



Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto
Programa de Pós-Graduação em Ciências da
Saúde

FRANCISCO CANDIDO MONTEIRO
CAJUEIRO

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE
CARDIOPATIAS CONGÊNITAS EM
IMPRESSÃO 3D: POTENCIAIS APLICAÇÕES
NO ENSINO DA CARDIOLOGIA E CIRURGIA
CARDIOVASCULAR PEDIÁTRICA

São José do Rio Preto
2024

Francisco Candido Monteiro Cajueiro

Desenvolvimento de modelos de cardiopatias
congênitas em impressão 3D: potenciais
aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia
cardiovascular pediátrica

Tese apresentada à Faculdade de
Medicina de São José do Rio Preto
para obtenção do Título de Doutor
no Curso de Pós-Graduação em
Ciências da Saúde.

Eixo Temático: Medicina e Ciências
Correlatas.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Alexandre Croti

São José do Rio Preto
2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESSE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Cajueiro, Francisco Candido Monteiro

Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D: potenciais aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica / Francisco Candido Monteiro Cajueiro

São José do Rio Preto, 2024.

144 p.

Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto – FAMERP

Eixo Temático: Medicina e Ciências Correlatas.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Alexandre Croti

1. Educação Médica; 2. Cardiologia Pediátrica; 3. Impressão 3D.

FRANCISCO CANDIDO MONTEIRO CAJUEIRO

Desenvolvimento de modelos de cardiopatias
congenitas em impressão 3D: potenciais
aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia
cardiovascular pediátrica

TESE APRESENTADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU
DE DOUTOR

BANCA EXAMINADORA

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Ulisses Alexandre Croti

1º Examinador: Prof. Dr. Moacir Fernandes de Godoy

2º Examinador: Prof. Dr. Carlos Henrique De Marchi

3º Examinador: Prof. Dr. Valdeste Cavalcante Pinto Jr

4º Examinador: Prof. Dr. Pedro Rafael Salerno

1º Suplente: Prof. Dr. Alexandre Noboru Murakami

2º Suplente: Prof. Dr. Airton Camacho Moscardini

São José do Rio Preto, 26/07/2024

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS	ii
EPÍGRAFE	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS.....	vii
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo.....	5
2. CASUÍSTICA E MÉTODO.....	6
2.1 A CardioPedBrasil®.....	6
2.2 Características metodológicas.....	8
2.3 Seleção das cardiopatias congênitas	9
2.4 Seleção dos casos no acervo de imagens da CardioPedBrasil®.....	10
2.5 Protocolos de aquisição de imagens da CardioPedBrasil®.....	10
2.5.1 Ecocardiografia transtorácica	10
2.5.2 Angiotomografia cardiovascular	11
2.6 Racional da conversão 2D – 3D.....	12
2.7 Segmentação – <i>software InVesalius® 3.1</i>	15
2.8 Otimização do design 3D – <i>software Autodesk®Meshmixer™ 3.5.474</i>	17
2.9 As valvas cardíacas.....	19
2.10 Preparação do arquivo para impressão – <i>software PrusaSlicer® 2.4.2</i>	21
2.11 Impressão 3D – impressora <i>Creality® Ender3™</i>	24
2.12 Etapa pós impressão.....	26
2.13 Equipe de especialistas e instrumento de avaliação	27
2.14 Protótipos finais e proposta de box educacional	33
2.15 Aspectos éticos	35
3. RESULTADOS	36
3.1 Modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D	36
3.2 Avaliação dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D pela equipe de especialistas.	50
3.2.1 Caracterização dos avaliadores	50

3.2.2 Avaliação individual dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D	53
3.2.3 Avaliação global dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D	55
3.2.4 Potenciais utilizações dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D no ensino da cardiologia pediátrica.....	56
3.2.5 Percepções sobre o conjunto de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D	58
4. DISCUSSÃO	60
4.1 Modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D	60
4.2 Caracterização dos avaliadores	73
4.3 Potenciais aplicações dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica	75
4.4 Limitações	88
4.5 Perspectivas futuras	92
4.6 Considerações finais	93
5. CONCLUSÃO.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese **às crianças.**

Vocês são **a esperança.**

Motu Perpetuo **Cordis**

AGRADECIMENTOS

Ao **Prof. Dr. Ulisses Alexandre Croti**, meu mestre e exemplo.

A todos que fazem parte da **CardioPedBrasil®**, por ressignificar as palavras “lar” e “família”.

Aos profissionais que compuseram a equipe transdisciplinar que possibilitou o fluxo de trabalho para a execução da tese: **Dra. Mariana Ribeiro Rodero Cardoso** (radiologista cardiopediátrica), **Dr. Raimundo Francisco Amorim Júnior** (cardiologista pediátrico), **Carlos Henrique Costa** (biomédico especialista em diagnóstico por imagem), **Lilian Mai Sant’Ana** (biomédica com conhecimentos em impressão 3D e realidade aumentada), **Ricardo Gameiro Lopes Milhim** (designer gráfico) e **Alessandro Zaguini Queiroz** (engenheiro da computação e gestor no setor de impressão 3D).

À pós-graduação da Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto (FUNFARME/FAMERP) representada pelo secretário **Luis Henrique Ferreira**.

Pela vida, em todas as suas nuances:

Maria de Fatima Monteiro

Francisco Candido Vieira Cajueiro

Dafne Barcala Coutinho do Amaral Gomez

Felipe Barcala Monteiro do Amaral Cajueiro

“Educação não transforma o mundo. Educação muda pessoas.

Pessoas transformam o mundo.”

(Paulo Freire)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Setor de Radiologia Pediátrica do Hospital da Criança e Maternidade de São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil. 2022.....	7
Figura 2.	Visibilização em tela plana de exames de imagem e correlação com ilusão de ótica em papel.....	13
Figura 3.	Contribuição de uma matriz de <i>pixels</i> na formação de uma imagem bidimensional (x,y) e de uma matriz de <i>voxels</i> na formação uma representação volumétrica (x,y,z).....	14
Figura 4.	Processo de segmentação utilizando o <i>software InVesalius® 3.1.</i> em caso de CATTVVPP infracardíaca. Definição das áreas de interesse e extração geométrica simultânea nos cortes angiotomográficos axial, coronal e sagital (x,y,z).....	15
Figura 5.	Processo de design digital utilizando o <i>software Autodesk® Meshmixer™ versão 3.5.474</i> em caso de SCEH	17
Figura 6.	Método alternativo para modelagem tridimensional das valvas cardíacas.....	19
Figura 7.	Processo de fatiamento (<i>slicing</i>) utilizando o <i>software PrusaSlicer® versão 2.4.2</i> em caso de <i>Truncus Arteriosus</i>	21
Figura 8.	Processo de manufatura aditiva pela fusão de filamento termoplástico	24
Figura 9.	Impressão 3D e etapa pós-impressão.....	26
Figura 10.	Avaliação dos modelos de CC em imp3D pela equipe de especialistas	28
Figura 11.	Fragmento do questionário sobre a avaliação individual das características anatômicas dos modelos de CC em imp3D	29
Figura 12.	Avaliação global dos atributos referentes ao conjunto de modelos de CC em imp3D	30
Figura 13.	Questão sobre a avaliação do potencial educacional dos modelos de CC em imp3D para diferentes grupos.....	31
Figura 14.	Conjunto de protótipos de CC em imp3D inseridos no mini estúdio de fotografia <i>Sagaro® Photo Light Box 64 Leds</i> com fundo em cor azul escuro.....	33
Figura 15.	Proposta de box educacional com o conjunto de modelos de CC em	

imp3D identificados e acondicionados em caixa de madeira com 12 divisórias	34
Figura 16. Modelo de CIV de via de saída, perimembranosa, com PCA	36
Figura 17. Modelo de CIA <i>ostium</i> secundum com PCA	38
Figura 18. Modelo de T4F com estenose pulmonar infundíbulo-valvar	39
Figura 19. Modelo de TGA com PCA.....	40
Figura 20. Modelo de DSAVT tipo A de <i>Rastelli</i>	41
Figura 21. Modelo de CoAo com PCA	42
Figura 22. Modelo de SCEH	43
Figura 23. Modelo de AT tipo 1C.....	44
Figura 24. Modelo de AP com CIV tipo A de <i>Barbero-Marcial</i>	45
Figura 25. Modelo de CATVVPP infracardiaca	46
Figura 26. Modelo de <i>Truncus Arteriosus</i> tipo 1 de <i>Collet-Edwards</i>	47
Figura 27. Modelo de IAAo tipo C de <i>Celoria-Patton</i>	48
Figura 28. Tempo dispendido (mínimo e máximo) nas principais etapas do fluxo de trabalho para o desenvolvimento dos modelos de CC em imp3D.....	49
Figura 29. Distribuição da equipe de avaliadores por especialidade médica	50
Figura 30. Nível de conhecimento prévio da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre a utilização da impressão 3D na área médica	51
Figura 31. Opinião da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre a afirmativa: “A dificuldade de visualização espacial é um dos principais obstáculos para a compreensão das cardiopatias congêntas”	51
Figura 32. Opinião da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre a afirmativa: “Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a ... (doença)”	53
Figura 33. Avaliação global dos modelos de CC em imp3D pela equipe de especialistas em cardiopediatria	55
Figura 34. Opinião da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre a afirmativa: “Os modelos impressos em 3D são capazes de motivar o estudo das cardiopatias congêntas”	56
Figura 35. Opinião da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre os potenciais grupos beneficiados educacionalmente com a utilização de	

	modelos de CC em imp3D.....	57
Figura 36.	Expressões da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre o conjunto de modelos de CC em imp3D.....	58
Figura 37.	Etapas do processo de prototipagem 3D empregados na pesquisa “Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D: potenciais aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica”.....	61
Figura 38.	Caracterização dos modelos de CC em imp3D desenvolvidos na pesquisa “Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D: potenciais aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica”	68
Figura 39.	Conjunto de modelos de CC em imp3D desenvolvidos na pesquisa “Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D: potenciais aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

©	Copyright
®	Marca registrada
%	por cento
°C	grau (s) Celsius
™	Trademark
€	euro (s)
2D	bidimensional
3D	tridimensional
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
angioTC	angiotomografia
AP	Atresia Pulmonar
AT	Atresia Tricúspide
CAAE	Certificado de Apresentação de Apreciação Ética
CATVPP	Conexão Anômala Total de Veias Pulmonares
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CC	cardiopatias congênitas
CIA	Comunicação Interatrial
CIV	Comunicação Interventricular
cm	centímetro (s)
CoAo	Coarctação de Aorta
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DOCX	Microsoft Word® para Microsoft 365 MSO versão 2207
DSAV	Defeito do Septo Atrioventricular
ECO	ecocardiografia
ECOTT	ecocardiografia transtorácica
ECOTE	ecocardiografia transesofágica
EP	Estenose Pulmonar
ex:	exemplo (s)

FAMERP	Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto
FDM	Fused Deposition Modeling
FUNFARME	Fundação Faculdade Regional de Medicina de São José do Rio Preto
g	grama (s)
GCODE	Código G
GUCH	Grown-up Congenital Heart Disease
h	hora (s)
HCM	Hospital da Criança e Maternidade de São José do Rio Preto
ISNPCHD	International Society for Nomenclature of Paediatric and Congenital Heart Disease
JPEG	Joint Photographic Experts Group
kg	quilograma (s)
m	metro (s)
mg	miligrama (s)
min	minuto (s)
mL	mililitro (s)
OBJ	Object File Wavefront
PACS	Picture Archiving and Communication Systems
PCA	Persistência do Canal Arterial
PLA	Polylactic Acid
RSNA	Radiological Society of North America
s	segundo (s)
SCEH	Síndrome do Coração Esquerdo Hipoplásico
SIG	Special Interest Group
STAT	Society of Thoracic Surgeons-European Association for Cardio-Thoracic Surgery
STL	Standard Triangle Language
T4F	Tetralogia de <i>Fallot</i>
TC	tomografia computadorizada
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
TGA	Transposição de Grandes Artérias

UTICardioPed	Unidade de Terapia Intensiva em Cardiologia Pediátrica
RNM	ressonância nuclear magnética

RESUMO

Introdução: As cardiopatias congênitas são condições que demandam profundo conhecimento anatômico. Os métodos tradicionais de ensino são limitados a representações da anatomia em superfícies planas e a maioria dos centros não dispõem de um acervo de espécimes patológicos. A capacidade de criar protótipos físicos a partir de exames de imagem tornou a impressão 3D uma ferramenta adjuvante para o ensino das cardiopatias congênitas. **Objetivo:**

Desenvolver um conjunto de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D representativos das doenças mais frequentes que acometem o coração das crianças e identificar potenciais grupos a serem beneficiados educacionalmente.

Material e Método: O processo de prototipagem a partir de exames de angiotomografia cardíaca seguiu as etapas de aquisição de imagens, segmentação das áreas de interesse, design digital, fatiamento, impressão 3D e pós-impressão. Estruturas valvares, quando essenciais ao entendimento da doença representada, foram criadas a partir de dados ecocardiográficos e digitalmente inseridas na estrutura do protótipo. Os modelos impressos foram avaliados por uma equipe de 26 especialistas. Utilizou-se estratégia metodológica financeiramente acessível com o auxílio de *softwares* gratuitos, impressora 3D e insumos de baixo custo. **Resultados:** Foram desenvolvidos 12 modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D: comunicação interventricular com persistência do canal arterial, comunicação interatrial, tetralogia de *Fallot*, transposição de grandes artérias, defeito do septo atrioventricular total, 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 especialistas concordaram totalmente ou parcialmente que os protótipos foram “visualmente agradáveis”, fáceis de manipular” e “aparentemente resistentes” enquanto 92% referiram que os modelos foram “fidedignos à anatomia da doença”. Noventa e seis por cento concordaram totalmente que os “modelos impressos em 3D são capazes de motivar o estudo das cardiopatias congênitas”. Para os avaliadores, os modelos em impressão 3D podem ser uma ferramenta adjuvante na educação e ensino de “cardiologistas e cirurgões cardiovasculares” (100%), “profissionais da equipe interdisciplinar” (96%), “familiares e responsáveis pelas crianças” (92%) e “estudantes de graduação em saúde” (81%). **Conclusão:** O desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D é factível e potencialmente útil para o ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica a diferentes grupos educacionais.

Palavras-chave: Impressão Tridimensional; Cardiopatias Congênitas; Educação Médica; Educação em Saúde; Práticas Interdisciplinares; Tecnologia em Saúde.

ABSTRACT

Introduction: Congenital heart diseases require in-depth anatomic understanding. Traditional teaching methods are limited to anatomical representations on flat surfaces and access to pathological specimens is limited in most centers. 3D printing is a promising tool in congenital heart diseases education by creating physical prototypes from imaging data. This study aimed to develop a set of 3D-printed congenital heart diseases models and identify potential educationally benefited groups. **Methods:** Data derived from cardiac computed tomography was used following the steps of image acquisition, segmentation, digital design, slicing, 3D printing, and post-printing. Essential valvar structures were created from echocardiographic data and digitally inserted into the prototypes. 3D-printed models were evaluated by an expert team of 26 specialists. A low-cost workflow based on the use of free software's, a desktop 3D printer and low-cost materials were used. **Results:** Twelve 3D-printed 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 evaluators completely or partially agreed that the prototypes were "visually enjoyable", "easy to manipulate" and "apparently resistant" while 92% agreed that the models were "anatomically accurate". 96% completely agreed that "3D-printed congenital heart disease models can motivate the study of congenital heart diseases". The experts reported that the physical models can be a valuable educational tool for "cardiologists and surgeons" (100%), "interdisciplinary teams" (96%), "children's caregivers" (92%), and "undergraduate students" (81%). **Conclusion:** The development of 3D-printed congenital heart diseases models is feasible and potentially useful for pediatric cardiology and cardiovascular surgery teaching to different educational groups.

Keywords: Three-Dimensional Printing; Congenital Heart Disease; Medical Education; Health Education; Interdisciplinary Practices; Health Technology.

1. INTRODUÇÃO

As cardiopatias congênitas (CC) são as malformações mais frequentes ao nascimento, afetando aproximadamente um em cada cem nascidos vivos. A maior parte das causas que levam a essas malformações ainda é desconhecida. Sua prevalência é praticamente estável entre as populações, o que acarreta sobrecarga aos sistemas de saúde particularmente nos países de baixa renda com altas taxas de fertilidade.⁽¹⁾

Setenta por cento das crianças nascidas com doença cardíaca precisarão de tratamento durante o primeiro ano de vida, porém, mais de 90% dos nascidos em países de baixa renda não terão acesso ao sistema de saúde ou receberão apenas terapias subótimas.⁽²⁾

No Brasil, a distribuição dos centros especializados em cardiologia pediátrica é heterogênea. De forma geral, o país é capaz de atender apenas 27,6% de sua demanda populacional em cirurgia cardiovascular pediátrica. O déficit na disponibilidade de serviços em cardiopediatria é de 59,5% na Região Sul, 67,1% na Região Nordeste; 71,2% na Região Centro-Oeste; 77,2% na Região Sudeste e 89,6% na Região Norte.⁽³⁾

Investimentos que se disponham a mudar esta realidade devem ser dirigidos, entre outras ações, a programas de treinamento, qualificação de recursos humanos e educação interdisciplinar.⁽⁴⁾

O avanço tecnológico, o desenvolvimento das técnicas de processamento digital e os investimentos em pesquisas clínicas possibilitaram a utilização da impressão 3D (imp3D) em diversas especialidades médicas.⁽⁵⁾ Na cardiologia pediátrica, o interesse sobre as aplicações da imp3D no estudo

e planejamento terapêutico das cardiopatias congênitas é crescente e refletido no crescimento exponencial de publicações sobre o tema, a partir de 2010.^(6,7)

A capacidade de criar protótipos físicos a partir de exames de imagem como a ecocardiografia (ECO), tomografia computadorizada (TC) e ressonância nuclear magnética (RNM) tornaram a imp3D uma ferramenta importante no auxílio a tomada de decisão clínica, desenvolvimento de dispositivos médicos, produção de tecidos, planejamento perioperatório, treinamento de habilidades e na criação de modelos educacionais direcionados ao ensino de profissionais de saúde, estudantes, pacientes e familiares.^(8,9)

A cardiologia e a cirurgia cardiovascular pediátrica são especialidades que exigem profundo conhecimento anatômico. Cada defeito cardíaco congênito possui ampla morfologia e, segundo o Código Internacional de Cardiopatias Congênitas e Pediátricas (IPCCC) de 2022, o número de diagnósticos e variantes pode chegar a 367.⁽¹⁰⁾ Particularmente nas lesões mais complexas, a habilidade de recriar representações mentais em três dimensões é essencial para a compreensão das CC.⁽¹¹⁾

A Pirâmide da Aprendizagem é um conceito criado pelo psiquiatra americano *William Glasser* que, em sua teoria, relaciona o grau de retenção de informações em uma sessão educacional ao método utilizado. A teoria afirma que podemos alcançar um maior nível de aprendizagem ao utilizar estratégias pedagógicas que estimulem a participação do aluno e a estimulação simultânea de diferentes sentidos.^(12,13) Esse conceito foi a base para inovações em educação e o desenvolvimento de metodologias ativas de ensino-aprendizagem.^(14,15)

A educação envolve a reestruturação cognitiva de esquemas mentais e necessita de adaptabilidade para o processamento de informações.⁽¹⁶⁾ Diferentes estímulos sensoriais são conduzidos ao córtex por diferentes conjuntos de populações neuronais. A ativação concomitante, porém, de vias tácteis e visuais, é capaz de recrutar áreas integradoras do complexo do movimento humano (Hmt+/V5) localizada na região lateral do córtex occipital, dentro da divisão posterior do sulco temporal inferior.⁽¹⁷⁾ Em qualquer atividade educacional, a estimulação simultânea de diferentes sentidos é capaz de potencializar a ativação sináptica e a formação de novas vias neurais.⁽¹⁸⁾

Independentemente do tipo de recurso pedagógico empregado, os métodos tradicionais de ensino das CC são limitados às representações da anatomia em uma superfície plana. Sejam livros-texto, diagramas, radiografias, ECO, cateterismos ou projeções de renderizações volumétricas adquiridas de exames de TC e RNM; quando apresentados em uma tela ou monitor, todos, em última instância, representam o coração em dois planos.⁽¹⁹⁾

Embora a dissecação e o estudo de espécimes patológicos tenham permanecido durante séculos como o padrão-ouro do ensino anatômico, existem limitações de cunho ético, legal, religioso, social e econômico para a manutenção desta prática.⁽²⁰⁾ De fato, na maior parte dos serviços do mundo, a observação direta de espécimes durante o ato cirúrgico, autópsia ou laboratório de patologia é limitada ou não está disponível.⁽²¹⁾

Em concordância com os princípios modernos para a educação em saúde, os currículos das escolas médicas vêm incorporando o uso de novas ferramentas em anatomia como adjuvantes ao ensino cadavérico.⁽²²⁾ As

estratégias educacionais que utilizam modelos físicos são superiores às estratégias do ensino tradicional nos desfechos aquisição de conhecimento espacial e retenção de conhecimento a longo prazo, mostrando-se acessíveis e efetivas.⁽²³⁾

Asif *et al.* em revisão sistemática envolvendo os termos “*paediatrics*”, “*education*”, “*training*” e “*3D printing*” evidenciaram que, ao utilizar modelos de CC em imp3D durante as atividades educacionais, estudantes de medicina, residentes e *staff* médico obtiveram melhores escores de conhecimento, rapidez na identificação de marcos anatômicos e autoconfiança no entendimento de conceitos quando comparados com o uso de diagramas, palestras, vídeos ou sessões clínicas⁽²⁴⁾.

Em centros de excelência, programas sólidos de imp3D em cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica relatam a aplicabilidade das réplicas de CC como recurso educacional.⁽²⁵⁻²⁷⁾ As propriedades tácteis dos modelos impressos em 3D são capazes de prover percepção realística, otimizar o entendimento das CC e facilitar a comunicação com pacientes e familiares.⁽²⁸⁾

É descrita a plausibilidade da imp3D de modelos CC de baixo custo capazes de atingir um alto padrão de qualidade para o uso na prática clínica.^(29,30) No Brasil, existem iniciativas referentes à prototipagem para o planejamento de cirurgias cardiovasculares, no ensino da ecocardiografia pediátrica, da cardiologia fetal e no estudo morfológico das doenças.⁽³¹⁻³⁶⁾

1.1 Objetivo

Desenvolver um conjunto de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D representativos das doenças mais frequentes que acometem o coração das crianças, avaliá-los e identificar potenciais grupos educacionalmente beneficiados com a utilização dos modelos.

2. CASUÍSTICA E MÉTODO

2.1 A CardioPedBrasil®

Criada inicialmente como Serviço de Cardiologia e Cirurgia Cardiovascular Pediátrica, em 2002, a CardioPedBrasil® – Centro do Coração da Criança do Hospital da Criança e Maternidade de São José do Rio Preto (HCM), no estado de São Paulo, faz parte do complexo Fundação Faculdade Regional de Medicina de Rio Preto (FUNFARME) / Faculdade Regional de Medicina de São José do Rio Preto (FAMERP).

A CardioPedBrasil® é um centro de referência nacional dedicado ao ensino, pesquisa e assistência de alta complexidade na área de cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica. Liderada pelo Prof. Dr. Ulisses Alexandre Croti, o serviço realizou, em 20 anos, mais de 6000 operações cardiovasculares pediátricas. Possui equipe transdisciplinar com cerca de 200 colaboradores integralmente dedicados à assistência humanizada às crianças com doenças cardiovasculares.

A cardiologia e ecocardiografia pediátrica da CardioPedBrasil® são lideradas pelo Prof. Dr. Carlos Henrique De Marchi e contam com quatro ecocardiógrafos Phillips® (EPIC CVx®, Affiniti®, HD15® e CX50®). São realizados por ano aproximadamente 6000 exames que incluem a ecocardiografia transtorácica (ECOTT), ecocardiografia fetal e ecocardiografia transesofágica (ECOTE).

