cardíacas foram representadas usando uma abordagem alternativa, não validada. Aceitamos essa representação bruta (apenas o anel e os folhetos) porque os modelos se destinavam exclusivamente a fins educacionais. No entanto, ela não seria adequada se o objetivo fosse a tomada de decisões clínicas ou o planejamento cirúrgico, onde a reprodução anatômica precisa dos músculos papilares e das cordas tendíneas é essencial.

Devido às características intrínsecas da residência médica, esse grupo de avaliadores tinha uma relação próxima com o pesquisador principal, o que pode ter influenciado a forma como o conjunto de modelos 3D foi analisado. No entanto, a avaliação da equipe de especialistas apresentou respostas convergentes que nos levam a crer na coerência das respostas dos residentes.

O trabalho transdisciplinar foi fundamental para este projeto. A experiência técnica adquirida abrirá caminho para um leque educativo mais amplo, que poderá incluir doenças não abordadas neste estudo.

Conclusão

O desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênicas em impressão 3D utilizando metodologia de de baixo custo é factível. Nesse trabalho descrevemos um processo de prototipagem utilizando softwares gratuitos, uma estratégia alternativa para a representação das valvas cardíacas, materiais de baixo custo e uma impressora 3D doméstica. Esse fluxo de trabalho pode ser reproduzido por qualquer pesquisador em ambientes com poucos recursos. Os modelos desenvolvidos estão disponíveis gratuitamente assim como a tese completa, para

download em [http://sites.google.com/view/3dpequenoscoracoes e http://cardiopedbrasil.com.br/pesquisa].

Contribuição dos autores

Concepção e desenho da pesquisa: Cajueiro FCM, Croti UA, Amorim Júnior RF, Godoy MF; Obtenção de dados: Cajueiro FCM, Croti UA, Cardoso MRR, Costa CH, De Marchi CH; Análise e interpretação dos dados: Cajueiro FCM, Croti UA, Amorim Júnior RF, Costa CH, Godoy MF; Análise estatística: Cajueiro FCM, Croti UA, Godoy MF; Obtenção de financiamento e Redação do manuscrito: Cajueiro FCM; Revisão crítica do manuscrito quanto ao conteúdo: Cajueiro FCM, Croti UA, De Marchi CH, Borim BC, Godoy MF, Freitas MB, Moscardini AC.

Potencial conflito de interesse

Não há conflito com o presente artigo

Fontes de financiamento

O presente estudo não teve fontes de financiamento externas.

Referências

- Langlois J, Bellemare C, Toulouse J, Wells GA. Spatial Abilities and Anatomy Knowledge Assessment: A Systematic Review. *Anat Sci Educ*. 2017;10(3):235-41. doi: 10.1002/ase.1655.
- Yoo SJ, Hussein N, Peel B, Coles J, van Arsdell GS, Honjo O, et al. 3D Modeling and Printing in Congenital Heart Surgery: Entering the Stage of Maturation. *Front Pediatr*. 2021;9:621672. doi: 10.3389/fped.2021.621672.
- Perens G, Chyu J, McHenry K, Yoshida T, Finn JP. Three-Dimensional Congenital Heart Models Created with Free Software and a Desktop Printer: Assessment of Accuracy, Technical Aspects, and Clinical Use. *World J Pediatr Congenit Heart Surg*. 2020;11(6):797-801. doi: 10.1177/2150135120952072.
- Liu Y, Chen S, Zühlke L, Black GC, Choy MK, Li N, et al. Global Birth Prevalence of Congenital Heart Defects 1970-2017: Updated Systematic Review and Meta-Analysis of 260 Studies. *Int J Epidemiol*. 2019;48(2):455-63. doi: 10.1093/ije/dyz009.
- Chepelev L, Wake N, Ryan J, Althobaity W, Gupta A, Arribas E, et al. Radiological Society of North America (RSNA) 3D Printing Special Interest Group (SIG): Guidelines for Medical 3D Printing and Appropriateness for Clinical Scenarios. *3D Print Med*. 2018;4(1):11. doi: 10.1186/s41205-018-0030-y.
- Hosny A, Shen T, Kuo AS, Long D, Andrawes MN, Dilley JD. Unlocking Vendor-Specific Tags: Three-Dimensional Printing of Echocardiographic Data Sets. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2018;155(1):143-5.e1. doi: 10.1016/j.jtcvs.2017.08.064.
- Antreas K, Piromalis D. Employing a Low-Cost Desktop 3D Printer: Challenges, and How to Overcome Them by Tuning Key Process Parameters. *Int J Mech Appl*. 2021;10(1):11-9. doi: 10.5923/j.mechanics.20211001.02.
- Bastawrous S, Wu L, Liacouras PC, Levin DB, Ahmed MT, Strzelecki B, et al. Establishing 3D Printing at the Point of Care: Basic Principles and Tools for Success. *Radiographics*. 2022;42(2):451-68. doi: 10.1148/rq.210113.
- Basso ML, Gebran AM, Oliveira JD, Gebran KM, Bonatto LC, Farah MCK. Three-Dimensional-Printed Heart Prototype for Application in Pediatric Cardiology: An Initial Experiment. *Arq Bras Cardiol*. 2021;116(3):507-9. doi: 10.36660/abc.20200086.
- Freitas MB, Figueiredo JL, Cajueiro FC, Lima RM, Freitas MH, Teixeira CM. Three-Dimensional Model Printing in Congenital Heart Disease. *Arq Bras Cardiol: Imagem Cardiovasc*. 2023;36(4):e20230065. doi: 10.36660/abcimg.20230065.
- Montanhesi PK, Coelho G, Curcio SAF, Poffo R. Three-Dimensional Printing in Minimally Invasive Cardiac Surgery: Optimizing Surgical Planning and Education with Life-Like Models. *Braz J Cardiovasc Surg*. 2022;37(1):110-17. doi: 10.21470/1678-9741-2020-0409.
- Smerling J, Marboe CC, Lefkowitz JH, Pavlicova M, Bacha E, Einstein AJ, et al. Utility of 3D Printed Cardiac Models for Medical Student Education in Congenital Heart Disease: Across a Spectrum of Disease Severity. *Pediatr Cardiol*. 2019;40(6):1258-65. doi: 10.1007/s00246-019-02146-8.
- Ghosh SK. Cadaveric Dissection as an Educational Tool for Anatomical Sciences in the 21st Century. *Anat Sci Educ*. 2017;10(3):286-99. doi: 10.1002/ase.1649.
- Iwanaga J, Loukas M, Dumont AS, Tubbs RS. A Review of Anatomy Education during and after the COVID-19 Pandemic: Revisiting Traditional and Modern Methods to Achieve Future Innovation. *Clin Anat*. 2021;34(1):108-14. doi: 10.1002/ca.23655.
- Gómez-Ciriza G, Gómez-Cía T, Rivas-González JA, Forte MNV, Valverde I. Affordable Three-Dimensional Printed Heart Models. *Front Cardiovasc Med*. 2021;8:642011. doi: 10.3389/fcvm.2021.642011.
- Sun Z. Patient-Specific 3D-Printed Models in Pediatric Congenital Heart Disease. *Children*. 2023;10(2):319. doi: 10.3390/children10020319.
- Grieshaber P, Schneller A, Fonseca-Escalante E, Farag M, Krey R, Czundel A, et al. A Low-Cost Workflow to Generate Virtual and Physical Three-Dimensional Models of Cardiac Structures. *World J Pediatr Congenit Heart Surg*. 2025;16(1):107-13. doi: 10.1177/21501351241293305.
- Wijnen N, Brouwers L, Jebbink EG, Heyligers JMM, Bemelman M. Comparison of Segmentation Software Packages for in-Hospital 3D Print Workflow. *J Med Imaging*. 2021;8(3):034004. doi: 10.1117/1.JMI.8.3.034004.
- Lee S, Squelch A, Sun Z. Quantitative Assessment of 3D Printed Model Accuracy in Delineating Congenital Heart Disease. *Biomolecules*. 2021;11(2):270. doi: 10.3390/biom11020270.

Vinculação acadêmica

Este artigo é parte de tese de doutorado de Francisco Candido Monteiro Cajueiro pelo Programa de Pós-graduação em Ciências da Saúde da Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto (FUNFARME/FAMERP).