Coordenado inicialmente (de 1997 a 2020) pelo Prof. Dr. Moacir Fernandes de Godoy e, atualmente, sob a liderança do Dr. André Luis de Andrade Bodini, o departamento de hemodinâmica e cardiologia

intervencionista pediátrica da CardioPedBrasil® dispõe do aparelho Phillips Azurion 7® e realiza em média 200 cateterismos infantis por ano, sendo cerca de 45% diagnósticos e 55% associados à intervenções.

A radiologia pediátrica do HCM conta com o tomógrafo Toshiba Aquilion® de 64 canais/128 cortes e realiza mais de 8500 exames de imagem por ano (Figura 1). Do total, cerca de 500 tomografias por mês são realizadas em crianças, em espaço físico apropriado ao atendimento pediátrico. Os exames são acompanhados pelo serviço de anestesia quando há necessidade de sedação e ou infusão de meio de contraste. É protocolar a assinatura do termo de consentimento informado pelo representante legal da criança.

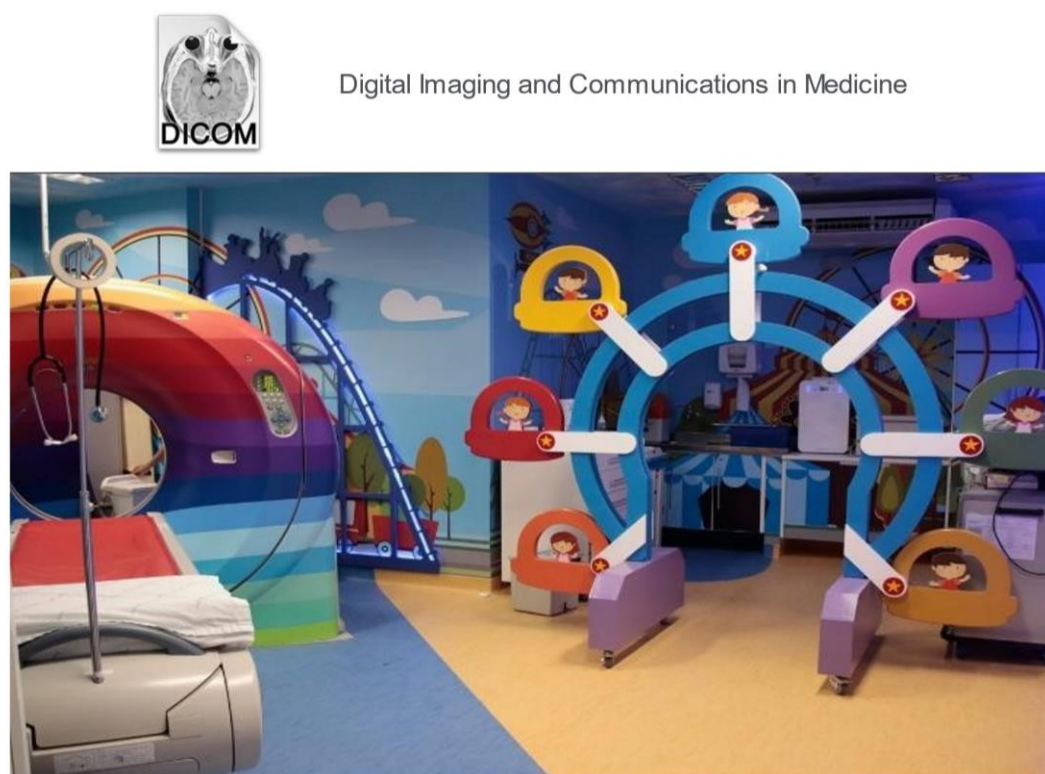


Figura 1. Setor de Radiologia Pediátrica do Hospital da Criança e Maternidade de São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil. 2022. DICOM: Extensão *Digital Imaging and Communications in Medicine*; Extensão DICOM: formato de arquivo gerado durante a aquisição de imagens em tomografia computadorizada ou ressonância nuclear magnética.

2.2 Características metodológicas

A pesquisa foi desenvolvida em duas fases. A primeira, referente ao desenvolvimento dos modelos de cardiopatias congênitas em imp3D. A segunda, de avaliação das peças por uma equipe de especialistas, consistiu em estudo de campo, observacional, de natureza descritiva, temporalmente transversal e de característica intrínseca quanti-qualitativa aferida com o auxílio de questionário estruturado criado para essa pesquisa.

2.3 Seleção das cardiopatias congênitas

Considerando-se a prevalência global dos defeitos cardíacos congênitos e a disponibilidade dos exames complementares no acervo de imagens da Instituição, foram selecionadas as seguintes doenças como base para a criação dos modelos educacionais (expressas em número de casos por 1000 nascidos vivos e IC95%):⁽³⁷⁾

- Comunicação interventricular (CIV) – (3,071; IC95% 2,845–3,305);
- Comunicação interatrial (CIA) – (1,441; IC95% 1,215–1,687);
- Persistência do canal arterial (PCA) – (1,004; IC95% 0,803–1,228);
- Tetralogia de *Fallot* (T4F) – (0,356; IC95% 0,326–0,387);
- Transposição de grandes artérias (TGA) – (0,295; IC95% 0,269–0,322);
- Defeito do septo atrioventricular (DSAV) – (0,290; IC95% 0,265–0,316);
- Coarctação de Aorta (CoAo) – (0,287; IC95% 0,261–0,314);
- Síndrome do coração esquerdo hipoplásico (SCEH) – (0,178; IC95% 0,162–0,195);
- Atresia tricúspide (AT) – (0,093; IC95% 0,080–0,108);
- Atresia pulmonar (AP) – (0,098; IC95% 0,085–0,112);
- Conexão anômala total de veias pulmonares (CATVVPP) – (0,083 IC95% 0,071–0,095);
- *Truncus Arteriosus* (0,078 IC95% 0,067–0,089);
- Interrupção de arco aórtico (IAAo) – (0,041 IC95% 0,032–0,051).

2.4 Seleção dos casos no acervo de imagens da CardioPedBrasil®

Foram prospectados do acervo e do prontuário eletrônico da CardioPedBrasil® exames de ECOTT e angiotomografia (angioTC) cardíaca de crianças menores de dois anos portadoras de CC que foram submetidas à investigação por indicação médica. A escolha dos casos foi realizada em conjunto com o departamento de radiologia cardiovascular pediátrica da CardioPedBrasil®. A seleção considerou a melhor qualidade técnica de aquisição das imagens para garantir alta performance nas etapas de prototipagem 3D.

2.5 Protocolos de aquisição de imagens da CardioPedBrasil®

2.5.1 Ecocardiografia transtorácica

Imagens de ECOTT bidimensional (2D) com o transdutor setorial Philips®S8–3™ foram utilizadas para modelagem 3D das estruturas valvares.

No defeito do septo atrioventricular total (DSAVT) a valva atrioventricular foi visibilizada em posição fechada no corte subcostal ao final da sístole ventricular.

No *Truncus Arteriosus* a valva truncal foi visibilizada em posição fechada no corte paraesternal eixo curto ao final da diástole ventricular.

Os exames foram acessados no sistema PACS (*Picture Archiving and Communication Systems*) da Instituição e os *frames* escolhidos para processamento foram exportados pelo *software AGFA Healthcare® 8.1.2 SP3 HF5* em formato *Joint Photographic Experts Group* (JPEG).

2.5.2 Angiotomografia cardiovascular

Imagens de angioTC com protocolo específico para aquisição de imagens cardiovasculares foram selecionadas para modelagem 3D das estruturas intracardíacas não valvares e estruturas extracardíacas.

Conforme o protocolo do Serviço, as etapas de aquisição de imagens de angioTC cardiovascular pediátrica foram:

1 – *scout*; 2 – fase pré-contraste (apenas em crianças submetidas à cirurgias prévias caso contrário não é realizada visando redução da dose da radiação); 3 – fase de pré-monitoramento; 4 – infusão de contraste iodado intravenoso (*Guerbet–Henetix*® 350mg/ml) 1,5 a 2,0 ml/kg em membro superior direito por bomba de injeção específica (*Guerbet*® *CT*™) na velocidade de 2 a 3 ml/s; 5 – fase de monitoramento (acompanhada por aquisições sequenciais em intervalos de um segundo até a chegada do contraste na veia cava superior/átrio direito); 6 – fase arterial (tensão de 80 quilovolts, corrente de operação de 120 miliamperes–segundo, protocolo axial, rotação do tubo 360 graus em 0,5 segundos, *pitch* 1,375, espessura de corte de 2,5 mm e reconstrução volumétrica 0,625/0,312); 7 – fase de retorno venoso precoce (realizada três a seis segundos, após a fase arterial); 8 – fase de retorno tardia (realizada três a cinco minutos, após a fase de retorno, em pacientes com circulação de *Fontan*).

Os exames foram acessados no sistema PACS e exportados pelo software *AGFA Healthcare*® 8.1.2 SP3 HF5 em formato DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*).

2.6 Racional da conversão 2D – 3D

A captação de imagens na TC se dá pela aquisição sequencial de múltiplas seções transversais radiológicas do objeto em estudo. O conjunto de dados capturados para formação da imagem consiste em uma matriz composta por milhões de *pixels* (*picture elements* – mínimo elemento de imagem, pictórico, isotrópico) agrupados. Essa matriz formada por *pixels* contém informações referentes aos eixos cartesianos ortogonais “x” e “y” formando imagens 2D.

As reconstruções volumétricas tridimensionais (3D) provenientes de exames como TC e RNM visibilizados em tela plana são, na verdade, representações visuais trabalhadas por algoritmos matemáticos que, utilizando técnicas automáticas de sombreamento, promovem ao observador a sensação de profundidade.⁽³⁸⁾

Essas ilusões de ótica entregam ao indivíduo a percepção espacial, mas carecem de um conjunto de dados adequados para a continuidade do processo de prototipagem (Figura 2).

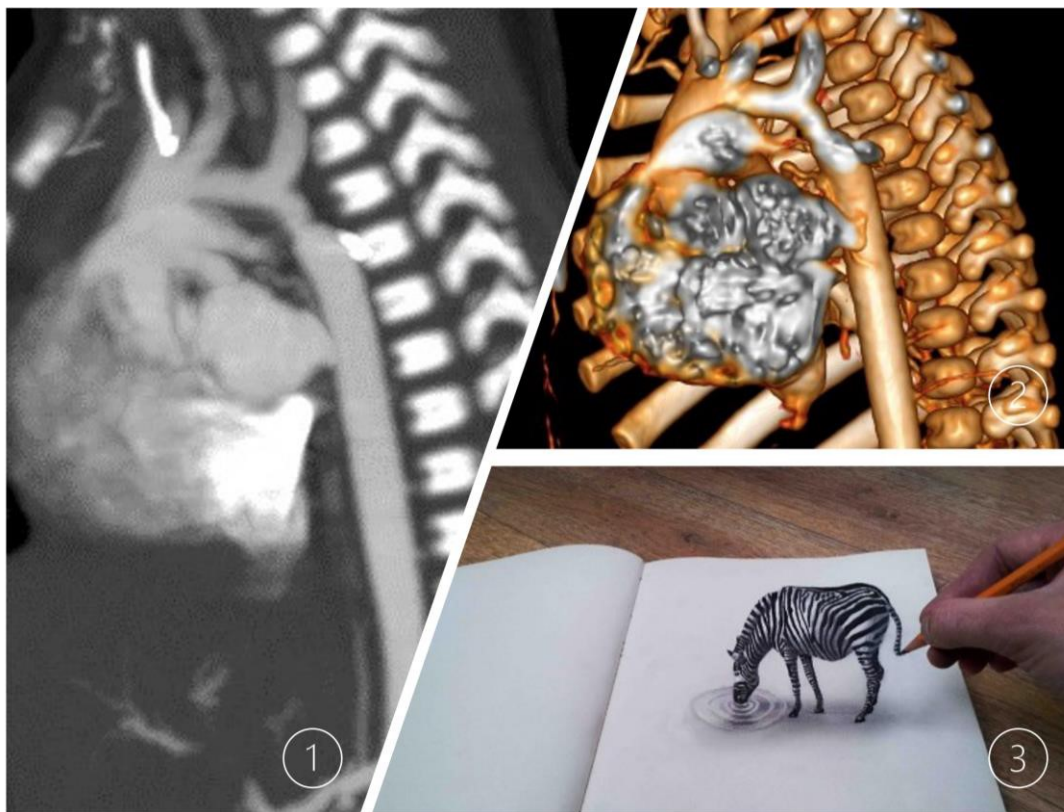


Figura 2. Visibilização em tela plana de exames de imagem e correlação com ilusão de ótica em papel; 1 e 2: Acervo CardioPedBrasil®; 3: Obra intitulada “Chapter Z” do artista gráfico *Ramon Bruin*.*

Para fim de modelagem 3D é necessário obter, a partir de um *pool* de imagens, uma matriz composta por elementos de volume chamados *voxels* (*volume pixels*), que nada mais são que os *pixels* que compõem a imagem planar (“x”, “y”) com a adição do terceiro eixo cartesiano ortogonal (de profundidade – “z”).

Uma matriz formada por milhões de *voxels* (mínimo elemento de volume, pictórico, isotrópico) possui então, informações referentes aos três planos cartesianos ortogonais “x”, “y” e “z” que, quando agrupados, são capazes de formar representações verdadeiramente 3D (Figura 3).

* RamonBruin. Chapter Z. In: Deviantart [Internet]. 26 nov. 2013. [acesso em 16 fev. 2023]. Disponível em: <https://www.deviantart.com/ramonbruin/art/Chapter-Z-416120678>.

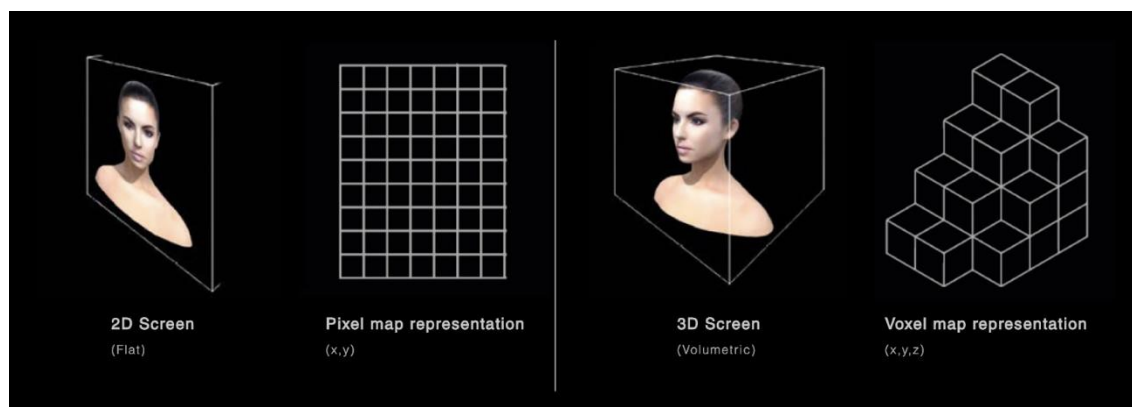


Figura 3. Contribuição de uma matriz de *pixels* na formação de uma imagem bidimensional (x,y) e de uma matriz de *voxels* na formação uma representação volumétrica (x,y,z)*. 2023. *pixels*: *picture elements*; *voxels*: *volume pixels*.

* LedPulse Technologies [Internet]. [acesso em 16 fev. 2023]. Disponível em: <https://www.ledpulse.com/blog-posts/from-pixel-to-voxel-a-dimensional-leap>

2.7 Segmentação – Software InVesalius® 3.1

A segmentação foi realizada com o *software* brasileiro, livre e gratuito *InVesalius® versão 3.1*.^{*} O processo é capaz de converter um exame de TC composto de centenas de fatias 2D em uma matriz de *voxels*.

De forma semiautomática, o *software* auxilia o usuário a selecionar as áreas de interesse do estudo nos eixos “x”, “y” e “z” possibilitando a visualização multiplanar simultânea dos eixos axial, coronal e sagital. Assim, é realizada a extração geométrica das regiões de interesse que vão compor o modelo digital (Figura 4). A matriz de *voxels* resultante permite a continuidade do processo de desenvolvimento dos modelos 3D.

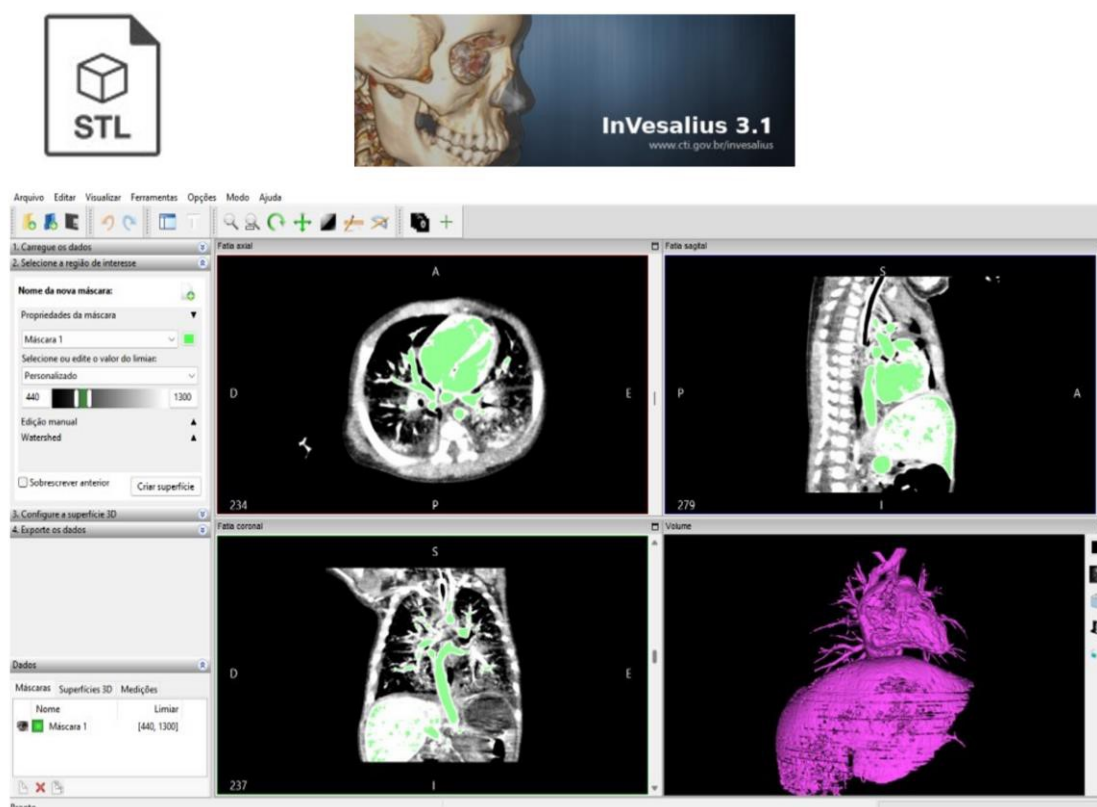


Figura 4. Processo de segmentação utilizando o *software InVesalius® 3.1*. em caso de CATTVVPP infracardíaca. Definição das áreas de interesse

^{*} InVesalius 3 [Internet]. [acesso em 20 nov. 2021]. Disponível em: <https://www1.cti.gov.br/pt-br/invesalius>

e extração geométrica simultânea nos cortes angiotomográficos axial, coronal e sagital (x,y,z). No ápice esquerdo da figura: a representação gráfica da extensão STL, o formato de arquivo obtido após a segmentação. ®: copyright; CATTVVPP: Conexão anômala total de veias pulmonares; STL: extensão *Standard Triangle Language*.

As etapas de segmentação no *InVesalius*® versão 3.1 foram: 1 – importação em formato DICOM e visualização multiplanar; 2 – criação de uma máscara (seleção semiautomática das regiões de interesse entre 440–1300 unidades Hounsfield); 3 – edição manual dos cortes tomográficos otimizando a delimitação das áreas de interesse em cada uma das centenas de cortes que compunham o exame; 4 – criação de superfície 3D (matriz de *voxels*); 5 – exportação em formato *Standard Triangle Language* (STL) para *software* de design digital.

2.8 Otimização do *design 3D* – Software Autodesk®Meshmixer™ 3.5.474

Foi utilizado o software gratuito Autodesk®Meshmixer™ versão 3.5.474.* Ele possibilita o *design* de protótipos digitais pela modelagem da matriz 3D.

O arquivo STL é traduzido em uma malha digital composta de centenas de milhares de triângulos de alta resolução. Esta malha digital pode ser trabalhada com instrumentos virtuais e, ao final, enriquecida com dados relacionados à textura, cor e coordenadas importantes para as próximas etapas da imp3D (Figura 5).

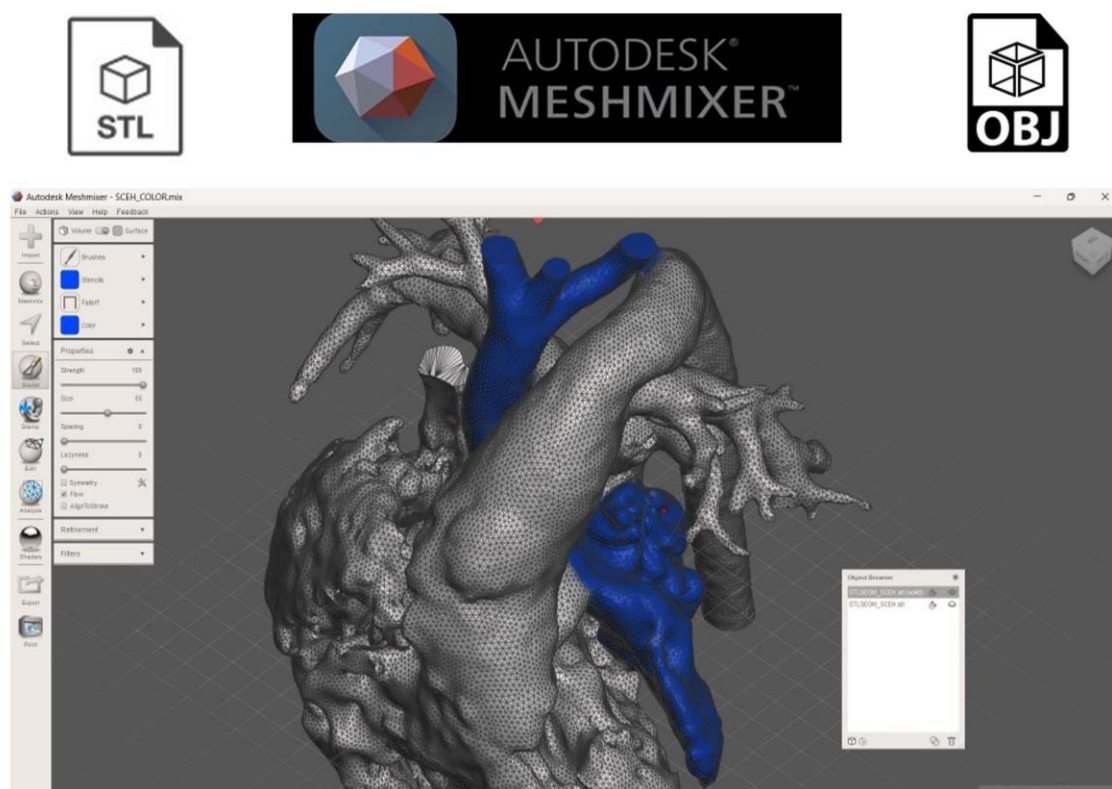


Figura 5. Processo de design digital utilizando o software Autodesk® Meshmixer™ versão 3.5.474 em caso de SCEH. SCEH: Síndrome do coração esquerdo hipoplásico; STL: Extensão *Standard Triangle Language*; OBJ: Extensão *Object File Wavefront 3D*; 3D: Tridimensional; STL e OBJ: os formatos de arquivo passíveis de

* Meshmixer [Internet]. [acesso em 15 dez. 2021]. Disponível em: <https://www.meshmixer.com/download.html>

modelagem tridimensional e exportação para a etapa de fatiamento 3D.

As etapas de modelagem 3D no *AutoDesk®Meshmixer™ versão 3.5.474* foram: 1 – eliminação de estruturas anatomicamente irrelevantes remanescentes da superfície 3D (músculos, fragmentos ósseos, vasos de menor importância, tecidos adjacentes em excesso); 2 – suavização de bordas (*smooth boundary*) e preenchimento de *gaps* (*flat remeshed* ou *smooth MVC*); 3 – homogeneização e qualificação da malha 3D (*remesh mode*); 4 – criação de uma superfície externa às áreas de captação de contraste (*hollow*) e geração de um envoltório (*offset distance 3 mm*) sobre a imagem negativa das áreas de interesse; 5 – aplicação da função *make solid (accurate)* para suavizar as trabeculações das câmaras cardíacas (zonas de preenchimento de contraste) e rugosidades decorrentes do processo original de aquisição tomográfica; 6 – pincéis (*brushes*) de volume e superfície (*shrink smooth* ou *robust smooth*) para refinamento visual; 7 – retificação da base dos ventrículos (*plane cut*) e adição de uma base quadrada de 65 milímetros (mm) por 65 mm por 5 mm de altura (*boolean union* ou *combine*) com o intuito de reforçar a sustentação da peça e reduzir a necessidade da impressão de suportes; 8 – Subtração de janelas esféricas (*boolean difference*) em átrios, ventrículos ou grandes vasos quando desejada a visibilização de estruturas intracardíacas; 9 – criação de suportes (*overhangs, angle threshold 45°*); 10 – revisão global (*analysis inspector*) e autorreparo pré-impressão(*smooth fill*); 11 – exportação em formato STL ou OBJ (*Object File Wavefront 3D*) que permitem inserção nos *softwares* de programação da impressora (fatiadores).

2.9 As Valvas Cardíacas

A partir dos exames de ECOTT 2D foram selecionadas imagens das valvas de interesse e exportadas no formato JPEG. A matriz de *pixels* foi convertida em STL na ferramenta *online* gratuita *Fabconvert*.*

O *Fabconvert* utiliza a tecnologia *Heightmap*, onde as diferentes porções da imagem são “levantadas” no eixo “z” de acordo com o grau de luminosidade de seus *pixels*, processo também utilizado na ciência cartográfica para a confecção de mapas topográficos (Figura 6).

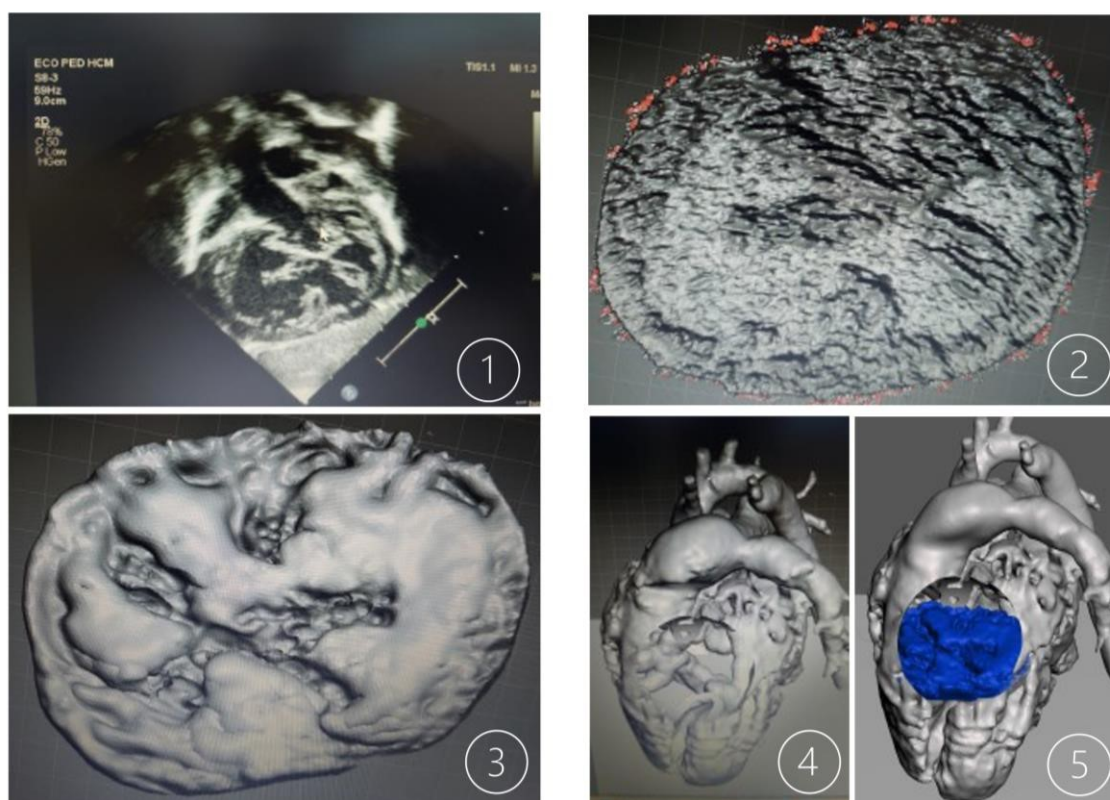


Figura 6. Método alternativo para modelagem tridimensional das valvas cardíacas. 1: Imagem de ecocardiográfica da valva atrioventricular no DSAVT em formato JPEG; 2: Volumetria resultante em formato STL após processamento com a técnica *Heightmap*; 3: Modelagem

* Fabconvert [Internet]. [acesso em 16 fev. 2022]. Disponível em: <https://fabconvert.com/>

digital no software *AutoDesk®Meshmixer™ versão 3.5.474*; 4 e 5: Inserção do objeto tridimensional na junção atrioventricular do modelo de DSAVT. DSAVT: defeito do septo atrioventricular total; JPEG: *Joint Photographic Experts Group*; OBJ: *Object File Wavefront*.

A superfície expandida gerou uma extensão STL que foi trabalhada no *AutoDesk®Meshmixer™ versão 3.5.474* na sequência: 1 – *make solid (accurate, offset distance 0.3mm)*; 2 – otimização de volume do anel valvar e dos folhetos (*sculpt brushes – volume, inflate*); 3 – suavização de rugosidades e equalização de margens (*sculpt brushes – surface, robust smooth*); 4 – planificação da base (*edit – plane cut*) com preenchimento *remeshed fill*; 5 – homogeneização da malha 3D (*remesh mode*); 6 – conversão à objeto sólido (*convert to solid part*) e adição ao banco de objetos pessoais (*Meshmix – my parts*); 7 – importação do objeto (valva 3D) e inserção da valva em posição atrioventricular (modelo de DSAVT) ou ventrículoarterial (modelo de *Truncus Arteriosus*); 8 – aglutinação em objeto único contendo a valva 3D (*boolean union*); 9 – revisão global (*analysis inspector*) e autorreparo pré-impressão (*smooth fill*).

2.10 Preparação do arquivo para impressão – *Software PrusaSlicer® 2.4.2*

Utilizou-se o *software* livre e gratuito *PrusaSlicer® versão 2.4.2*.^{*} Nele, o modelo digital é importado nos formatos STL ou OBJ e subdividido virtualmente em centenas de camadas (fatias). O programa permite a inserção das configurações e parâmetros de impressão necessários para a manufatura de cada peça pela impressora 3D (Figura 7).

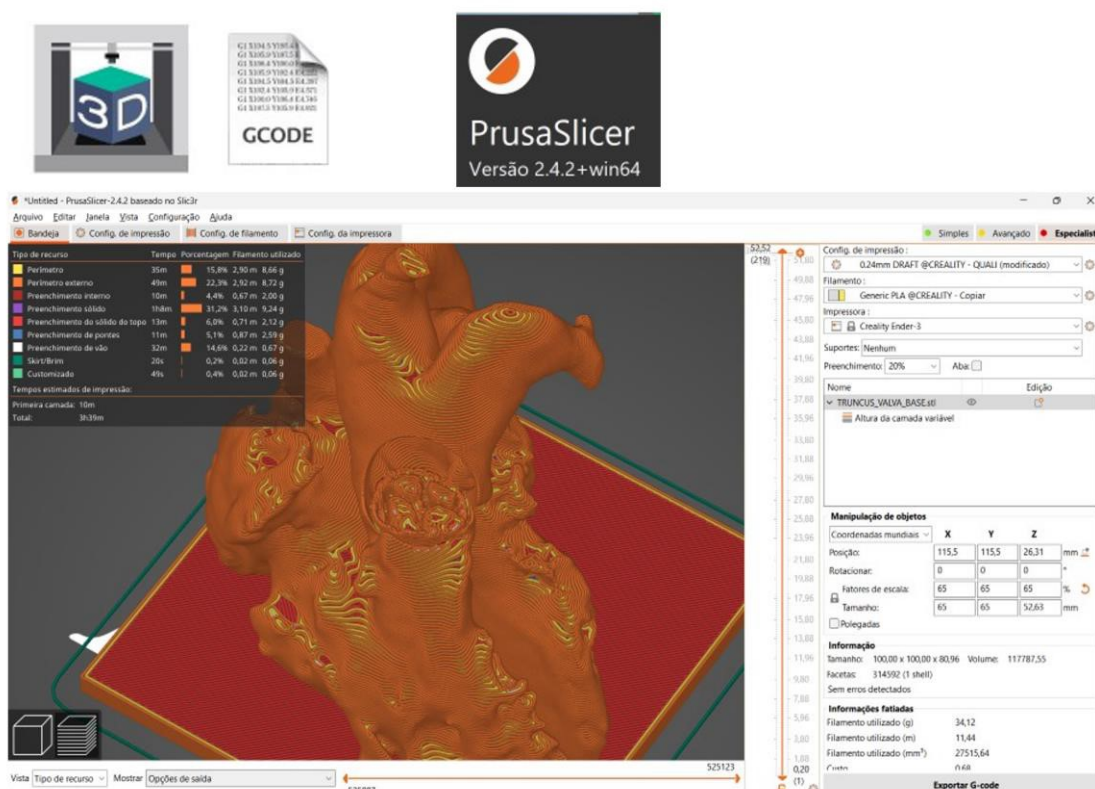


Figura 7. Processo de fatiamento (*slicing*) utilizando o *software PrusaSlicer® versão 2.4.2* em caso de *Truncus Arteriosus*. No topo, a representação gráfica da extensão GCODE, formato de arquivo que contém o comando numérico computadorizado que orientará a manufatura aditiva da peça pela impressora 3D.

^{*} PrusaSlicer [Internet]. [acesso em 07 abr. 2022]. Disponível em: https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/

Os parâmetros de filamento foram: tipo de filamento *polylactic acid* (PLA), diâmetro 1,75 mm, densidade 1,24g/cm³, temperatura do bico de impressão (primeira camada 210°C, demais camadas 205°C), temperatura da mesa de impressão 60°C, máxima velocidade volumétrica 15 mm³/s e retração padrão.

Os parâmetros de impressão foram: *preset Creality® 0.2mm normal*, altura das camadas 0,25 mm, altura da primeira camada 0,3mm, paredes verticais com perímetros 3, paredes horizontais com camadas sólidas de topo 3 e base 3, espessura mínima da concha - padrão, posição da costura - traseira, densidade de preenchimento 20%, padrão de preenchimento - hexagonal, comprimento de âncora 600%, padrão monotônico; foram configurados em 60 mm/s as velocidades referentes aos perímetros, preenchimentos, pontes e material de suporte. Interface do material de suporte - 100%, viagem para movimentos não impressos 150 mm/s, velocidade da primeira camada 20 mm/s, espessuras de extrusão (largura padrão 0,45 mm, primeira camada 0,42 mm, demais perímetros e preenchimentos 0,45 mm), sobreposição de preenchimentos e perímetros de 25%; ativada a suavização de camadas.

Os parâmetros da impressora 3D foram: velocidades máximas de alimentação (máxima taxa de alimentação do "X" 500 mm/s, máxima taxa de alimentação do "Y" 500 mm/s, máxima taxa de alimentação do "Z" 10mm/s, máxima taxa de alimentação do "E" 60 mm/s), acelerações máximas (aceleração máxima do "X" 1000 mm/s², aceleração máxima do "Y" 1000 mm/s², aceleração máxima do "Z" 100 mm/s², aceleração máxima do "E" 5000 mm/s², aceleração máxima quando expurgando 500 mm/s², aceleração máxima

durante a retração 1000 mm/s²), limites de empurrão/*jerk* (máximo empurrão do “X” 10 mm/s, máximo empurrão do “Y” 10 mm/s, máximo empurrão do “Z” 0,4 mm/s, máximo empurrão do “E” 5 mm/s), diâmetro do bico 0,4 mm, limites de altura de camada (mínimo 0,08 mm, máximo 0,28) e retração (comprimento 5 mm, velocidade de retração 60 mm/s, velocidade de retorno de retração 40 mm/s, retração em viagens acima de 2 mm, retraina na mudança de camada).

O produto do fatiamento é um arquivo em formato GCODE (também chamado de RS-274). O GCODE é um comando numérico computadorizado que controla os movimentos de máquinas automatizadas pela interpretação direta de instruções codificadas em forma de números e letras. É a linguagem de programação que traduz os modelos 3D criados no ambiente digital em instruções seguidas pela máquina de manufatura industrial – no caso, a impressora 3D.

2.11 Impressão 3D – impressora *Creality® Ender3™*

Os modelos de CC desenvolvidos foram impressos utilizando a técnica de manufatura aditiva *Fused Deposition Modeling* (FDM) na impressora *Creality® Ender3™* com filamento *polylactic acid* (PLA) *National 3D® PLA MAX™* 1,75mm branco.

O PLA é um polímero termoplástico composto por moléculas de ácido polilático; um ácido orgânico, biológico, obtido a partir de fontes naturais renováveis contendo amido ou açúcar. O filamento é fundido no bico aquecido da impressora e depositado em camadas nos eixos ortogonais primordiais (“x”, “y” e “z”) em centenas de camadas sobrepostas até a fabricação completa do modelo (Figura 8).



Figura 8. Processo de manufatura aditiva pela fusão de filamento termoplástico.

1: Representação de impressora 3D com extrusora única; 2:

Representação da deposição do material em camadas; 3: Impressora 3D *Creality® Ender3™* utilizada na pesquisa.*

No processo de manufatura aditiva as camadas inferiores da peça servem de sustentação para as camadas superiores. Estruturas com angulação maior do que 45° necessitam da impressão de pilares de suporte para apoiar esses extremos e evitar o colapso da impressão.

Foram desenvolvidos 12 modelos de CC elaborados como estruturas inteiras (não em metades ou subconjuntos). Os protótipos foram trabalhados para serem fidedignos ao *pool* original de imagens, com mínima edição, visualmente confortáveis, ilustrativos das principais características anatômicas de cada doença, de fácil manuseio e com a menor quantidade possível de suportes.

* Zhang Y, Jarosinski W, Jung YG, Zhang J, editores. Additive manufacturing: materials, processes, quantifications and applications. *In*: Zhang J, Jung YG. Additive Manufacturing. Elsevier Science; 2018. p. 39-51. DOI: 10.1016/B978-0-12-812155-9.00002-5.

2.12 Etapa pós impressão

Os resquícios indesejados de materiais termoplásticos remanescentes, assim como os suportes, foram removidos com o auxílio de instrumentos como alicate, tesoura, pinça e lixa (Figura 9).

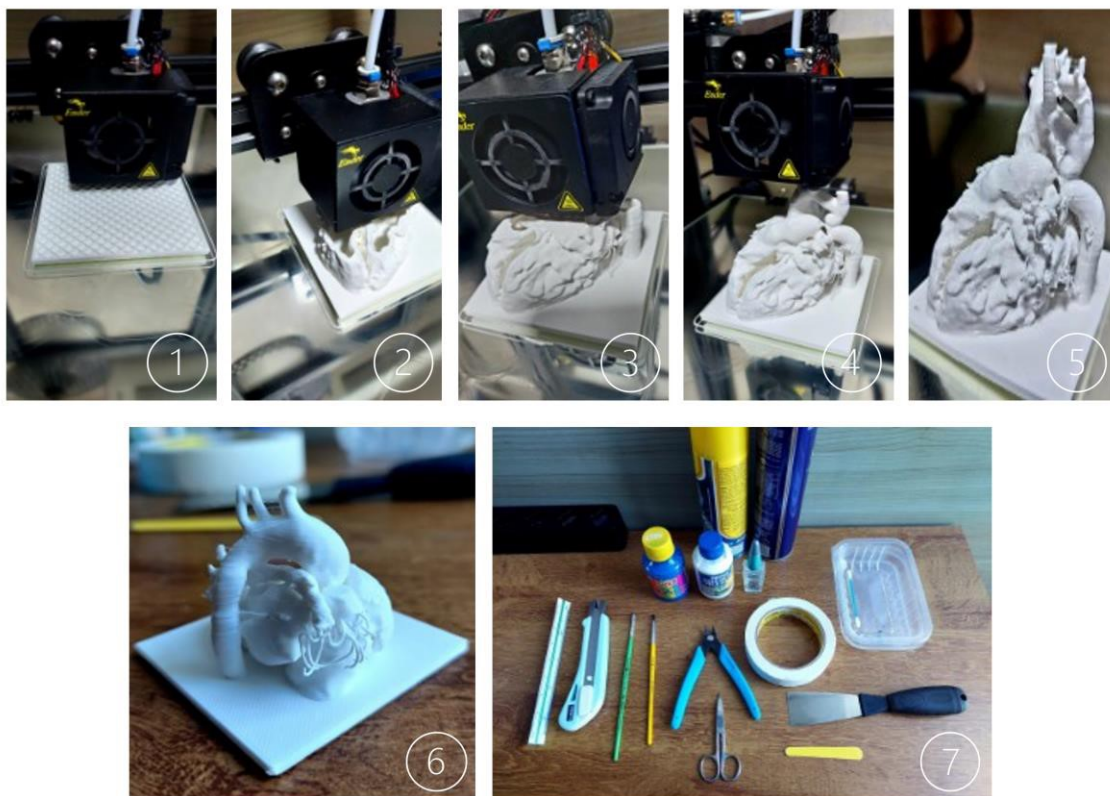


Figura 9. Impressão 3D e etapa pós-impressão. 1 a 5: Impressão 3D na impressora *Creality® Ender3™* utilizando filamento de PLA branco em modelo de CoAo; 6: Exemplo de resquícios plásticos do processo de manufatura aditiva; 7: Instrumentos utilizados na etapa pós impressão. PLA: *Polylactic Acid*; CoAo: Coarctação de Aorta.

2.13 Equipe de especialistas e instrumento de avaliação

Para a avaliação dos modelos, constituiu-se um grupo de 26 médicos especialistas da CardioPedBrasil® com atuação dedicada integralmente às crianças com CC. O grupo foi composto por representantes da cardiologia pediátrica, ecocardiografia pediátrica, terapia intensiva pediátrica, radiologia cardiovascular pediátrica, cardiologia intervencionista pediátrica e cirurgia cardiovascular pediátrica.

Após leitura e concordância com o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), os avaliadores foram solicitados a preencher um questionário elaborado com o auxílio do *software* de pesquisa *online* *QuestionPro Survey Software*®.* (Apêndices A e B).

A primeira parte do questionário continha perguntas relativas à caracterização profissional dos especialistas, grau de conhecimento prévio sobre imp3D na área médica e se a dificuldade de visualização espacial consistia em um dos principais obstáculos na compreensão das CC.

Os modelos impressos em 3D foram, então, identificados por doença e expostos à equipe de especialistas. (Figura 10).

* QuestionPro [Internet]. [acesso em 28 jul. 2022]. Disponível em: <https://www.questionpro.com>



Figura 10. Avaliação dos modelos de CC impressos em 3D pela equipe de especialistas. 1: Modelos impressos em 3D; 2 a 4: Avaliação das peças por integrantes da equipe de especialistas. CC: cardiopatias congênitas.

Na segunda parte, cientes das patologias representadas nas 12 peças; os especialistas avaliaram se os protótipos físicos desenvolvidos continham as principais características anatômicas que permitiriam o reconhecimento de cada uma das doenças propostas (Figura 11).

Nessa etapa foi utilizada escala do tipo *Likert*, de quatro pontos, para responder as afirmativas padronizadas: “Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a (doença).”

Avaliação Individual dos Protótipos

Protótipo 1 - Comunicação Interatrial Ostium Secundum + Persistência do Canal Arterial

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a **Comunicação Interatrial Ostium Secundum + Persistência do Canal Arterial**.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Protótipo 2 - Defeito do Septo Atrioventricular Total

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem o **Defeito do Septo Atrioventricular Total**.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Pequenos Corações 3D

 QuestionPro

Figura 11. Fragmento do questionário sobre a avaliação individual das características anatômicas dos modelos de CC em imp3D elaborado com o auxílio da ferramenta de pesquisa *online* *QuestionPro Survey Software*®* para a pesquisa “Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D: potenciais aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica”. CC: cardiopatias congênitas; imp3D: impressão 3D.

Também foram analisados os atributos gerais do conjunto de modelos 3D (Figura 12).

* QuestionPro [Internet]. [acesso em 28 jul. 2022]. Disponível em: <https://www.questionpro.com>

Avaliação Global dos Protótipos

Os protótipos apresentados são:

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Fidedignos à anatomia da doença	☐	☐	☐	☐
Visualmente agradáveis	☐	☐	☐	☐
De tamanho adequado	☐	☐	☐	☐
Fáceis de manipular	☐	☐	☐	☐
Aparentemente resistentes	☐	☐	☐	☐
Capazes de motivar o estudo	☐	☐	☐	☐

Pequenos Corações 3D

 QuestionPro

Figura 12. Avaliação global dos atributos referentes ao conjunto de modelos de CC em imp3D elaborado com o auxílio da ferramenta de pesquisa online *QuestionPro Survey Software*®* para a pesquisa “Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D: potenciais aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica”. CC: cardiopatias congênitas; imp3D: impressão 3D.

A terceira parte do questionário interrogou a equipe de especialistas sobre o potencial dos modelos de CC em imp3D no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica para diferentes grupos: estudantes de graduação, membros da equipe interdisciplinar, cardiologistas, cirurgiões cardiovasculares, residentes, familiares e responsáveis pelas crianças (Figura 13).

* QuestionPro [Internet]. [acesso em 28 jul. 2022]. Disponível em: <https://www.questionpro.com>

Acredito que os modelos de cardiopatias congênitas impressos em 3D podem ser adjuvantes na educação e ensino de:

(Possível mais de uma opção)

- ☐ Estudantes de Graduação da Área de Saúde
- ☐ Membros da Equipe Interdisciplinar - Fisioterapeutas, Enfermeiros, Nutricionistas, Psicólogos, Assistentes Sociais, Terapeutas Ocupacionais, Técnicos de Enfermagem, Farmacêuticos e demais profissionais.
- ☐ Cardiologistas, Cirurgiões Cardiovasculares e Residentes.
- ☐ Familiares e Responsáveis pelas crianças

Pequenos Corações 3D

 QuestionPro

Figura 13. Questão sobre a avaliação do potencial educacional dos modelos de CC em imp3D para diferentes grupos elaborado com o auxílio da ferramenta de pesquisa online *QuestionPro Survey Software*®* para a pesquisa “Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D: potenciais aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica”. CC: cardiopatias congênitas; imp3D: impressão 3D.

Na quarta parte houve espaço para dissertação de sugestões, críticas e comentários que foram analisados qualitativamente pelo método da nuvem de palavras. Foi realizada a transcrição, correção de erros de digitação, uniformização, eliminação de sinônimos e redução do texto em classes de palavras representativas do conteúdo.

O arquivo docx (*Microsoft Word*® para *Microsoft 365 MSO versão 2207*) foi processado em formato de nuvem de palavras na ferramenta on-line gratuita *WordClouds*, pertencente a empresa @Zygomatic.†

Os resultados foram expressos em frequência e porcentagem com o auxílio de gráficos gerados no *software Microsoft*® *Excel*® para *Microsoft 365*

* QuestionPro [Internet]. [acesso em 28 jul. 2022]. Disponível em: <https://www.questionpro.com>

† WordClouds [Internet]. [acesso em 18 ago. 2022]. Disponível: <https://www.wordclouds.com/>

MSO (Versão 2403 Build 16.0.17425.20124) 64 bits e a análise discursiva expressa na nuvem de palavras.