Aprovação ética e consentimento informado

Este estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética da Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto sob o número de protocolo CAAE: 48575021.3.0000.5415. O consentimento informado foi obtido de todos os participantes incluídos no estudo.

Uso de Inteligência Artificial

Os autores não utilizaram ferramentas de inteligência artificial no desenvolvimento deste trabalho.

Disponibilidade de Dados

Os conteúdos subjacentes ao texto da pesquisa estão contidos no manuscrito.

Artigo Original

20. Tuncay V, van Ooijen PMA. 3D Printing for Heart Valve Disease: A Systematic Review. *Eur Radiol Exp*. 2019;3(1):9. doi: 10.1186/s41747-018-0083-0.
21. Bulbul Z, El Rassi I, Hamade R, Tamim H, Bitar F. Three-Dimensional Printing of Mitral Valve Models Using Echocardiographic Data Improves the Knowledge of Cardiology Fellow Physicians in Training. *Front Cardiovasc Med*. 2023;10:1307994. doi: 10.3389/fcvm.2023.1307994.
22. Gomez A, Gomez G, Simpson J, Valverde I. 3D Hybrid Printed Models in Complex Congenital Heart Disease: 3D Echocardiography and Cardiovascular Magnetic Resonance Imaging Fusion. *Eur Heart J*. 2020;41(43):4214. doi: 10.1093/eurheartj/ehaa654.
23. Gonzales RA, Ferns G, Vorstenbosch MATM, Smith CE. Does Spatial Awareness Training Affect Anatomy Learning in Medical Students? *Anat Sci Educ*. 2020;13(6):707-20. doi: 10.1002/ase.1949.
24. Karsenty C, Guitarte A, Dulac Y, Briot J, Hascoet S, Vincent R, et al. The Usefulness of 3D Printed Heart Models for Medical Student Education in Congenital Heart Disease. *BMC Med Educ*. 2021;21(1):480. doi: 10.1186/s12909-021-02917-z.
25. Su W, Xiao Y, He S, Huang P, Deng X. Three-Dimensional Printing Models in Congenital Heart Disease Education for Medical Students: A Controlled Comparative Study. *BMC Med Educ*. 2018;18(1):178. doi: 10.1186/s12909-018-1293-0.
26. Tarca A, Woo N, Bain S, Crouchley D, McNulty E, Yim D. 3D Printed Cardiac Models as an Adjunct to Traditional Teaching of Anatomy in Congenital Heart Disease-A Randomised Controlled Study. *Heart Lung Circ*. 2023;32(12):1443-50. doi: 10.1016/j.hlc.2023.09.021.
27. 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;23(1):22. doi: 10.31083/j.rcm.2301022.
28. Henssen D, Karstens J, De Jong G, Duits JD, Boer L, Brink M, et al. Implementing 3D Printing and Extended Reality in Anatomy Education: Organization, Evolution, and Assessment of an Innovative Teaching Program in an Undergraduate Medical School in the Netherlands. *Ann Anat*. 2025;257:152354. doi: 10.1016/j.aanat.2024.152354.
29. Biglino G, Capelli C, Wray J, Schievano S, Leaver LK, Khambadkone S, et al. 3D-Manufactured Patient-Specific Models of Congenital Heart Defects for Communication in Clinical Practice: Feasibility and Acceptability. *BMJ Open*. 2015;5(4):e007165. doi: 10.1136/bmjopen-2014-007165.
30. Biglino G, Koniordou D, Gasparini M, Capelli C, Leaver LK, Khambadkone S, et al. Piloting the Use of Patient-Specific Cardiac Models as a Novel Tool to Facilitate Communication during Clinical Consultations. *Pediatr Cardiol*. 2017;38(4):813-8. doi: 10.1007/s00246-017-1586-9.
31. Chessa M, Van De Bruaene A, Farooqi K, Valverde I, Jung C, Votta E, et al. Three-Dimensional Printing, Holograms, Computational Modelling, and Artificial Intelligence for Adult Congenital Heart Disease Care: An Exciting Future. *Eur Heart J*. 2022;43(28):2672-84. doi: 10.1093/eurheartj/ehac266.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da licença de atribuição pelo Creative Commons