2.14 Protótipos finais e proposta de box educacional

Os protótipos finais foram fotografados pelo aparelho celular *Samsung® Galaxy A72™* com o auxílio do mini estúdio *Sagaro® Photo Light Box 64 Leds* com fundo em cor azul escuro em intensidade máxima de luz branca (Figura 14).



Figura 14. Conjunto de protótipos de CC em impressão 3D inseridos no mini estúdio de fotografia *Sagaro® Photo Light Box 64 Leds* com fundo em cor azul escuro. CC: cardiopatias congênitas; imp3D: impressão 3D.

Os modelos foram acondicionados em uma caixa de madeira *Medium Density Fiberboard* (MDF), resultado da aglutinação de fibras de madeira com resina sintética, de tamanho 31,5 cm x 23,5 cm x 9,0 cm com fecho metálico e 12 divisórias internas. Placas de aço inoxidável com informações referentes à pesquisa e identificação dos modelos foram confeccionadas e aplicadas nas faces interna e externa do box educacional proposto (Figura 15).



Figura 15. Proposta de box educacional com o conjunto de modelos de CC em imp3D identificados e acondicionados em caixa de madeira com 12 divisórias. 1: Face externa; 2: Face interna com 12 divisórias; 3: Detalhe da placa de identificação interna. CC: cardiopatias congênicas; imp3d: impressão 3D.

2.15 Aspectos éticos

O projeto de pesquisa foi inserido na Plataforma Brasil em 25 de junho de 2021 e identificado pelo Certificado de Apresentação de Apreciação Ética (CAAE) nº. 48575021.3.0000.5415. Submetido à análise pelo Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos da FAMERP, foi aprovado em nove de julho de 2021.

Nenhuma criança foi identificada, convocada ao serviço ou submetida a novo exame complementar com o intuito de coleta de dados para a pesquisa; justificando assim a dispensa de Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) para as etapas de prospecção de imagens do acervo da Instituição, processamento digital e manufatura aditiva dos modelos 3D.

3. RESULTADOS

3.1 Modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D

Foram desenvolvidos 12 modelos de CC em imp3D:

a) Comunicação interventricular de via de saída, perimembranosa, com persistência do canal arterial (Figura 16)

Largura: 68,7 mm – Altura: 54,5 mm – Profundidade: 47,7 mm

Peso: 41,3 gramas (g) - Filamento utilizado: 13,8 metros (m)

Tempo de impressão: 4 horas (h) e 29 minutos (min)

Facilitador(es): Janela no ventrículo direito.

Características anatômicas representadas: comunicação interventricular na topografia da via de saída da superfície septal direita, perimembranosa; PCA.

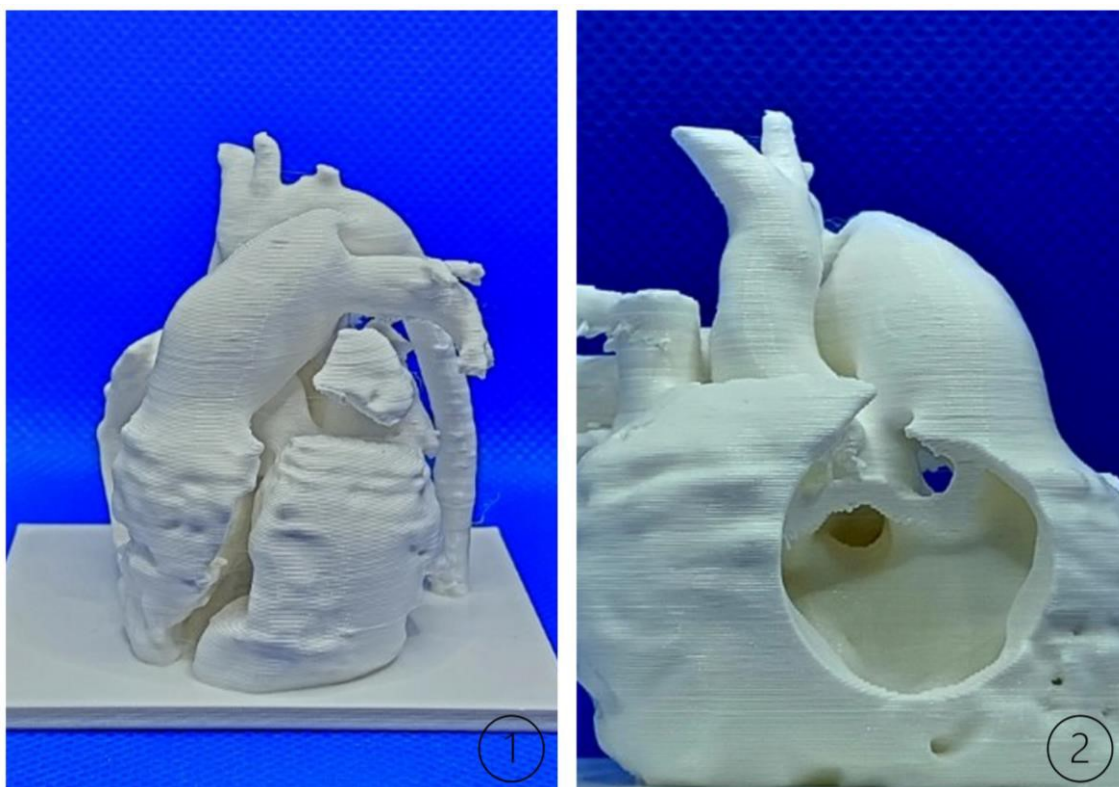


Figura 16. Modelo de CIV de via de saída, perimembranosa, com PCA. 1: visão ampla; 2: visão aproximada. CIV: Comunicação interventricular; PCA: Persistência do canal arterial.

b) Comunicação interatrial *ostium secundum* com persistência do canal arterial (Figura 17)

Largura: 65,9 mm - Altura: 60,0 mm - Profundidade: 63,4 mm

Peso: 30,2 g - Filamento utilizado: 10,15 m

Tempo de impressão: 3 h e 34 min

Facilitador(es): Janela no átrio direito.

Características anatômicas representadas: comunicação interatrial na topografia da lâmina da fossa oval e PCA.



Figura 17. Modelo de CIA *ostium secundum* com PCA. 1: visão ampla; 2: visão aproximada. CIA: comunicação interatrial; PCA: persistência do canal arterial.

c) Tetralogia de *Fallot* com estenose pulmonar (figura 18)

Largura: 68,0 mm - Altura: 60,6 mm - Profundidade: 56,8 mm

Peso: 36,9 g - Filamento utilizado: 12,3 m

Tempo de impressão: 3 h e 36 min

Facilitador(es): Janela no ventrículo direito.

Características anatômicas representadas: CIV subaórtica, dextroposição da valva aórtica sobre o topo do septo interventricular, estenose pulmonar de componente principal infundíbulo-valvar, ventrículo direito hipertrófico, presença de *ostium infundibulum*.

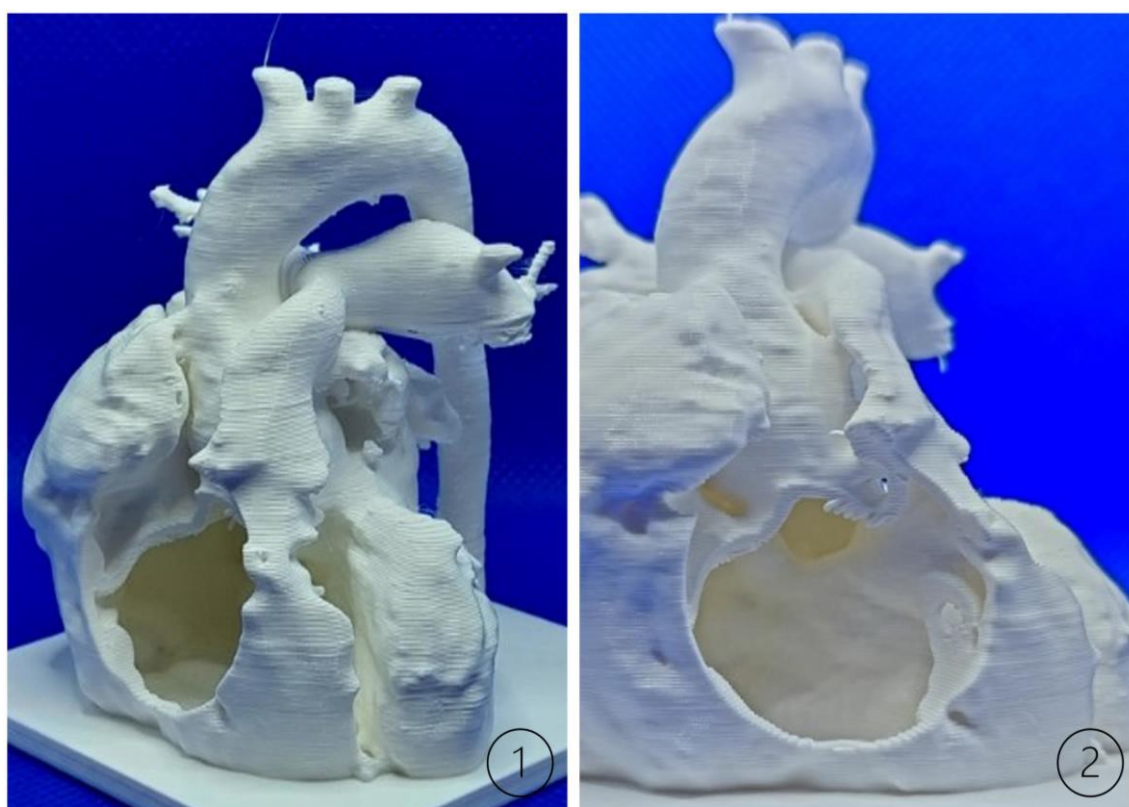


Figura 18. Modelo de T4F com estenose pulmonar infundíbulo-valvar. 1: visão ampla; 2: visão aproximada. T4F: Tetralogia de *Fallot*.

d) Transposição de grandes artérias com persistência do canal arterial (Figura 19)

Largura: 59,0 mm - Altura: 60,8 mm - Profundidade: 60,2 mm

Peso: 45,7 g - Filamento utilizado: 15,3 m

Tempo de impressão: 4 h e 36 min

Características anatômicas representadas: discordância ventrículoarterial.



Figura 19. Modelo de TGA com PCA. TGA: Transposição de grandes artérias; PCA: persistência do canal arterial.

e) Defeito do septo atrioventricular total tipo A de *Rastelli* (Figura 20)

Largura: 72,4 mm - Altura: 52,0 mm - Profundidade: 57,8 mm

Peso: 39,6 g - Filamento utilizado: 13,2 m

Tempo de impressão: 4 h e 39 min

Facilitador(es): Janela na transição atrioventricular.

Características anatômicas representadas: junção atrioventricular comum, valva atrioventricular única com um orifício, comunicação interventricular de via de entrada, comunicação interatrial *ostium primum*.



Figura 20. Modelo de DSAVT tipo A de *Rastelli*. 1: visão ampla; 2: visão aproximada. DSAVT: Defeito do septo atrioventricular total.

f) Coarctação de Aorta com persistência do canal arterial (Figura 21)

Largura: 60,0 mm - Altura: 58,4 mm - Profundidade: 58,1 mm

Peso: 36,1 g - Filamento utilizado: 12 m

Tempo de impressão: 3 h e 10 min

Características anatômicas representadas: coarctação de Aorta justaductal, retração ístmica por tecido ductal, pequeno canal arterial patente e arco aórtico hipoplásico.



Figura 21. Modelo de CoAo com PCA. 1: Visão ampla; 2: Visão aproximada.

CoAo: Coarctação de Aorta; PCA: persistência do canal arterial.

g) Síndrome do coração esquerdo hipoplásico (Figura 22)

Largura: 62,4 mm - Altura: 53,3 mm - Profundidade: 53,2 mm

Peso: 34,9 g - Filamento utilizado: 11,7 m

Tempo de impressão: 3 h e 9 min

Características anatômicas representadas: ventrículo esquerdo hipoplásico, Aorta ascendente e ramos supra aórticos rudimentares, ventrículo direito dominante, amplo canal arterial patente.

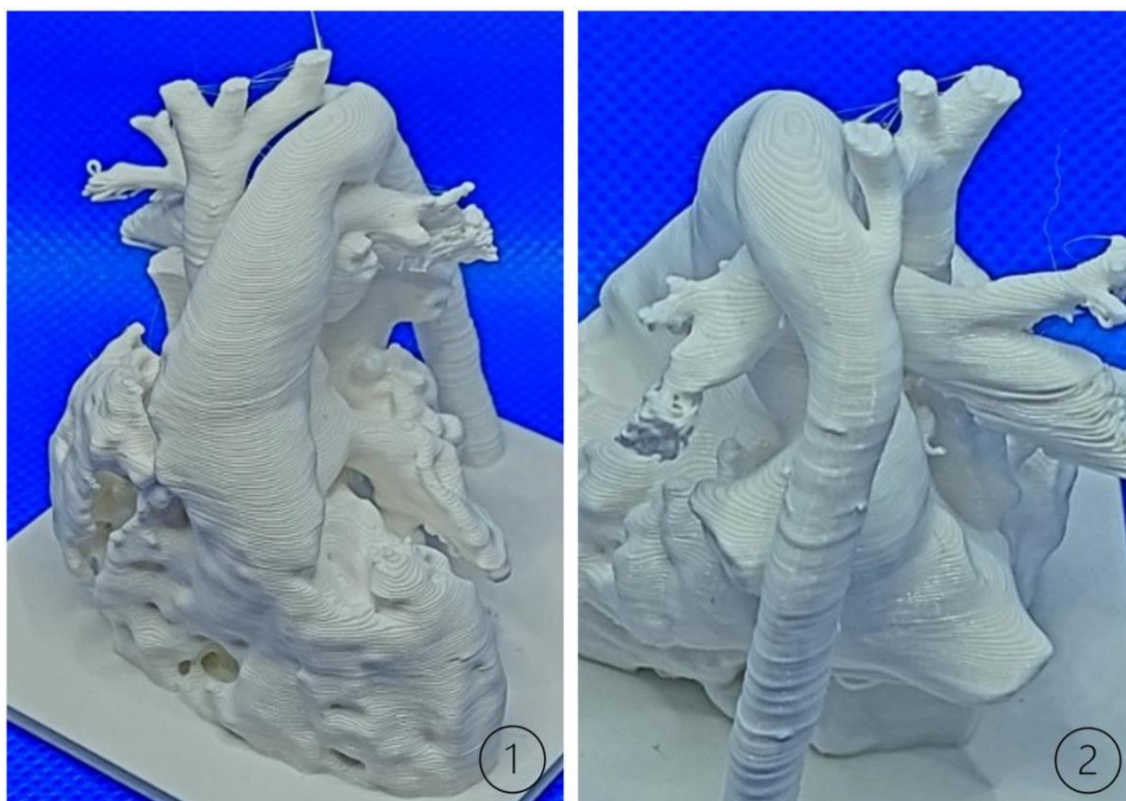


Figura 22. Modelo de SCEH. 1: visão ampla; 2: visão aproximada. SCEH: Síndrome do coração esquerdo hipoplásico.

h) Atresia tricúspide tipo 1C (Figura 23)

Largura: 65,2 mm - Altura: 55,9 mm - Profundidade: 57,0 mm

Peso: 43,1 g - Filamento utilizado: 14,4 m

Tempo de impressão: 4 h e 18 min

Facilitador(es): Janela no átrio direito e no ventrículo direito.

Características anatômicas representadas: ventrículo direito hipoplásico, ausência de conexão atrioventricular direita, CIA *ostium secundum* não restritiva, átrio direito dilatado, ampla CIV, vasos da base normorrelacionados e ausência de estenose pulmonar.

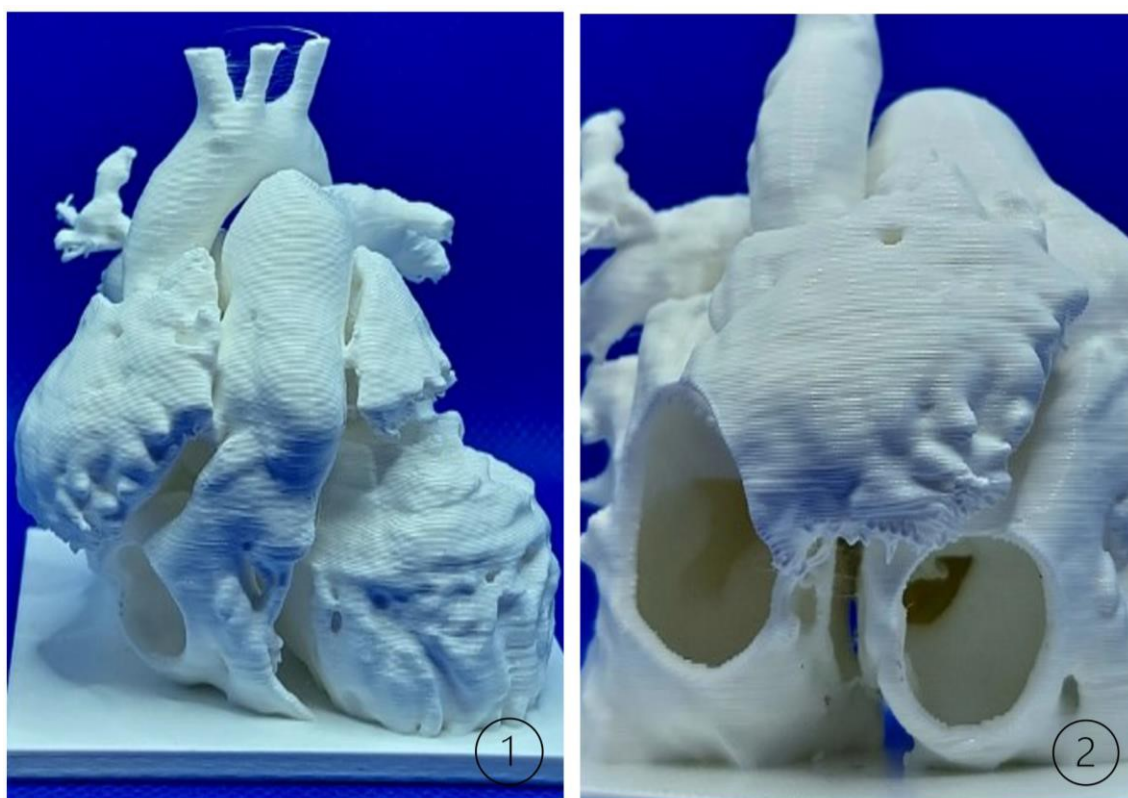


Figura 23. Modelo de AT tipo 1C. 1: Visão ampla; 2: Visão aproximada. AT: Atresia tricúspide.

i) Atresia pulmonar com comunicação interventricular *Barbero-Marcial tipo A* (Figura 24)

Largura: 58,0 mm - Altura: 53,6 mm - Profundidade: 61,1 mm

Peso: 38,2 g - Filamento utilizado: 12,8 m

Tempo de impressão: 3 h e 24 min

Características anatômicas representadas: ventrículo direito hipoplásico, via de saída ventricular única tipo atresia pulmonar, ausência de tronco pulmonar anatômico, artérias pulmonares intrapericárdicas confluentes e nutridas pelo canal arterial.



Figura 24. Modelo de AP com CIV tipo A de *Barbero-Marcial*. AP: Atresia pulmonar; CIV: Comunicação interventricular.

j) Conexão anômala total de veias pulmonares infracardiaca (Figura 25)

Largura: 71,6 mm - Altura: 88,3 mm - Profundidade: 70,5 mm

Peso: 44,3 g - Filamento utilizado: 15,1 m

Tempo de impressão: 5 h e 16 min

Facilitador(es): Janela no átrio direito.

Características anatômicas representadas: veias pulmonares conectadas à veia vertical em sentido descendente drenando no sistema porta e CIA *ostium secundum* não restritiva.

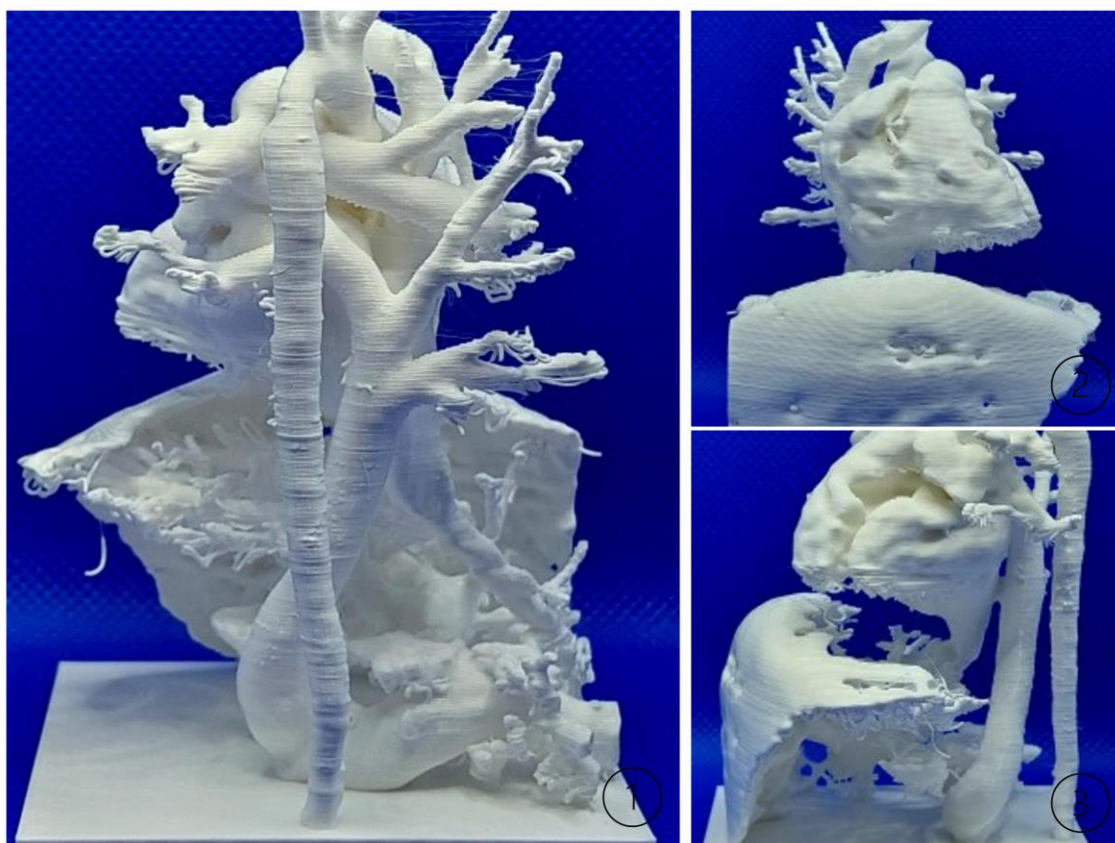


Figura 25. Modelo de CATVPP infracardiaca. 1: visão ampla; 2 e 3: visões aproximadas. CATVPP – conexão anômala total de veias pulmonares.

k) *Truncus Arteriosus Collet-Edwards 1, Vaan Praagh A-1* (Figura 26)

Largura: 60,7 mm - Altura: 49,5 mm - Profundidade: 58,2 mm

Peso: 33,6 g - Filamento utilizado: 11,3 m

Tempo de impressão: 3 h e 43 min

Facilitador(es): Janela na artéria truncal.

Características anatômicas representadas: via de saída ventricular única, tronco arterial comum, valva truncal quadricúspide e tronco pulmonar emergindo da artéria truncal.



Figura 26. Modelo de *Truncus Arteriosus* tipo 1 de *Collet-Edwards*. 1: visão ampla; 2: visão aproximada.

I) Interrupção de arco aórtico tipo C de *Celoria-Patton* (Figura 27)

Largura: 58,7 mm - Altura: 57,8 mm - Profundidade: 58,3 mm

Peso: 39,8 g - Filamento utilizado: 13,3m

Tempo de impressão: 3 h e 26 min

Características anatômicas representadas: interrupção do arco aórtico após a emergência do tronco braquiocefálico, canal arterial nutrindo o arco aórtico distal (artéria carótida comum esquerda e artéria subclávia esquerda) dando continuidade à Aorta descendente.



Figura 27. Modelo de IAAo tipo C de *Celoria-Patton*. 1: visão ampla; 2: visão posterior. IAAo – interrupção de arco aórtico.

Para cada modelo, a depender da complexidade, o tempo de trabalho dispendido na etapa de segmentação de imagens variou entre 4 a 16 h, o de design 3D em ambiente digital entre 3 a 8 h e a etapa pós-impressão de 20 a 60 min (Figura 28).

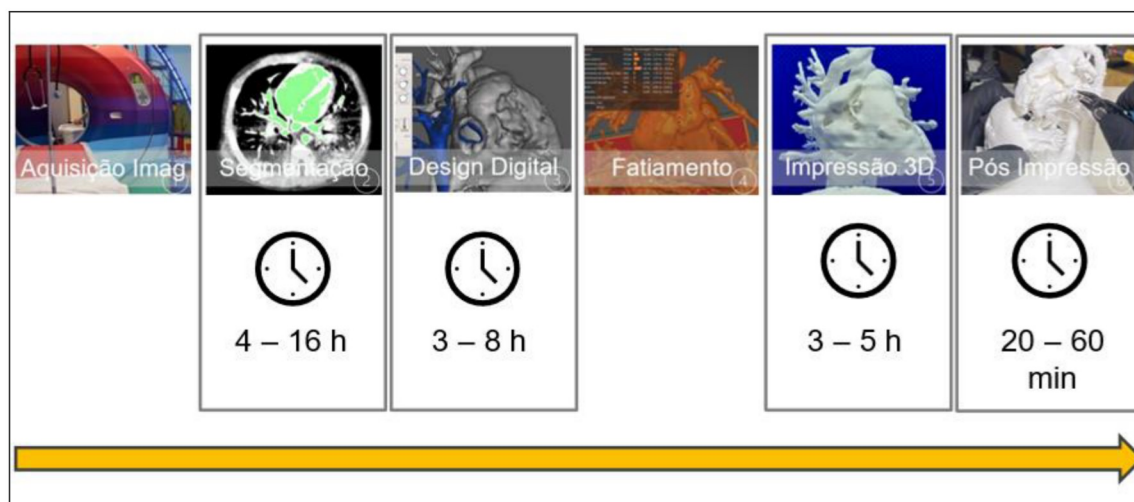


Figura 28. Tempo dispendido (mínimo e máximo) nas principais etapas do fluxo de trabalho para o desenvolvimento dos modelos de CC em imp3D. CC: cardiopatias congênitas; imp3D: impressão 3D.

3.2 Avaliação dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D pela equipe de especialistas.

3.2.1 Caracterização dos avaliadores

A equipe de especialistas foi formada por 26 médicos com média de dez anos de atuação na área de CC. Destes, 58% (15) possuíam cinco ou mais anos de atuação e 46% (7) possuíam dez ou mais anos de atuação na cardiologia pediátrica.

Conforme expresso na Figura 29, 84% (22) dos avaliadores dedicavam-se a especialidades clínicas: doze cardiologistas pediátricos (46%), seis ecocardiografistas pediátricos (23%), três intensivistas cardiopediátricos (11%) e uma radiologista cardiovascular pediátrica (4%). Do total, 91% (24) declararam exercer atividades de assistência e ou ensino no ambiente institucional.

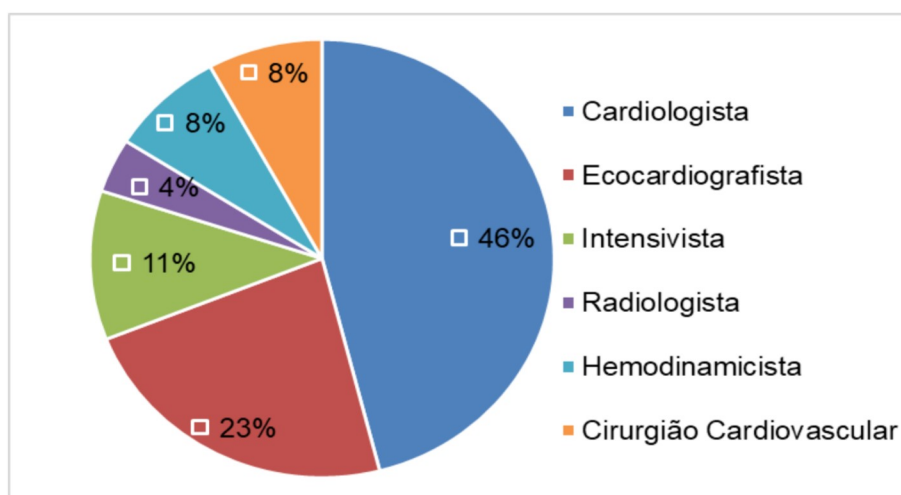


Figura 29. Distribuição da equipe de avaliadores por especialidade médica. n = 26.

Cinquenta por cento (13) dos entrevistados consideraram nulo o próprio nível de conhecimento sobre a utilização da imp3D na área médica (Figura 30)

e 96% (25) concordaram totalmente ou parcialmente que “a dificuldade de visualização espacial é um dos principais obstáculos para a compreensão das cardiopatias congênitas” (Figura 31).

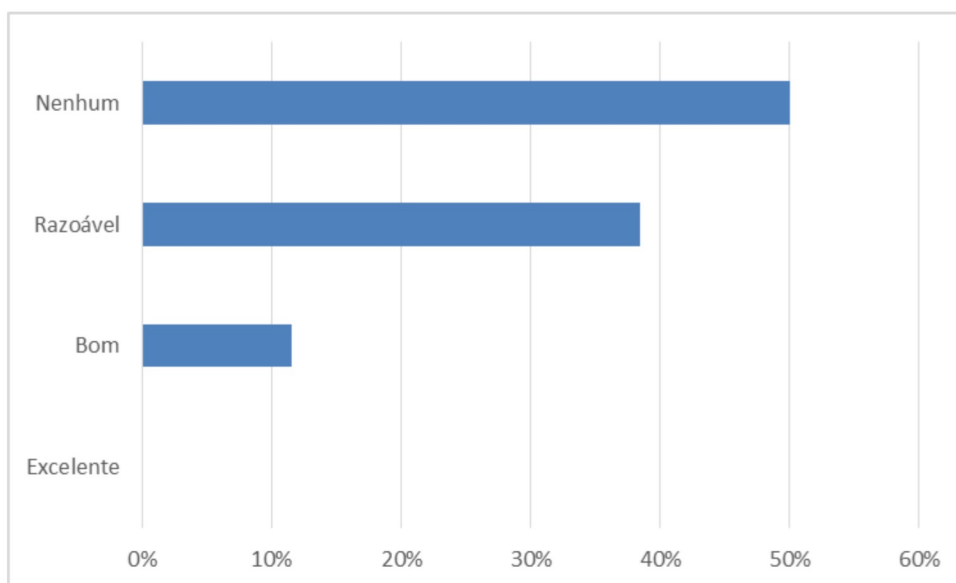


Figura 30. Nível de conhecimento prévio da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre a utilização da impressão 3D na área médica. n = 26.

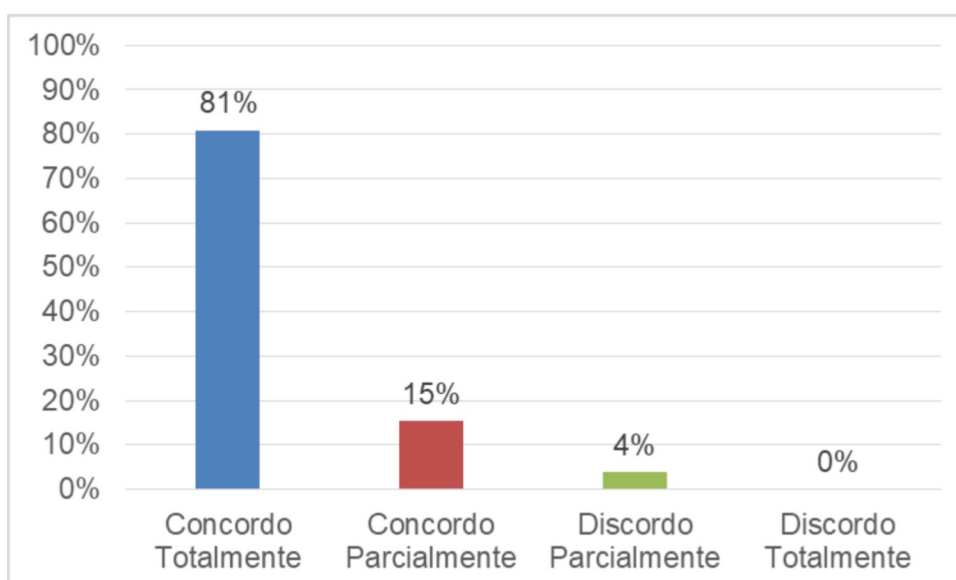


Figura 31. Opinião da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre a afirmativa: “A dificuldade de visualização espacial é um dos principais obstáculos para a compreensão das cardiopatias congênitas”.

principais obstáculos para a compreensão das cardiopatias congênitas". n = 26.

3.2.2 Avaliação individual dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D

Ao serem expostos aos modelos de CC, previamente cientes das doenças representadas, todos os avaliadores concordaram totalmente ou parcialmente que foram capazes de identificar nos modelos as principais características anatômicas que definem a CIA, TGA, CoAo, SCEH, IAAo e *Truncus Arteriosus*.

Conforme ilustrado na Figura 32, os modelos de CIV + PCA, T4F, DSAVT, AT e AP obtiveram entre 92% (24) e 96% (25) de concordância total ou parcial em relação às suas características anatômicas.

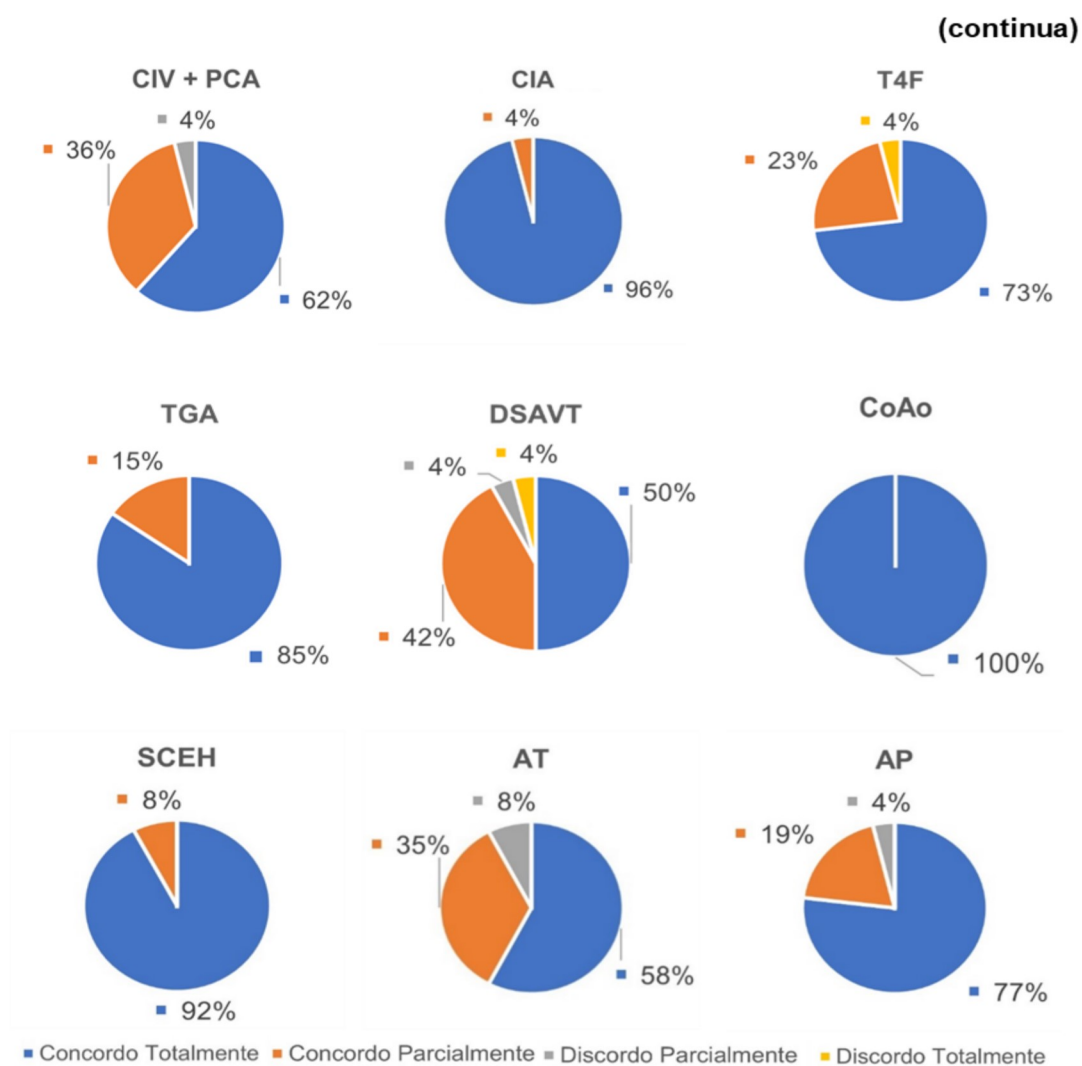




Figura 32. Opinião da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre a afirmativa: “Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a... (doença)”. CIV: Comunicação interventricular; CIA: Comunicação interatrial; PCA: Persistência do canal arterial; T4F: Tetralogia de *Fallot*; TGA: Transposição de grandes artérias; DSAVT: Defeito do septo atrioventricular total; CoAo: Coarctação de Aorta; SCEH: Síndrome do coração esquerdo hipoplásico; AT: Atresia tricúspide; AP: Atresia pulmonar; CATTVVPP: Conexão anômala total de veias pulmonares; IAAo: Interrupção de arco aórtico. n = 26.

3.2.3 Avaliação global dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D

Cem por cento (26) dos especialistas concordaram, totalmente ou parcialmente, que os modelos apresentados são “visualmente agradáveis”, “fáceis de manipular” e “aparentemente resistentes”. Do total, 92% (24) concordaram totalmente ou parcialmente que os modelos impressos são “fidedignos à anatomia da doença”.

Em relação ao tamanho das peças; 88% (23) dos avaliadores concordaram totalmente ou parcialmente que “os modelos apresentados são de “tamanho adequado” (Figura 33).

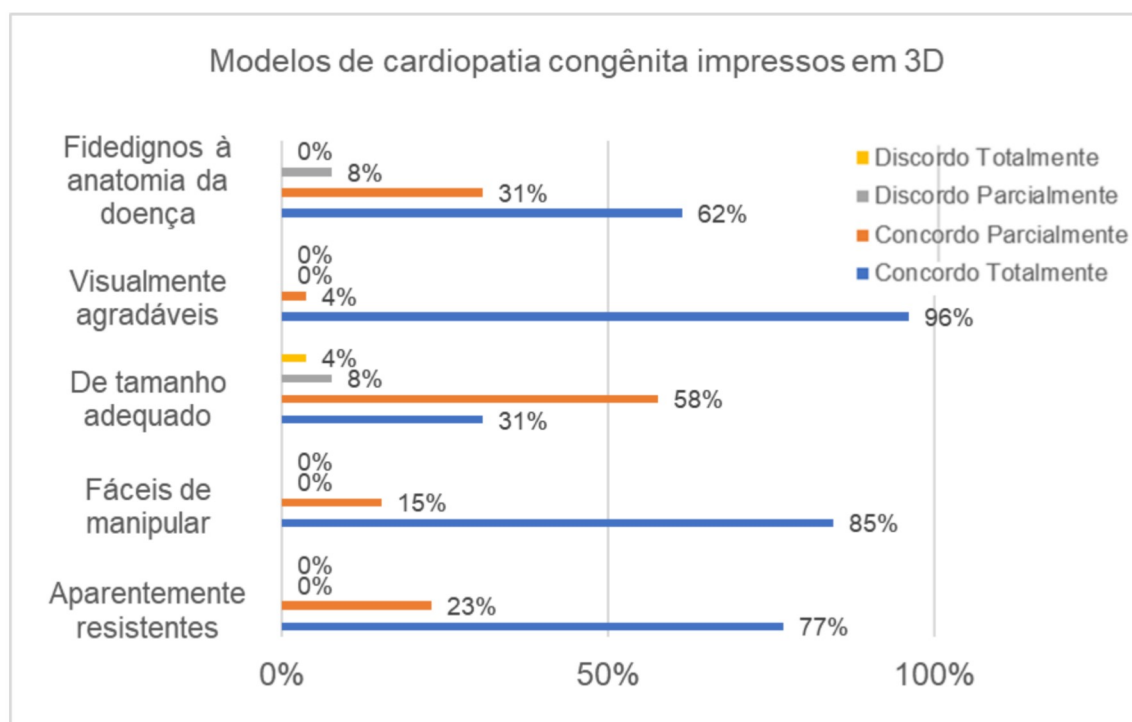


Figura 33. Avaliação global dos modelos de CC em imp3D pela equipe de especialistas em cardiopediatria. n = 26. CC: cardiopatias congênitas; imp3D: impressão 3D.

3.2.4 Potenciais utilizações dos modelos de cardiopatias congênicas em impressão 3D no ensino da cardiologia pediátrica

Noventa e seis por cento (25) dos especialistas concordaram totalmente que os modelos impressos em 3D são “capazes de motivar o estudo das cardiopatias congênicas” (Figura 34).

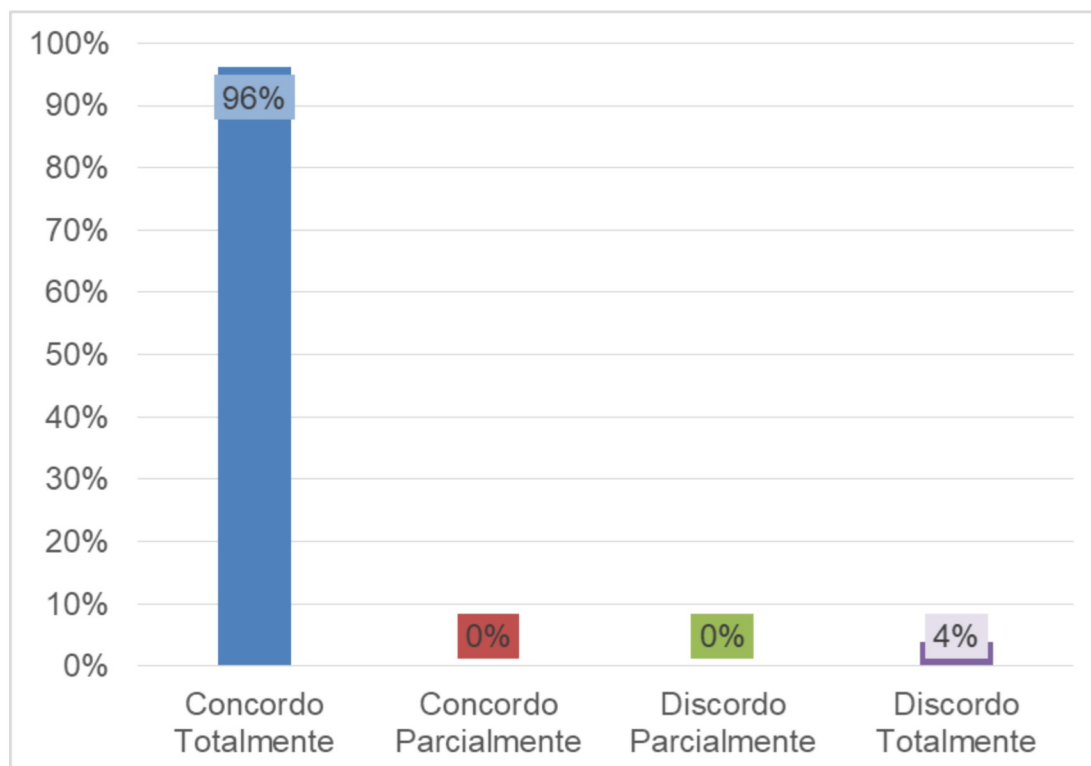


Figura 34. Opinião da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre a afirmativa: “Os modelos impressos em 3D são capazes de motivar o estudo das cardiopatias congênicas.” n = 26.

Cem por cento dos avaliadores referiram que a utilização de modelos de cardiopatias congênicas em impressão 3D podem atuar como adjuvantes na educação e ensino de cardiologistas, cirurgiões cardiovasculares e residentes. Para 96% (25), os benefícios educacionais se estendem para profissionais da

equipe interdisciplinar, 92% (24) familiares e responsáveis pelas crianças; e 81% (21) estudantes de graduação em saúde (Figura 34).

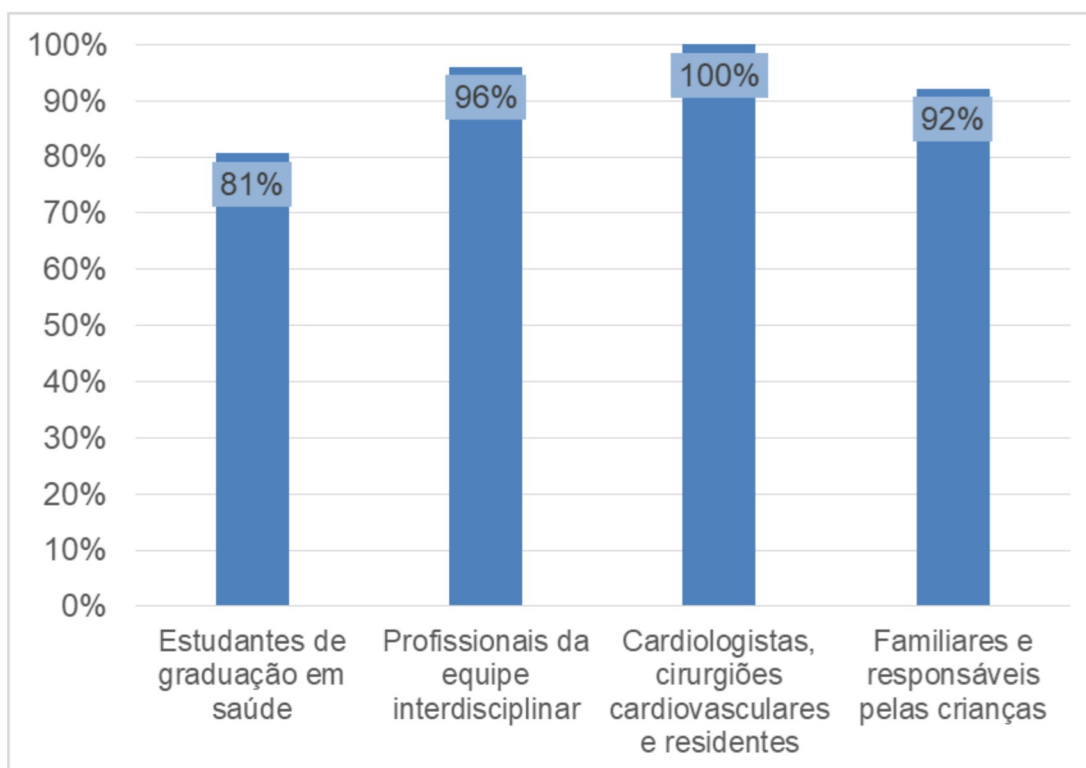


Figura 35. Opinião da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre os potenciais grupos beneficiados educacionalmente com a utilização de modelos de CC em imp3D. n = 26. CC: cardiopatias congênitas; imp3D: impressão 3D.

3.2.5 Percepções sobre o conjunto de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D

Os principais grupos temáticos identificados na análise dissertativa estão expressos na nuvem de palavras (Figura 36). Destacaram-se as percepções referentes ao tamanho das peças, possibilidade de impressão em cores, dificuldade de visualização de estruturas intracardíacas e sugestões para criação de modelos de doenças não contempladas nessa casuística.



Figura 36. Expressões da equipe de especialistas em cardiopediatria sobre o conjunto de modelos de CC em imp3D. Análise das contribuições

dissertativas utilizando a técnica de nuvem de palavras. CC: cardiopatias congênitas; imp3D: impressão 3D.

4. DISCUSSÃO

4.1 Modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D

A imp3D é um método de fabricação rápida de objetos sólidos a partir de arquivos digitais.⁽³⁹⁾ Nas últimas décadas, a evolução da tecnologia em combinação com a expiração das patentes industriais diminuiu os custos relacionados à equipamentos e insumos, tornando a imp3D amplamente disponível. Entretanto, devido ao *modus operandi* do processo de prototipagem, é necessário conhecimento técnico para o domínio desses dispositivos.⁽⁴⁰⁾

Na área médica, os modelos em imp3D vêm se popularizando como ferramentas visuais e tácteis facilitadoras do entendimento anatômico, sendo empregadas nos contextos clínico, educacional e experimental.⁽⁴¹⁾ A definição de diretrizes e a validação do método por sociedades científicas fornecem referências para a indicação, padronização técnica, manipulação de materiais e controle de qualidade; maximizando os benefícios da imp3D hospitalar.^(42–45)

As recomendações do *3D Printing Special Interest Group* (SIG) da *Radiological Society of North America* (RSNA) norteiam o processo de prototipagem desde a aquisição de imagens médicas, segmentação das áreas de interesse, tratamento dos dados, aperfeiçoamento em *software* de *design* 3D, criação do modelo digital, impressão, pós-impressão 3D, inspeção das peças, controle de qualidade e aplicações em cenários clínicos.⁽⁴⁶⁾ Toda a estrutura metodológica do presente trabalho foi baseada nas recomendações da RSNA (Figura 37).

para criar protótipos físicos híbridos possui o potencial de criar modelos mais representativas das cardiopatias complexas.^(48,49) Para otimizar a experiência educacional, a técnica híbrida (angioTC + ECO) foi aplicada em dois modelos desenvolvidos no projeto (DSAVT e *Truncus Arteriosus*).

Há particularidades no manejo da população pediátrica durante a realização de TC e RNM cardíacas. A menor capacidade de colaboração, necessidade de acompanhamento anestésico e transporte; maior frequência cardíaca, limitação de acessos venosos, dinâmica circulatória complexa, presença de dispositivos metálicos (*stents* e marcapassos), cirurgias prévias, reações ao contraste e nefrotoxicidade são situações que demandam cuidados específicos.^(50,51) Os riscos da exposição à radiação também são maiores nos pacientes jovens.^(52,53)

Diferente de outros órgãos que apresentam estruturas estáticas e possuem densidade muito maior que os tecidos adjacentes, o coração é um órgão dinâmico. Sua forma muda a cada fase do ciclo cardíaco, é rodeado por estruturas de consistência semelhante e rico em trabeculações. A etapa de segmentação cardíaca e seleção das áreas de interesse é laboriosa e depende da expertise de operadores capazes de dominar tanto a morfologia das CC quanto o processamento digital de imagens.⁽⁵⁴⁾

Apesar da importância para o planejamento e condução clínica das crianças com doenças cardíacas, a competência técnica para o processamento de imagens não faz parte da formação habitual do cardiologista e do cirurgião cardiovascular pediátrico. A iniciativa individual para domínio de todas as

etapas da prototipagem pode ser exaustiva. O trabalho em equipe foi um fator determinante para a execução do projeto.

O planejamento financeiro é fundamental para o desenvolvimento de um núcleo hospitalar de imp3D. O preço dos softwares pode chegar a mais de 10.000 euros (€) por licença anual, impressoras 3D de alto desempenho valores acima de €150.000 e insumos para impressão realística mais de €300/kg. A utilização de softwares gratuitos, impressoras 3D *desktop* e filamentos de baixo custo possibilitam a prototipagem de modelos com menor dispêndio de recursos, grande acurácia anatômica e efetiva aplicabilidade clínica.^(55,56)

Na presente pesquisa, a reprodutibilidade metodológica foi uma preocupação constante. Para garantir a aplicação da tecnologia mesmo em cenários de escassez de recursos, utilizamos a metodologia financeiramente acessível supracitada para amortizar os gastos com aplicativos, maquinário e insumos.

As estratégias de segmentação são baseadas no propósito do modelo final. Particularmente nas angioTC e RNM, a criação de modelos puramente vasculares (ex: CoAo, IAAo, TGA) é facilitada pela maior diferença de densidades entre o agente de contraste no sangue e os tecidos. Desenvolver modelos de CC focados no detalhamento da anatomia intracardíaca (ex: T4F, DSAV, AT) é mais difícil pois não existe contraste delimitando o miocárdico até a superfície epicárdica, há contraste somente dentro das câmaras, que representa o próprio volume da cavidade estudada (*blood pool*).⁽⁵⁷⁾

Uma alternativa para evidenciar o miocárdio e as estruturas intracardiácas é, após a geração do *blood pool*, criar-se digitalmente uma casca ou concha (*shell*) que circunda esse volume delimitado pelo agente de contraste. Essa camada pode ser ajustada de acordo com a espessura desejada e representará uma imagem negativa, como um molde, da face interna do coração. Ao fim, o *blood pool* inicial é eliminado e o modelo permanece vazio (*hollow*) representando com detalhes a anatomia intracardiáca.⁽⁵⁸⁾

Nos modelos desenvolvidos, quando o detalhamento da anatomia interna do coração era essencial ao entendimento morfológico da CC, projetamos janelas de observação na estrutura física dos protótipos para permitir a visibilização das superfícies endocárdicas, valvares e septais.

Também foi possível constatar que, reiterando a maior qualidade da angioTC para as estruturas extracardiácas e vasculares, os modelos de CC em imp3D que caracterizaram defeitos predominantemente extracardiácos como TGA, CoAo, SCEH, IAAo e *Truncus Arteriosus* foram mais bem avaliados pela equipe de especialistas do que os modelos físicos que representavam defeitos intracardiácos como CIV + PCA, T4F, DSAVT e AT.

Empresas de tecnologia têm avançado no uso da inteligência artificial para abreviar e automatizar o processo de segmentação, porém o custo hospitalar destas plataformas comerciais pode inviabilizar a criação de um serviço de imp3D em cenários de escassez de recursos.⁽⁵⁹⁾ Existem ferramentas gratuitas capazes de realizar a conversão da extensão DICOM em

extensões STL ou OBJ como o *InVesalius*[®], *3DSlicer*[®], *3DView*[®], *Horos*[®], *Image J*[®], *The Medical Imaging Interaction Toolkit*[®], *ITK Snap*[®] e *Seg3D*[®].^(60,61)

A utilização da ECO para modelagem 3D ainda está em aperfeiçoamento. Não há padronização entre os fabricantes sobre o formato de armazenamento das imagens, existem dificuldades na conversão dos arquivos para uma extensão DICOM editável pelos *softwares* de segmentação e ferramentas importantes para o processo só estão disponíveis mediante pagamento de licença anual. Esses fatores limitam a reprodução das valvas cardíacas nos modelos 3D de CC. Técnicas alternativas são capazes de representar o aparato valvar e subvalvar com baixo custo.^(62,63)

No presente trabalho, as valvas cardíacas foram segmentadas a partir de imagens de ECOTT 2D, modeladas digitalmente e inseridas no arcabouço estrutural dos casos de DSAVT (valva AV comum) e *Truncus Arteriosus* (valva truncal) – doenças as quais a caracterização valvar era fundamental para a compreensão da CC.

Após a etapa de segmentação, o volume 3D resultante pode ser trabalhado em *softwares* de design digital do tipo *computer aided design* (CAD) ou *computer aided manufacturing* (CAM). O processo de renderização permite editar, modelar, refinar, preencher, suavizar, inspecionar e corrigir falhas que possam impedir a correta interpretação dos dados pela impressora 3D.⁽⁶⁴⁾ *Softwares* gratuitos de modelagem 3D são por ex: *Meshmixer*[®] e *Blender*[®].

Os arquivos que contém o modelo digital em sua versão final (STL ou OBJ) são convertidos em comandos de programação por *softwares* chamados fatiadores (*slicers*). Os fatiadores são responsáveis por dividir o modelo em

centenas de camadas e, adicionados de comandos técnicos de impressão, traduzem os dados 3D em uma linguagem codificada (GCODE) para que a impressora execute a manufatura física da peça.⁽⁶⁵⁾ Fatiadores gratuitos são por ex: *PrusaSlicer*[®], *Cura*[®], *Craftware*[®], *Repetier*[®] e *Slic3r*[®].

A maioria das impressoras 3D comercialmente disponíveis são projetadas para a construção de modelos rígidos enquanto algumas são capazes de construir peças flexíveis. Três tecnologias de imp3D são mais comumente aplicadas em cardiologia:

A FDM utiliza filamentos termoplásticos rígidos que são aquecidos até seu ponto de fusão e extruídos do bico da impressora em múltiplas camadas. O material em contato com a temperatura ambiente é naturalmente resfriado, se solidifica e o processo é repetido até a conclusão da peça. Os filamentos PLA e *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS) são os mais utilizados e possuem características físicas próprias.⁽⁶⁶⁾

Na *Polyjet*, também por deposição de material por camadas, um polímero líquido é solidificado e maturado com o auxílio de luz ultravioleta. Esse processo permite a criação de protótipos complexos utilizando resinas multicoloridas e flexíveis.⁽⁶⁷⁾

A técnica *Inkjet* é a mais empregada na bioimpressão para a criação de órgãos e tecidos. Utiliza materiais de menor viscosidade como colágeno, fibrina e hidrogéis com mínima morte celular devido às baixas forças de cisalhamento e alta precisão na deposição dos biocompostos.⁽⁶⁸⁾

Idealmente, o material de impressão deveria ter propriedades físicas como consistência, elasticidade, força tênsil e resistência similar a dos tecidos

humanos. O uso de resinas fotopoliméricas na imp3D fornece propriedades próximas aos tecidos moles permitindo o emprego em simulações cirúrgicas e de procedimentos. Quando o propósito do modelo é unicamente a demonstração da anatomia cardíaca as impressoras padrão comercialmente disponíveis, que utilizam filamentos rígidos e possuem boa resolução de impressão, podem ser utilizadas.⁽⁶⁹⁾

No presente trabalho, a combinação FDM com PLA foi escolhida devido à facilidade de acesso, menor custo, riqueza descritiva na literatura médica e capacidade de gerar modelos com características físicas satisfatórias para fins educacionais (Figura 38).



Figura 38. Caracterização dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D desenvolvidos na pesquisa “Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D – potenciais aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica”. 1: AT; 2: IAAo; 3: TGA; 4: AP; 5: CIV com PCA; 6: CoAo; 7: T4F; 8: CIA; 9: SCEH; 10: DSAV; 11: CATVVPP e 12: *Truncus arteriosus*. AT: Atresia tricúspide; IAAo: Interrupção de arco aórtico; TGA: Transposição de grandes artérias; AP: atresia pulmonar; CIV: Comunicação interventricular; PCA: Persistência do canal arterial; CoAo: Coarctação de Aorta; T4F: Tetralogia de *Fallot*;

CIA: Comunicação interatrial; SCEH: Síndrome do coração esquerdo hipoplásico; DSAV: Defeito do septo atrioventricular; CATVVPP: Conexão anômala total de veias pulmonares.

A intersecção de conhecimentos entre a medicina, radiologia, *design* e a engenharia de produção demandam uma integração transdisciplinar para atingir uma relação tempo-qualidade custo efetiva. Em metanálise, Martelli *et al.* identificaram como principais desvantagens da imp3D hospitalar o custo, o tempo de preparação e a precisão das peças (diferenças entre o modelo computadorizado e o objeto físico).⁽⁷⁰⁾ A imp3D deve ser analisada com senso crítico ponderando suas aplicações além do escopo do entusiasmo inicial.⁽⁷¹⁾

Em artigo publicado em 2022, Bastawrous *et al.* discutiram os princípios básicos e desafios para a construção de uma infraestrutura para imp3D hospitalar. Definir a fonte de financiamento, determinar as necessidades de instalações, espaço e pessoal qualificado; delinear um fluxo de trabalho digital em concordância com as agências reguladoras e considerar como os registros médicos podem ser otimizados para facilitar o processo de manufatura, são pontos chave na implementação de um programa.⁽⁷²⁾

Gómez-Ciriza *et al.* descreveram sua experiência com a imp3D de modelos de CC de baixo custo. Com programas de código aberto, impressoras comerciais e materiais de preço acessível foram produzidos 138 modelos com custo médio de €85,7 por modelo. A maior parte dos gastos foi atribuída à segmentação e *design* 3D (valor das horas trabalhadas dos profissionais da equipe). A duração média de trabalho em cada fase foram: segmentação (62,2 min), CAD (73,2 min), impressão (13 h) e limpeza (36,7 min).⁽⁷³⁾

Lau *et al.* ao comparar modelos utilizando técnicas mais sofisticadas de imp3D com modelos de CC financeiramente acessíveis, concluíram que as peças de baixo custo apresentaram excelente correlação anatômica com a angioTC, equivalência na aplicabilidade clínica e custo médio cinco vezes menor. Porém, devido às limitações dos softwares gratuitos, o tempo de manufatura foi, em média, nove vezes maior (100 horas) limitando o uso da imp3D para o planejamento de casos urgentes.⁽⁷⁴⁾

De fato, os programas gratuitos disponíveis para segmentação cardíaca carecem de ferramentas avançadas (presentes em plataformas licenciadas) que poderiam tornar o processo semiautomático, abreviando a confecção dos modelos 3D de CC. De forma quase artesanal, a segmentação cardíaca de cada caso de CC representou, na presente pesquisa, a maior parte do tempo envolvido na fase de pré-impressão do modelo 3D.

Valverde relata que o cálculo do custo final de um protótipo deve levar em consideração todos os elos da cadeia produtiva e um baixo custo é essencial para que a tecnologia de imp3D hospitalar seja difundida. O autor criou modelos financeiramente acessíveis e com detalhamento suficiente para a aplicação clínica. Ao utilizar *softwares* gratuitos e impressoras domésticas, o custo dos modelos 3D se tornou a metade do valor, quando comparados com imp3D de alto rendimento, velozes e com maior qualidade de acabamento.⁽⁷⁵⁾

Sun *et al.* descreveram sua experiência em produzir modelos em imp3D paciente-específicos e de baixo custo. Foram manufaturados protótipos de doenças cardiovasculares, tumores de pulmão, mama e biliopancreáticos. As peças comprovaram seu valor clínico e educacional, demonstrando capacidade

em replicar tanto a anatomia quanto a patologia em diferentes partes do corpo.⁽⁷⁶⁾

Muitos fatores podem influenciar a acurácia dimensional das estruturas anatômicas impressas em 3D. Entre elas a qualidade das fases de aquisição, segmentação e pós processamento pelos *softwares* de imagem; a configuração dos parâmetros de fatiamento, a resolução da impressora e o tipo de filamento utilizado na imp3D.⁽⁷⁷⁾

Lee *et al.* investigaram a fidedignidade dos modelos impressos em 3D em replicar os defeitos congênitos comparando-os quantitativamente com os originais angiotomográficos. Múltiplos marcos anatômicos foram analisados e não se evidenciou diferença estatisticamente significativa. Houve excelente correlação anatômica ($r = 0,99$) e todas as diferenças foram menores que 0,5 mm (média de $0,21 \pm 0,37$ mm; diferença percentual média entre 0,4 e 0,9%), validando a precisão dos modelos de CC em imp3D.⁽⁷⁸⁾

Estudo multicêntrico internacional Valverde *et al.* concluíram que quando comparados quantitativamente aos exames de angioTC e RNM, os modelos de CC impressos em 3D foram capazes de replicar fidedignamente a anatomia cardíaca (diferença média de $0,27 \pm 0,73$ mm, $p=0,6$). Noventa e seis por cento dos cirurgiões cardíacos concordaram totalmente ou parcialmente que os modelos 3D propiciaram o melhor entendimento da morfologia das CC e auxiliaram o planejamento cirúrgico.⁽⁷⁹⁾

No *Children's Hospital of Philadelphia*, Ghosh *et al.* relataram o desenvolvimento e crescimento do serviço de modelagem 3D e realidade virtual aplicados ao planejamento cirúrgico. De 2018 a 2020, a demanda

triplicou e a modelagem 3D foi solicitada em mais de um quarto dos casos complexos (STAT *category* 3, 4 e 5) como adjuvante ao cuidado pré-operatório.⁽⁸⁰⁾ A rápida expansão da utilização da tecnologia por cirurgiões e intervencionistas, em um centro de grande volume, demonstra a importância dessas ferramentas.

No presente estudo, o conjunto de modelos de CC em imp3D desenvolvidos apresentaram-se fidedignos à anatomia da doença para a maior parte dos avaliadores.

Para Hadeed *et al.*, a precisão e a reprodutibilidade dos modelos de CC em imp3D também se aplicam para a prototipagem de casos de CC a partir de exames de TC de neonatos e lactentes.⁽⁸¹⁾ Averkin *et al.* relataram a experiência clínica com a utilização de um protótipo em imp3D de CC neonatal (T4F com síndrome de agenesia da valva pulmonar), onde o modelo físico possibilitou a elucidação da anatomia e foi capaz de direcionar o cirurgião cardiovascular pediátrico para o tratamento definitivo.⁽⁸²⁾

4.2 Caracterização dos avaliadores

Cada geração de pessoas é impactada pelos grandes acontecimentos mundiais, tecnologias e normas sociais, as quais dão forma às respostas, preferências e prioridades dos indivíduos em determinado espaço de tempo. O conceito de segmentação geracional se baseia na premissa de que grupos populacionais nascidos no mesmo contexto histórico possuem atitudes, valores, visões de mundo e de trabalho semelhantes.⁽⁸³⁾

Nas últimas décadas houve incorporação massiva de inovação à educação médica e difusão de plataformas para acesso e compartilhamento de informações. Mudanças que resultaram em diferenças marcantes entre educadores e estudantes em relação às suas preferências de ensino-aprendizagem.

Entender como as diferentes gerações compreendem o mundo, acessam e retêm informações, é imprescindível para um processo educacional efetivo. Cada estrato geracional possui características próprias: *baby boomers* (nascidos entre 1946-1964), geração X (nascidos entre 1965-1980), *millenials*/geração Y (nascidos entre 1981-1995) e geração Z (nascidos entre 1996-2012).⁽⁸⁴⁾ O uso de novas tecnologias e a criação de um ambiente de aprendizagem dinâmico, em sinergia com a era digital, deve ser estimulado.⁽⁸⁵⁾

Neste trabalho, 50% dos avaliadores consideraram nulo o próprio grau de conhecimento sobre a utilização da imp3D na área médica sendo que, mais da metade possuía cinco anos ou mais de atuação na área da cardiologia pediátrica. Representantes das gerações *baby boomers* e X são menos

habituaados a lidar com as múltiplas formas de tecnologia, eletrônica e mídia digital.⁽⁸⁶⁾

Em estudo internacional publicado, em 2020, Illman *et al.* avaliaram o grau de conhecimento dos cardiologistas pediátricos sobre a imp3D. Dos 71 entrevistados, menos da metade tinha acesso à tecnologia de imp3D. No entanto, 85% (60/71) concordaram que os modelos paciente-específicos são uma ferramenta útil no manejo das crianças com CC e 80% (48/60) desses afirmaram que os protótipos físicos facilitam a comunicação com os colegas.⁽⁸⁷⁾

4.3 Potenciais aplicações dos modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica

No livro “*Sete lições complexas para a educação do futuro*”, Edgar Morin afirma que o conhecimento pertinente deve confrontar a complexidade. A complexidade existe sempre que vários elementos que compõe um todo são inseparáveis. A hiperespecialização nos mantém longe de enxergar o todo (“*que se fragmenta*”) e o essencial (“*que se dissolve*”). Nos afasta de lidar corretamente com problemas específicos que não podem ser atingidos e pensados fora de contexto.⁽⁸⁸⁾

Um conhecimento ou habilidade “*é significativa*” se tem valor para o aprendiz e aplicação direta em seu futuro. Um conhecimento ou habilidade “*faz sentido*” quando é compreensível. Elas devem se encaixar dentro do entendimento de mundo do indivíduo mais do que apenas serem memorizadas como fragmentos desconexos da experiência prévia.⁽⁸⁹⁾

Conceitos em cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica são cotidianamente compartilhados por um grupo heterogêneo de estudantes, residentes, intensivistas, cardiologistas, cirurgiões, enfermeiros, fisioterapeutas, técnicos de enfermagem, familiares e até os próprios pacientes. Dada a natureza diversa dos aprendizes é importante conhecer seus contextos e trajetórias de forma a assegurar que o que está sendo ensinado tenha um forte senso de propósito.⁽⁹⁰⁾

Na presente pesquisa, 96% dos especialistas concordaram totalmente ou parcialmente que a dificuldade de visualização espacial é um dos principais obstáculos na compreensão das CC.

A habilidade de visualização espacial é a capacidade cognitiva de entender e manipular mentalmente objetos conceituais, usando a memória para forma e posição, entendendo a relação entre os objetos no espaço. Seu desenvolvimento é capaz de gerar vantagens educacionais em ciências e podem ser úteis em anatomia e habilidades motoras na área de saúde.⁽⁹¹⁾

A anatomia é quase sempre uma das disciplinas mais difíceis para os estudantes de graduação devido à sua complexidade espacial. Em metanálise publicada por Flemming *et al.*, a utilização de modelos impressos em 3D demonstrou impacto positivo nos escores de conhecimento anatômico dos estudantes de medicina.⁽⁹²⁾ Em nosso estudo, mais de 80% dos avaliadores referem que os modelos de CC impressos em 3D podem ser adjuvantes na educação e ensino de estudantes de graduação.

Karsenty *et al.*, em ensaio clínico randomizado, avaliaram a efetividade dos modelos de CC impressos em 3D como auxiliares no ensino das CC mais prevalentes. Quando comparados ao grupo controle, tanto o conhecimento objetivo quanto a satisfação dos estudantes de medicina foram maiores no grupo exposto aos modelos impressos. A possibilidade de compartilhamento e manipulação das peças influenciaram positivamente as avaliações.⁽⁹³⁾

Su *et al.* afirmam que, na educação médica, os modelos em imp3D levam vantagem sobre outras ferramentas pedagógicas pela sua maior capacidade de visibilização espacial e estrutural, além da possibilidade de

personalização das peças para fins educacionais. Em sua casuística, os modelos de CC impressos em 3D foram mais efetivos que as demais estratégias nos quesitos aquisição de conhecimento e conceitualização estrutural.⁽⁹⁴⁾

Ao combinar a tecnologia de imp3D com o método *Problem-Based Learning* (PBL) no ensino dos fundamentos da cirurgia cardiovascular pediátrica, Tan *et al.* concluíram que os estudantes de enfermagem expostos aos modelos 3D obtiveram maiores escores nos quesitos conhecimento teórico, raciocínio clínico, autoavaliação de habilidades e satisfação com o ensino quando comparados ao grupo controle.⁽⁹⁵⁾

Smerling *et al.* identificaram forte correlação positiva na aquisição de conhecimento pelos estudantes de medicina à medida que os modelos impressos em 3D representaram CC mais complexas. Para os estudantes, os protótipos de T4F, TGA e SCEH os deixaram mais seguros em explicar a anatomia cardíaca. Os autores concluíram que os modelos físicos deveriam ser incluídos na educação em cardiologia pediátrica, particularmente nas lesões que requerem um entendimento espacial mais complexo.⁽⁹⁶⁾

Portanto, as experiências educacionais apresentadas são convergentes com a avaliação de 96% da equipe de especialistas que concordaram que os modelos de CC em imp3D são capazes de motivar o estudo das CC (Figura 39).



Figura 39. Conjunto de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D desenvolvidos na pesquisa “Desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D – potenciais aplicações no ensino da cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica”.

A unidade de terapia intensiva em cardiologia pediátrica (UTICardioPed) exerce papel central na atenção aos neonatos, crianças e até mesmo adultos com CC. Os cuidados a essa população requerem abordagem colaborativa de profissionais com diferentes habilidades, que compartilham conhecimentos e experiências.⁽⁹⁷⁾ Visando os melhores resultados, valores sólidos devem nortear as relações interprofissionais para promover equidade no tratamento aos pacientes.⁽⁹⁸⁾ A educação continuada da equipe é uma parte vital do programa e o treinamento deve ser constante.^(99–101)

Lee e Young Lee reconhecem que, para um suporte efetivo aos pacientes, toda o time precisa compreender as características das CC. Ao promover seminários educacionais *hands-on* com modelos de CC em imp3D para médicos especialistas, médicos residentes, enfermeiros e perfusionistas os pesquisadores observaram melhor entendimento subjetivo da anatomia, fisiopatologia e da cirurgia proposta, reiterando o valor da imp3D como ferramenta educacional para a equipe.⁽¹⁰²⁾

Simulações realísticas utilizando modelos em imp3D podem ser efetivos no treinamento dos profissionais da UTICardioPed. Olivieri *et al.* avaliaram a utilização de protótipos específicos dos pacientes na passagem interdisciplinar a beira leito (*patient handover*) de casos submetidos à cirurgia cardiovascular pediátrica. Foi constatada maior aquisição nos domínios entendimento, capacitação clínica, familiaridade com a cirurgia realizada e habilidade para o manejo do paciente – sendo o benefício maior nos casos complexos.⁽¹⁰³⁾

Em trabalho posterior, no mesmo cenário clínico de passagem de caso após cirurgia, Olivieri *et al.* observaram que apesar do maior custo, os modelos de CC em imp3D foram preferidos pela equipe interdisciplinar quando comparados aos modelos virtuais expostos em tablet.⁽¹⁰⁴⁾

Biglino *et al.* avaliaram o emprego de modelos de CC impressos em 3D em um curso especializado para enfermeiros. Os participantes consideraram os modelos físicos mais informativos que os diagramas e relataram que as peças ajudaram na apreciação da anatomia, visualização espacial e entendimento pós-cirúrgico. Sugeriram ainda um maior tempo de exposição com às peças

impressas, capacitação pedagógica dos professores e o uso de cores/tarjas para destacar as lesões.⁽¹⁰⁵⁾

Em congruência com a literatura, para 96% dos avaliadores os modelos de CC em imp3D desenvolvidos nessa tese podem ser adjuvantes na educação e ensino da equipe interdisciplinar.

A cardiologia e a cirurgia cardiovascular pediátrica são áreas médicas dedicadas ao cuidado de crianças graves. A rotina com situações limítrofes pode expor os residentes e *fellows* a altos níveis de estresse e ansiedade. Estimulados a falar sobre as expectativas no início do programa de especialização 83% dos *trainees* do *Boston Children's Hospital* consideraram que as possíveis dificuldades na aquisição de habilidades e competências clínicas são um dos maiores medos na nova etapa profissional.⁽¹⁰⁶⁾

Nesta população, diversos fatores estressores estão, em parte, ligados à necessidade de rápida assimilação de conhecimentos e competências clínicas às quais os *trainees* não tiveram exposição adequada durante a residência médica.⁽¹⁰⁷⁾ O desenvolvimento de currículos em cardiologia pediátrica baseados em simulação, que incorporem o uso de novas tecnologias educacionais, tem o potencial de qualificar as habilidades dos residentes na condução das crianças com doenças cardíacas.^(108,109)

Costello *et al.* propuseram o uso de modelos de CC em imp3D no currículo de treinamento médico em terapia intensiva pediátrica. Utilizando protótipos físicos, os residentes foram submetidos a um seminário estruturado baseado em simulação de um caso de CIV. Usando essa estratégia pedagógica os residentes apresentaram maiores escores de aquisição de

conhecimento ($p=0,0082$), capacidade de conceitualização estrutural ($p<0,0001$) e habilidade de manejar complicações pós-operatórias.⁽¹⁰⁹⁾

De forma semelhante, White *et al.* estudaram o impacto dos modelos de CC em imp3D durante as sessões didáticas de residentes médicos e concluíram que a incorporação curricular desta tecnologia aumenta o entendimento das doenças, particularmente, nas lesões mais complexas.⁽¹¹⁰⁾

A cirurgia cardiovascular pediátrica pode ser considerada o estado da arte na medicina cirúrgica. Devido à natureza vital do órgão, a delicadeza das estruturas, complexidade e variabilidade de apresentações, o cirurgião deve ser capaz de executar operações com grande proficiência técnica e estar apto a lidar com cenários extremos.

Atualmente, por várias razões, acervos de espécimes de corações pediátricos patológicos se tornaram um recurso acadêmico escasso e precioso. Nesse cenário a imp3D desponta como uma alternativa para que o *trainee* possa manusear, orientar, descrever e identificar estruturas fundamentais; uma habilidade essencial para o cirurgião cardiovascular pediátrico que será várias vezes confrontado por anatomias não completamente elucidadas nos estudos pré-operatórios.⁽¹¹¹⁾

A simulação permite que os aprendizes de cirurgia possam praticar e desenvolver competências fora do campo cirúrgico, em ambiente isento de riscos para os pacientes. Modelos impressos em 3D com polímeros flexíveis e moldados em silicone permitem simulação realística de cirurgias. O material é capaz de mimetizar a fragilidade dos tecidos vivos e permite replicar os passos

cirúrgicos até mesmo de operações complexas, como a operação de *Norwood*.⁽¹¹²⁾

Gang Nam *et al.* avaliaram o impacto da simulação utilizando modelos realísticos de T4F em imp3D no desenvolvimento da habilidade cirúrgica de jovens cirurgiões. Foi possível constatar que ao longo do treinamento os cirurgiões diminuíram o tempo de execução de etapas como o fechamento da CIV e a aplicação do *patch* na via de saída do ventrículo direito, melhorando progressivamente seus escores de proficiência geral de $28,58 \pm 7,89$ para $67,33 \pm 15,1$ ($p=0,008$).⁽¹¹³⁾

Yoo *et al.* relataram que oportunidades de simulação *hands-on* usando modelos flexíveis de corações em imp3D podem revolucionar o treinamento cirúrgico. Os autores descreveram sessões nos Estados Unidos, Canadá e Coréia do Sul envolvendo 81 cirurgiões e *trainees* e concluíram que a incorporação dessa estratégia nos programas de formação é plausível, permite a prática em modelos realísticos, sem riscos aos pacientes e pode encurtar o período de treinamento em cirurgia cardiovascular pediátrica.⁽¹¹⁴⁾

No cenário de simulação *hands-on* com modelos de CC em imp3D, Hussein *et al.* validaram ferramentas para avaliar a performance técnica nas etapas da operação de *Norwood*. O treinamento estruturado das habilidades cirúrgicas trouxe aos cirurgiões participantes da pesquisa maior capacidade técnica, corroborando o valor dos protótipos no treinamento cirúrgico.⁽¹¹⁵⁾

Peel *et al.* descreveram a criação de modelos de CC em imp3D em silicone, para simulação cirúrgica. Os segmentos cardíacos “ocos” foram impressos, os moldes preenchidos com silicone e unidos com agente adesivo,

possuindo diferentes cores e níveis de rigidez. Testados para simulação da técnica de *arterial switch*, os protótipos apresentaram excelente detalhamento anatômico, elasticidade e resistência. Os cirurgiões consideraram os modelos realísticos ao cortar os vasos, suturar e excisar os botões coronarianos.⁽¹¹⁶⁾

Hoashi *et al.* criaram modelos de CC em imp3D para simulação cirúrgica pré-operatória de casos complexos. O cirurgião praticou as operações nos protótipos antes de operar os pacientes reais: *arterial switch*, *Senning*, *Rastelli*, *Damus-Keye-Stanzel*, *Norwood*, unifocalização de artérias pulmonares, tunelização intraventricular etc. As peças impressas mostraram grande utilidade na simulação e planejamento pré-operatório, especialmente no entendimento das relações espaciais intracardiácas.⁽¹¹⁷⁾

Tiwari *et al.* estudaram o impacto da imp3D na tomada de decisão cirúrgica em casos complexos de CC. Foram selecionados casos em que, após discussão clínica utilizando os exames complementares tradicionais (ECO, cateterismo e angioTC), não houve consenso em relação à conduta (“cirurgia corretiva” x “palição”). Após a exposição às peças houve mudança de decisão na condução de 80% dos casos. Os pacientes operados tiveram boa recuperação pós-operatória, sem complicações durante o seguimento.⁽¹¹⁸⁾

Modelos 3D também podem ser empregados no treinamento de procedimentos hemodinâmicos. Brunner *et al.* desenvolveram um módulo de treinamento em cardiologia intervencionista empregando modelos de coração normal e de CC em imp3D. Foi possível ensinar várias etapas dos procedimentos, assim como praticá-los repetidamente, diminuindo o tempo de fluoroscopia e a confiança dos aprendizes na execução da técnica.⁽¹¹⁹⁾

Ma *et al.* relataram as aplicações da imp3D no planejamento de procedimentos percutâneos como troca de valva aórtica transcater (TAVR), ablação por radiofrequência da fibrilação atrial, oclusão de apêndice atrial esquerdo e ablação transmiocárdica percutânea por radiofrequência na cardiomiopatia hipertrófica.⁽¹²⁰⁾

Corroborando os relatos da literatura descritos, todos os avaliadores concordaram que cardiologistas, cirurgiões cardiovasculares e residentes podem ser educacionalmente beneficiados com a utilização dos modelos de CC em imp3D desenvolvidos na pesquisa.

CC são condições crônicas de saúde que afetam os pacientes desde a infância até a vida adulta. A complexidade das doenças, hospitalizações prolongadas, gravidade no período neonatal, múltiplas abordagens cirúrgicas, entre outros fatores, podem tornar a comunicação e o estabelecimento de uma relação de confiança entre a equipe médica, familiares e pacientes um verdadeiro desafio.

Para os pais, durante as consultas, há um componente emocional extra de ansiedade, expectativas e estresse. Para os filhos, o processo é particularmente delicado à medida que as crianças com CC se tornam adolescentes e adultos jovens.⁽¹²¹⁾

Em estudo realizado em 2021, na Espanha, Garcia *et al.* aferiram o grau de entendimento dos pais sobre a doença dos filhos e dos pacientes sobre a própria condição cardíaca. Os pesquisadores concluíram que a maior parte dos pais desconhecem os aspectos básicos da doença dos filhos e a maior parte dos pacientes desconhecem os fundamentos da própria cardiopatia. Esforços

devem ser dirigidos para educar essa população de maneira ilustrativa e atingir um comportamento colaborativo em prol do tratamento.⁽¹²²⁾

Grandes avanços foram atingidos no diagnóstico e tratamento cirúrgico das malformações cardíacas e, como consequência aos melhores resultados no período neonatal, mais pacientes com CC têm atingido a vida adulta. Este deslocamento positivo nas curvas de sobrevivência inaugurou uma nova categoria: a dos adultos portadores de CC (*grown-up congenital heart disease - GUCH*), cuja prevalência no mundo é estimada em quatro para 1000 habitantes.⁽¹²³⁾

No grupo de adultos com CC, a imp3D desponta como uma das novas tecnologias que podem auxiliar o entendimento fisiopatológico, a tomada de decisão, planejar intervenções e otimizar a comunicação com os próprios pacientes. Ainda, promove uma percepção realística em situações em que o tipo e a estratégia de intervenção não poderiam ser definidos apenas com os recursos habituais.⁽¹²⁴⁾

Estudo realizado na Inglaterra avaliou o impacto do uso de modelos de CC em imp3D durante as consultas com adolescentes de 15 a 18 anos. Com o objetivo de melhorar a comunicação, os pacientes foram apresentados ao modelo 3D impresso de seu próprio coração. Houve ganho significativo na confiança em explicar a própria condição ($p=0.008$), no grau de conhecimento sobre a doença ($p=0.005$) e nível de satisfação com a consulta ($p=0.005$). A análise dos feedbacks revelou, porém, que 30% dos adolescentes referiram maior ansiedade com a própria condição ao serem expostos às peças.⁽¹²⁵⁾

Biglino *et al.* avaliaram o potencial dos modelos paciente-específicos em facilitar a compreensão dos pais durante as consultas. A análise dos feedbacks identificou que: 1 - as imagens médicas são difíceis de interpretar, 2 - os modelos em imp3D são de rápida compreensão, 3 – podem chocar à primeira vista quando percebem que se trata da anatomia de seus filhos, 4 – estimulam a curiosidade e 5 - podem ser especialmente úteis no momento do diagnóstico inicial. Os autores concluíram que as peças otimizaram a comunicação e impactaram positivamente na aceitação psicológica do tratamento.⁽¹²⁶⁾

Awori *et al.* compararam a efetividade de sessões educacionais utilizando estratégias tradicionais, modelos digitais e modelos de CC em imp3D para pais e membros da equipe clínica. Os participantes obtiveram maior entendimento com os modelos físicos quando comparados ao tradicional e, entre as mídias, os modelos físicos foram mais bem avaliados do que os digitais ($p=0.001$). Os médicos relataram que os protótipos são úteis para educação dos pais e não atrapalharam o fluxo clínico de atendimento.⁽¹²⁷⁾

Utilizar os modelos impressos em 3D como recurso adjuvante na educação de familiares e responsáveis pelas crianças foi uma importante estratégia empregada nas casuísticas descritas. Na presente pesquisa, 92% dos integrantes da equipe de especialistas referiram que familiares e responsáveis pelas crianças podem ser educacionalmente beneficiados com a utilização de modelos de CC em imp3D.

Em estudo bibliométrico, Van den Eynde *et al.* investigaram as características dos 100 artigos mais influentes em CC publicados entre 2000 e 2020. Os estudos foram mais comumente realizados por grupos americanos e

publicados nos periódicos *Circulation*, JACC e JTCVS. Os temas mais abordados foram T4F, CIA, período neonatal, operação de *Fontan* e cirurgia cardiovascular. É possível verificar que, entre os 100 artigos mais influentes listados, nenhum se referia diretamente à educação e ensino em cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica.⁽¹²⁸⁾

Iniciativas educacionais baseadas em plataformas *online* de ensino e compartilhamento de informações como a *Heart University*, *Congenital Heart Academy* e a *World University for Pediatric and Congenital Heart Surgery* se consolidaram sob a chancela das principais sociedades de cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica internacionais.⁽¹²⁹⁾

O *Virtual Atlas*, um atlas virtual de morfologia cardíaca congênita, está sendo elaborado pela *International Society for Nomenclature of Paediatric and Congenital Heart Disease* (ISNPCHD).*

A *3D Heart Library* é uma coleção de reproduções digitais anatômicas de CC provenientes de exames de imagem. Nessa plataforma é possível fazer o *download* em STL e realizar a impressão 3D.† Essa iniciativa é parte da *NIH 3D Print Exchange* – uma biblioteca digital americana atrelada ao *National Institutes of Health/U.S. Department of Health and Human Services*.

* International Society for Nomenclature of Paediatric and Congenital Heart Disease [Internet]. Virtual Atlas. [acesso em 21 nov. 2022]. Disponível em: <https://ipccc.net/archiving-working-group-awg/>

† National Institute of Allergy and Infectious Diseases [Internet]. NIH. 3D. The 3D Print Exchange (3DPX) is now NIH 3D! [acesso em 18 nov. 2022]. Disponível em: <https://3d.nih.gov/>

4.4 Limitações

Exames de angioTC de excelente qualidade são o primeiro passo do processo de prototipagem. Porém, a angioTC nem sempre é o exame complementar de escolha, adequado ou necessário de forma absoluta ao diagnóstico e manejo de todas as CC.

Isso implica que existem condições menos complexas como a CIV, CIA e PCA que, por sí, não tem indicação de estudo imaginológico avançado. Existem também condições patológicas graves como a TGA e SCEH em que a abordagem neonatal não deve ser retardada por investigações que não sejam extremamente necessárias, sob o risco de degeneração das condições clínicas da criança.

Diante do exposto, para o desenvolvimento dos modelos de CC em imp3D propostos, nas doenças cuja propedêutica habitual dispensa a realização de TC, realizamos busca ativa no acervo da CardioPedBrasil® pelos raros conjuntos de imagens de lactentes e neonatos cardiopatas que foram submetidos a exame de angioTC com protocolo cardíaco para investigação de outras morbidades associadas.

Como ex: um lactente portador de CIV e síndrome genética, com sintomas digestivos e respiratórios obstrutivos, que realizou TC para investigação de artéria subclávia direita aberrante ou duplo arco aórtico; uma criança com CIA submetida à angioTC para investigação de conexão anômala parcial de veias pulmonares supracardiaca; lactente apresentando DSAVT com arco aórtico a direita com artéria subclávia esquerda aberrante e suspeita de anel vascular; paciente portador de TGA com estenose pulmonar submetida

anteriormente a dois shunts sistêmico pulmonares, que realizou TC para planejar a próxima etapa cirúrgica.

As imagens selecionadas foram trabalhadas para eliminar as condições adversas, destacando apenas as lesões de interesse educacional.

De forma semelhante, não foi possível confeccionar o modelo de coração normal pois crianças com coração normal não realizam angioTC com protocolo cardíaco.

O trabalho em equipe foi fundamental para o sucesso do projeto. A seleção das imagens do acervo foi realizada por uma radiologista cardiovascular pediátrica, a segmentação por um biomédico habilitado em radiologia e diagnóstico por imagem, o *design* digital pelo autor sob orientação de um designer 3D; o fatiamento, configuração dos parâmetros de impressão e impressão realizados pelo autor sob orientação de um engenheiro da computação e a pós-impressão, realizada pelo autor com o auxílio de um cardiologista pediátrico com experiência em prototipagem.

Sem a contribuição transdisciplinar, a busca incessante por qualificação e realização de diversos cursos online para domínio técnico dos *softwares*, a conclusão dessa pesquisa seria bastante dificultada.

A nuvem de palavras identificou sugestões que foram recorrentes na percepção da equipe de especialistas:

a) Tamanho das peças

Os modelos foram inicialmente concebidos para ter as dimensões do coração neonatal, oferecendo ao público noção espacial semelhante à do cirurgião durante uma operação. Os avaliadores sugeriram que o incremento

no tamanho das peças poderia maximizar a compreensão, principalmente, dos residentes, estudantes de graduação, profissionais não-médicos e familiares das crianças.

b) Cores

O maquinário utilizado para manufatura das peças foi uma impressora 3D *desktop* com apenas um bico extrusor, o que limita a impressão ao uso de um tipo de filamento e cor por vez. Depois de testes de contraste e conforto visual, optamos pela cor branca como padrão de impressão. Segundo os avaliadores, a experiência educacional poderia ser otimizada se os defeitos caracterizadores das doenças fossem destacados em cor diferente.

c) Visibilização de estruturas intracardiácas

Todos os protótipos foram desenvolvidos a partir de angioTCs, que por característica intrínseca ao método, possuem excelente definição vascular arterial e venosa. Isso facilitou o desenvolvimento dos modelos representativos das doenças em que os principais atributos definidores são extracardiácos: TGA, CoAo, SCEH, AP, CATVVPP e IAAo.

Para caracterização intracardiáca a RNM é reconhecidamente mais acurada que a TC. Porém, com a metodologia aplicada e as limitações dos *softwares* gratuitos, não foi possível segmentar imagens de RNM nem criar modelos híbridos unindo TC e RNM. Ainda, nenhuma das doenças selecionadas tem indicação formal de RNM para conclusão diagnóstica, limitando o acervo institucional para doenças não contempladas nesse trabalho.

As doenças cujas lesões valvares eram determinantes para a compreensão como o DSAVT e o *Truncus Arteriosus* foram um desafio à parte. Não foi possível, em nossa pesquisa, utilizar as imagens de ECO3D como fonte para segmentação. A alternativa encontrada foi modelar em *design* digital, a partir de imagens de ECOTT 2D do acervo, a valvas atrioventricular comum e a valva trunca e posteriormente inserí-las nas estruturas dos modelos digitais de DSAVT e *Truncus Arteriosus*.

Esta estratégia foi aceitável porque o intuito dos modelos desenvolvidos nessa pesquisa foi puramente educacional. Não seria adequada se a prototipagem tivesse como fim a tomada de decisão clínica ou planejamento cirúrgico, em que a fidedignidade absoluta com o caso índice é desejada.

4.5 Perspectivas futuras

Após a consolidação de todas as fases de prototipagem descritas na tese o custo de um box educacional com os 12 modelos corresponderá, para o público final, uma fração do valor investido na pesquisa. Os modelos poderão ser utilizados para estudo individual ou compartilhadas em diversos cenários por profissionais, estudantes, familiares e pacientes.

O domínio técnico adquirido nesta pesquisa possibilitará a continuidade do projeto. Um box educacional expandido poderá incluir doenças não contempladas na atual versão como a anomalia de *Ebstein*, duplo arco aórtico, janela aortopulmonar, origem anômala da artéria coronária esquerda a partir do tronco pulmonar; além dos diversos subtipos das doenças já incluídas nessa versão como IAAo A, IAAo B, *Truncus Arteriosus* tipo 2, *Truncus Arteriosus* tipo 3, outras formas de AT, AP etc.

Com os arquivos digitais finalizados nesta tese será possível, com mais recursos, insumos e maquinário imprimir os modelos em material flexível e testar sua aplicabilidade em treinamento e simulação cirúrgica.

4.6 Considerações finais

Nos países de baixa renda o acesso a serviços básicos de saúde para as crianças ainda é precário. Mesmo quando a cirurgia cardiovascular pediátrica é realizada em tempo hábil os desfechos são influenciados pela baixa qualidade da condução pós-operatória, culminando em alta morbimortalidade. Em cenários de escassez de recursos, o desenvolvimento educacional e treinamento dos profissionais de saúde é imperativo antes mesmo da implantação de novos programas.⁽¹³⁰⁾

O nosso grupo acredita que o conjunto de modelos de CC em imp3D desenvolvidos nessa pesquisa têm o potencial de ajudar a fomentar a educação em cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica no Brasil.

A educação é e deve ser, sempre, o objetivo de todos os esforços para qualificar os recursos humanos que lidam com os pacientes portadores de CC.

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de modelos de cardiopatias congênitas em impressão 3D é factível e, após análise por equipe de especialistas, demonstrou potencial para aplicação no ensino de cardiologistas, cirurgiões cardiovasculares, residentes, profissionais da equipe interdisciplinar, estudantes de graduação, familiares e responsáveis pelas crianças.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GBD 2017 Congenital Heart Disease Collaborators. Global, regional, and/ national burden of congenital heart disease, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet Child Adolesc Health* 2020;4(3):185-200. DOI: 10.1016/S2352-4642(19)30402-X.
2. Vervoort D, Cardarelli M. The global unmet need of congenital cardiac care: a quantitative analysis of the global burden of disease. *Cardiol Young* 2020;30(11):1688-1693. DOI: 10.1017/S1047951120002577.
3. Pinto Júnior VC, Fraga MNO, Freitas SM, Croti UA. Regionalization of Brazilian pediatric cardiovascular surgery. *Braz J Cardiovasc Surg* 2013;28(2):256–62. DOI: 10.5935/1678-9741.20130036
4. Zheleva B, Atwood JB. The invisible child: childhood heart disease in global health. *Lancet* 2017;389(10064):16-18. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)32185-7.
5. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online* 2016;15(1):115. DOI: 10.1186/s12938-016-0236-4.
6. Meyer-Szary J, Luis MS, Mikulski S, Patel A, Schulz F, Tretiakow D, *et al*. The role of 3D printing in planning complex medical procedures and training of medical professionals-cross-sectional multispecialty review. *Int J Environ Res Public Health* 2022;19(6):3331. DOI: 10.3390/ijerph19063331.

7. El Sabbagh A, Eleid MF, Al-Hijji M, Anavekar NS, Holmes DR, Nkomo VT, *et al.* The various applications of 3D printing in cardiovascular diseases. *Curr Cardiol Rep* 2018;20(6):47. DOI: 10.1007/s11886-018-0992-9.
8. VanKoeveering KK, Hollister SJ, Green GE. Advances in 3-Dimensional Printing in otolaryngology: a review. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg* 2017;143(2):178-183. DOI: 10.1001/jamaoto.2016.3002.
9. Francoisse CA, Sescleifer AM, King WT, Lin AY. Three-dimensional printing in medicine: a systematic review of pediatric applications. *Pediatr Res* 2021;89(3):415-425. DOI: 10.1038/s41390-020-0991-6.
10. International Society for Nomenclature of Paediatric and Congenital Heart Disease [Internet]. IPCCC/ICD-11 Download – ISNPCHD. [acesso em 21 nov. 2022]. Disponível em: <https://ipccc.net/ipccc-download-form/>
11. Langlois J, Bellemare C, Toulouse J, Wells GA. Spatial abilities and anatomy knowledge assessment: a systematic review. *Anat Sci Educ* 2017;10(3):235-241. DOI: 10.1002/ase.1655.
12. Letrud K, Hernes S. Excavating the origins of the learning pyramid myths. *Cogent Education* 2018;5(1):1-17. DOI: 10.1080/2331186x.2018.1518638.
13. Cox T, Columbus C, Higginbotham J, Ahmed K. How people learn: insights for medical faculty. *Proc (Bayl Univ Med Cent)* 2024;37(1):172. DOI: 10.1080/08998280.2023.2278970.

14. Torralba KD, Doo L. Active Learning Strategies to Improve Progression from Knowledge to Action. *Rheum Dis Clin North Am* 2020;46(1):1-19. DOI: 10.1016/j.rdc.2019.09.001.
15. Taylor DCM, Hamdy H. Adult learning theories: Implications for learning and teaching in medical education: AMEE Guide No. 83. *Med Teach* 2013;35(11):1561-1572. DOI: 10.3109/0142159x.2013.828153.
16. Titley HK, Brunel N, Hansel C. Toward a neurocentric view of learning. *Neuron* 2017;95(1):19. DOI: 10.1016/j.neuron.2017.05.021.
17. van Kemenade BM, Seymour K, Wacker E, Spitzer B, Blankenburg F, Sterzer P. Tactile and visual motion direction processing in hMT+/V5. *Neuroimage* 2013;1(84):420-427. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.09.004.
18. Leisman G. On the Application of Developmental Cognitive Neuroscience in Educational Environments. *Brain Sci* 2022;12(11). DOI:10.3390/brainsci12111501.
19. 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):1258-1265. DOI: 10.1007/s00246-019-02146-8.
20. Ghosh SK. Cadaveric dissection as an educational tool for anatomical sciences in the 21st century. *Anat Sci Educ* 2017;10(3):286-299. DOI: 10.1002/ase.1649.

21. Kiraly L, Kiraly B, Szigeti K, Tamas CZ, Daranyi S. Virtual museum of congenital heart defects: digitization and establishment of a database for cardiac specimens. *Quant Imaging Med Surg* 2019;9(1):115-126. DOI: 10.21037/qims.2018.12.05.
22. Estai M, Bunt S. Best teaching practices in anatomy education: A critical review. *Ann Anat* 2016;208:151-157. DOI: 10.1016/j.aanat.2016.02.010.
23. Yammine K, Violato C. The effectiveness of physical models in teaching anatomy: a meta-analysis of comparative studies. *Adv Health Sci Educ Theory Pract* 2016;21(4):883-95. DOI: 10.1007/s10459-015-9644-7.
24. Asif A, Lee E, Caputo M, Biglino G, Shearn AIU. Role of 3D printing technology in paediatric teaching and training: a systematic review. *BMJ Paediatr Open* 2021;5(1):e001050. DOI: 10.1136/bmjpo-2021-001050.
25. 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.
26. Loke YH, Harahsheh AS, Krieger A, Olivieri LJ. Usage of 3D models of tetralogy of Fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease. *BMC Med Educ* 2017;17(1):54. DOI: 10.1186/s12909-017-0889-0.
27. Fleming C, Sadaghiani MS, Stellon MA, Javan R. Effectiveness of three-dimensionally printed models in anatomy education for medical students and resident physicians: systematic review and meta-analysis. *J Am Coll Radiol* 2020;17(10):1220-1229. DOI: 10.1016/j.jacr.2020.05.030.

28. Alshomer F, AlFaqeeh F, Alariefy M, Altweijri I, Alhums T. Low-cost desktop-based three-dimensional-printed patient-specific craniofacial models in surgical counseling, consent taking, and education of parent of craniosynostosis patients: a comparison with conventional visual explanation modalities. *J Craniofac Surg* 2019;30(6):1652-1656. DOI: 10.1097/SCS.0000000000005401
29. Gómez-Ciriza G, Gómez-Cía T, Rivas-González JA, Velasco Forte MN, Valverde I. Affordable three-dimensional printed heart models. *Front Cardiovasc Med* 2021;8:642011. DOI: 10.3389/fcvm.2021.642011.
30. Witowski J, Sitkowski M, Witowski JS, Zuzak T, Wdowiak-Filip A, Filip M, *et al.* Low-cost 3D-printed grown-up congenital heart defect models from CT angiography. *Eur J Med Tech* 2017;4(17):56-61.
31. Gomes EN, Dias RR, Rocha BA, Santiago JAD, Dinato FJS, Saadi EK, *et al.* Use of 3D printing in preoperative planning and training for aortic endovascular repair and aortic valve disease. *Braz J Cardiovasc Surg* 2018;33(5):490-495. DOI: 10.21470/1678-9741-2018-0101.
32. 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):110-117. DOI: 10.21470/1678-9741-2020-0409.
33. Menegazzo WR, Alvarez J, Cusimano RJ, Geib G, Torres FS, Clausell N, *et al.* Modified autotransplant with three-dimensional printing for treatment of

primary cardiac sarcoma. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2019;157(2):e41-e43. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2018.08.087.

34. 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):507-509. DOI: 10.36660/abc.20200086.

35. Werner H, Lopes J, Ribeiro G, Raposo AB, Trajano E, Araujo Júnior E. Three-dimensional virtual traveling navigation and three-dimensional printing models of a normal fetal heart using ultrasonography data. *Prenat Diagn*. 2019 Feb;39(3):175-177. doi: 10.1002/pd.5417.

36. Júnior Amorim RF. Construção de modelos impressos em 3D e avaliação da validade do método no ensino da ecocardiografia pediátrica [dissertação]. Universidade Federal de Pernambuco: Recife; 2020. Mestrado.

37. 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):455-463. DOI: 10.1093/ije/dyz009..

38. Perandini S, Faccioli N, Zaccarella A, Re T, Mucelli RP. The diagnostic contribution of CT volumetric rendering techniques in routine practice. *Indian J Radiol Imaging* 2010;20(2):92-7. DOI: 10.4103/0971-3026.63043.

39. Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of The Art. *J Healthc Eng* 2019; Mar 21:2019:5340616. DOI: 10.1155/2019/5340616.
40. Kantaros A, Piromalis D. Employing a low-cost desktop 3D printer: challenges, and how to overcome them by tuning key process parameters. *IJMEA* 2021;10(1):11-19. DOI: 10.5923/j.mechanics.20211001.02.
41. Ali A, Ballard DH, Althobaity W, Christensen A, Geritano M, Ho M, *et al.* Clinical situations for which 3D printing is considered an appropriate representation or extension of data contained in a medical imaging examination: adult cardiac conditions. *3D Print Med* 2020;6(1):24. DOI: 10.1186/s41205-020-00078-1.
42. Otton JM, Birbara NS, Hussain T, Greil G, Foley TA, Pather N. 3D printing from cardiovascular CT: a practical guide and review. *Cardiovasc Diagn Ther* 2017;7(5):507-526. DOI: 10.21037/cdt.2017.01.12.
43. Beitler BG, Abraham PF, Glennon AR, Tommasini SM, Lattanza LL, Morris JM, *et al.* Interpretation of regulatory factors for 3D printing at hospitals and medical centers, or at the point of care. *3D Print Med* 2022;8(1):7. DOI: 10.1186/s41205-022-00134-y.
44. Biglino G, Hopfner C, Lindhardt J, Moscato F, Munuera J, Oberoi G, *et al.* Perspectives on medical 3D printing at the point-of-care from the new European 3D Printing Special Interest Group. *3D Print Med* 2023;9(1):14. DOI: 10.1186/s41205-022-00167-3

45. Food and Drug Administration. Technical considerations for additive manufactured medical devices: guidance for industry and food and drug administration staff. FDA: Rockville; 2017.
46. 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.
47. Byrne N, Velasco Forte M, Tandon A, Valverde I, Hussain T. A systematic review of image segmentation methodology, used in the additive manufacture of patient-specific 3D printed models of the cardiovascular system. JRSM Cardiovasc Dis 2016;5:2048004016645467. DOI: 10.1177/2048004016645467.
48. Gosnell J, Pietila T, Samuel BP, Kurup HK, Haw MP, Vettukattil JJ. Integration of computed tomography and three-dimensional echocardiography for hybrid three-dimensional printing in congenital heart disease. J Digit Imaging 2016;29(6):665-669. DOI: 10.1007/s10278-016-9879-8.
49. 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.
50. Fukuyama N, Kurata A, Kawaguchi N, Tashiro R, Higaki T, Yokoi T, *et al*. Two-phase contrast injection protocol for pediatric cardiac computed

tomography in children with congenital heart disease. *Pediatr Cardiol* 2018;39(3):518-525. DOI: 10.1007/s00246-017-1782-7.

51. Handa A, Xu L, Machado-Rivas F, Cortes-Albornoz MC, Ruggiero M, Bedoya MA, *et al*. Magnetic resonance imaging in neonates: a practical approach to optimize image quality and increase diagnostic yield. *Pediatr Radiol* 2023;53(7):1300-1313. DOI: 10.1007/s00247-022-05550-0.

52. Han BK, Rigsby CK, Hlavacek A, Leipsic J, Nicol ED, Siegel MJ, *et al*. Computed tomography imaging in patients with congenital heart disease part i: rationale and utility. an expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT): endorsed by the Society of Pediatric Radiology (SPR) and the North American Society of Cardiac Imaging (NASCI). *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2015;9(6):475-92. doi: 10.1016/j.jcct.2015.07.004

53. Goo HW. State-of-the-art CT imaging techniques for congenital heart disease. *Korean J Radiol* 2010;11(1):4-18. DOI: 10.3348/kjr.2010.11.1.4.

54. Sun Z. Patient-specific 3D-printed models in pediatric congenital heart disease. *Children (Basel)* 2023;10(2):319. DOI: 10.3390/children10020319.

55. Velasco I, Vahdani S, Ramos H. Low-cost method for obtaining medical rapid prototyping using desktop 3D printing: a novel technique for mandibular reconstruction planning. *J Clin Exp Dent* 2017;9(9):e1103-e1108. DOI: 10.4317/jced.54055

56. 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.
57. Farooqi KM, editor. *Rapid prototyping in cardiac disease: 3D printing the heart*. 1st ed. Springer International Publishing; 2017.
58. Bertolini M, Rossoni M, Colombo G. Operative workflow from CT to 3D printing of the heart: opportunities and challenges. *Bioengineering (Basel)* 2021;8(10):130. DOI: 10.3390/bioengineering8100130.
59. Wijnen N, Brouwers L, Jebbink EG, Heyligers JMM, Bemelman M. Comparison of segmentation software packages for in-hospital 3D print workflow. *J Med Imaging (Bellingham)* 2021;8(3):034004. DOI: 10.1117/1.JMI.8.3.034004.
60. Priya S, Nagpal P. Four-dimensional virtual reality cine cardiac models using free open-source software. *Pediatr Radiol* 2020;50(11):1617-1623. DOI: 10.1007/s00247-020-04758-2.
61. Kamio T, Suzuki M, Asaumi R, Kawai T. DICOM segmentation and STL creation for 3D printing: a process and software package comparison for osseous anatomy. *3D Print Med* 2020;6(1):17. DOI: 10.1186/s41205-020-00069-2.
62. Brewis I, McLaughlin JA. Improved visualisation of patient-specific heart structure using three-dimensional printing coupled with image-processing

techniques inspired by astrophysical methods. *J Med Imaging & Health Inform* 2019;9:1-7. DOI: 10.48550/arXiv.1902.01233.

63. 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):143-145.e1. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2017.08.064.

64. Hodgdon T, Danrad R, Patel MJ, Smith SE, Richardson ML, Ballard DH, *et al.* Logistics of three-dimensional printing: primer for radiologists. *Acad Radiol* 2018;25(1):40-51. DOI: 10.1016/j.acra.2017.08.003.

65. Hong Q, Lin L, Li Q, Jiang Z, Fang J, Wang B, *et al.* A direct slicing technique for the 3D printing of implicitly represented medical models. *Comput Biol Med* 2021;135:104534. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2021.104534.

66. Kamio T, Onda T. Fused deposition modeling 3D printing in oral and maxillofacial surgery: problems and solutions. *Cureus* 2022;14(9):e28906. DOI: 10.7759/cureus.28906.

67. Lindquist EM, Gosnell JM, Khan SK, Byl JL, Zhou W, Jiang J, *et al.* 3D printing in cardiology: A review of applications and roles for advanced cardiac imaging. *Annals of 3D Printed Medicine* 2021;4:100034. DOI: 10.1016/j.stlm.2021.100034.

68. Lee W, Hong Y, Dai G. 3D bioprinting of vascular conduits for pediatric congenital heart repairs. *Transl Res* 2019;211:35-45. DOI: 10.1016/j.trsl.2019.03.007.

69. Yoo SJ, Thabit O, Kim EK, Ide H, Yim D, Dragulescu A, *et al.* 3D printing in medicine of congenital heart diseases. *3D Print Med* 2015;2(1):3. DOI: 10.1186/s41205-016-0004-x.

70. Martelli N, Serrano C, van den Brink H, Pineau J, Prognon P, Borget I, *et al.* Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery* 2016;159(6):1485-1500. DOI: 10.1016/j.surg.2015.12.017.

71. Mathur M, Patil P, Bove A. The role of 3D Printing in structural heart disease: all that glitters is not gold. *JACC Cardiovasc Imaging* 2015;8(8):987-8. DOI: 10.1016/j.jcmg.2015.03.009.

72. 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):451-468. DOI: 10.1148/rg.210113.

73. Gómez-Ciriza G, Gómez-Cía T, Rivas-González JA, Velasco Forte MN, Valverde I. Affordable three-dimensional printed heart models. *Front Cardiovasc Med* 2021;8:642011. DOI: 10.3389/fcvm.2021.642011.

74. Lau I, Wong YH, Yeong CH, Abdul Aziz YF, Md Sari NA, Hashim SA, *et al.* Quantitative and qualitative comparison of low- and high-cost 3D-printed heart models. *Quant Imaging Med Surg* 2019;9(1):107-114. DOI: 10.21037/qims.2019.01.02.

75. Valverde I. Three-dimensional printed cardiac models: applications in the field of medical education, cardiovascular surgery, and structural heart

interventions. *Rev Esp Cardiol (Engl Ed)* 2017;70(4):282-291. DOI: 10.1016/j.rec.2017.01.012.

76. Sun Z, Wong YH, Yeong CH. Patient-specific 3D-printed low-cost models in medical education and clinical practice. *Micromachines (Basel)* 2023;14(2):464. DOI: 10.3390/mi14020464.

77. Ogden KM, Aslan C, Ordway N, Diallo D, Tillapaugh-Fay G, Soman P. Factors affecting dimensional accuracy of 3-D printed anatomical structures derived from CT data. *J Digit Imaging* 2015;28(6):654-63. DOI: 10.1007/s10278-015-9803-7.

78. 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.

79. Valverde I, Gomez-Ciriza G, Hussain T, Suarez-Mejias C, Velasco-Forte MN, Byrne N, *et al.* Three-dimensional printed models for surgical planning of complex congenital heart defects: an international multicentre study. *Eur J Cardiothorac Surg* 2017;52(6):1139-1148. DOI: 10.1093/ejcts/ezx208.

80. Ghosh RM, Jolley MA, Mascio CE, Chen JM, Fuller S, Rome JJ, *et al.* Clinical 3D modeling to guide pediatric cardiothoracic surgery and intervention using 3D printed anatomic models, computer aided design and virtual reality. *3D Print Med* 2022;8(1):11. DOI: 10.1186/s41205-022-00137-9.

81. Hadeed K, Guitarte A, Briot J, Dulac Y, Alacoque X, Acar P, *et al.* Feasibility and accuracy of printed models of complex cardiac defects in small

infants from cardiac computed tomography. *Pediatr Radiol* 2021;51(11):1983-1990. DOI: 10.1007/s00247-021-05110-y.

82. Averkin II, Grehov EV, Pervunina TM, Komlichenko EV, Vasichkina ES, Zaverza VM, *et al.* 3D-printing in preoperative planning in neonates with complex congenital heart defects. *J Matern Fetal Neonatal Med* 2022;35(10):2020-2024. DOI: 10.1080/14767058.2020.1771691.

83. Hopkins L, Hampton BS, Abbott JF, Buery-Joyner SD, Craig LB, Dalrymple JL, *et al.* To the point: medical education, technology, and the millennial learner. *Am J Obstet Gynecol* 2018;218(2):188-192. DOI: 10.1016/j.ajog.2017.06.001.

84. Rogers LS, Cohen MS. Medical education in pediatric and congenital heart disease: A focus on generational learning and technology in education. *Prog Pediatr Cardiol* 2020;59:101305. DOI: 10.1016/j.ppedcard.2020.101305.

85. Shatto B, Erwin K. Teaching Millennials and Generation Z: bridging the generational divide. *Creat Nurs* 2017;23(1):24-28. DOI: 10.1891/1078-4535.23.1.24.

86. Busari JO. The discourse of generational segmentation and the implications for postgraduate medical education. *Perspect Med Educ* 2013;2(5-6):340-348. DOI: 10.1007/s40037-013-0057-0.

87. Illmann CF, Hosking M, Harris KC. utility and access to 3-Dimensional printing in the context of congenital heart disease: an international physician survey study. *CJC Open* 2020;2(4):207-213. DOI: 10.1016/j.cjco.2020.01.008.

88. Morin E. Seven complex lessons in education for the future. UNESCO; 1999.
89. Daily JA, Bolin E, Eble BK. Teaching pediatric cardiology with meaning and sense. *Congenit Heart Dis* 2018;13(1):154-156. DOI: 10.1111/chd.12561.
90. International Commission on the Futures of Education. Reimagining our futures together: a new social contract for education. UNESCO; 2021. 188 p.
91. Gonzales RA, Ferns G, Vorstenbosch MATM, Smith CF. Does spatial awareness training affect anatomy learning in medical students? *Anat Sci Educ* 2020;13(6):707-720. DOI: 10.1002/ase.1949.
92. Fleming C, Sadaghiani MS, Stellon MA, Javan R. Effectiveness of three-dimensionally printed models in anatomy education for medical students and resident physicians: systematic review and meta-analysis. *J Am Coll Radiol* 2020;17(10):1220-1229. DOI: 10.1016/j.jacr.2020.05.030.
93. 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.
94. 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.

95. Tan H, Huang E, Deng X, Ouyang S. Application of 3D printing technology combined with PBL teaching model in teaching clinical nursing in congenital heart surgery: A case-control study. *Medicine (Baltimore)* 2021;100(20):e25918. DOI: 10.1097/MD.00000000000025918.

96. 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):1258-1265. DOI: 10.1007/s00246-019-02146-8.

97. Yanofsky SD, Schell RM, Williams R. Complexity of caring for complex pediatric congenital heart disease. *In:* Da Cruz E, Ivy D, Jaggars J, editores. *Pediatric and congenital cardiology, cardiac surgery and intensive care.* Springer-Verlag London Ltd; 2014. p. 3369–81.

98. Interprofessional Education Collaborative. Core competencies for interprofessional collaborative practice: 2016 update. 2016. 19 p.

99. Fraisse A, Le Bel S, Mas B, Macrae D. Paediatric cardiac intensive care unit: current setting and organization in 2010. *Arch Cardiovasc Dis* 2010;103(10):546-51. DOI: 10.1016/j.acvd.2010.05.004.

100. Zyblewski SC, Callow L, Beke DM, Jain P, Madathil SB, Schwartz S, *et al.* Education and training in pediatric cardiac critical care: international perspectives. *World J Pediatr Congenit Heart Surg* 2019;10(6):769-777. DOI: 10.1177/2150135119881369.

101. Campbell JM. Education and simulation training of pediatric intensive care unit nurses to care for open heart surgery patients. *Crit Care Nurse* 2015;35(3):76-81. DOI: 10.4037/ccn2015312.
102. Lee C, Lee JY. Utility of three-dimensional printed heart models for education on complex congenital heart diseases. *Cardiol Young* 2020;30(11):1637-1642. DOI: 10.1017/S1047951120003753.
103. Olivieri LJ, Su L, Hynes CF, Krieger A, Alfares FA, Ramakrishnan K, *et al.* "Just-In-Time" simulation training using 3-D printed cardiac models after congenital cardiac surgery. *World J Pediatr Congenit Heart Surg* 2016;7(2):164-8. DOI: 10.1177/2150135115623961.
104. Olivieri LJ, Zurakowski D, Ramakrishnan K, Su L, Alfares FA, Irwin MR, *et al.* Novel, 3D display of heart models in the postoperative care setting improves CICU caregiver confidence. *World J Pediatr Congenit Heart Surg* 2018;9(2):206-213. DOI: 10.1177/2150135117745005
105. Biglino G, Capelli C, Koniordou D, Robertshaw D, Leaver LK, Schievano S, *et al.* Use of 3D models of congenital heart disease as an education tool for cardiac nurses. *Congenit Heart Dis* 2017;12(1):113-118. DOI: 10.1111/chd.12414.
106. Brown DW, Binney G, Gauthier Z, Blume ED. Fears and stressors of trainees starting fellowship in pediatric cardiology. *Pediatr Cardiol* 2020;41(4):677-682. DOI: 10.1007/s00246-019-02276-z.

107. Allan CK, Tannous P, DeWitt E, Farias M, Mansfield L, Ronai C, *et al.* A pediatric cardiology fellowship boot camp improves trainee confidence. *Cardiol Young* 2016;26(8):1514-1521. DOI: 10.1017/S1047951116002614.
108. Harris TH, Adler M, Unti SM, McBride ME. Pediatric heart disease simulation curriculum: educating the pediatrician. *Congenit Heart Dis* 2017;12(4):546-553. DOI: 10.1111/chd.12483.
109. Costello JP, Olivieri LJ, Su L, Krieger A, Alfares F, Thabit O, *et al.* Incorporating three-dimensional printing into a simulation-based congenital heart disease and critical care training curriculum for resident physicians. *Congenit Heart Dis* 2015;10(2):185-90. DOI: 10.1111/chd.12238.
110. White SC, Sedler J, Jones TW, Seckeler M. Utility of three-dimensional models in resident education on simple and complex intracardiac congenital heart defects. *Congenit Heart Dis* 2018;13(6):1045-1049. DOI: 10.1111/chd.12673.
111. Jonas RA. Training fellows in paediatric cardiac surgery. *Cardiol Young* 2016;26(8):1474-1483. DOI: 10.1017/S1047951116001803.
112. Yoo SJ, Hussein N, Barron DJ. Congenital heart surgery skill training using simulation models: not an option but a necessity. *J Korean Med Sci* 2022;37(38):e293. DOI: 10.3346/jkms.2022.37.e293.
113. Nam JG, Lee W, Jeong B, Park EA, Lim JY, Kwak Y, *et al.* Three-dimensional printing of congenital heart disease models for cardiac surgery simulation: evaluation of surgical skill improvement among inexperienced

cardiothoracic surgeons. Korean J Radiol 2021;22(5):706-713. DOI: 10.3348/kjr.2020.0682.

114. Yoo SJ, Spray T, Austin EH 3rd, Yun TJ, van Arsdell GS. Hands-on surgical training of congenital heart surgery using 3-dimensional print models. J Thorac Cardiovasc Surg 2017;153(6):1530-1540. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2016.12.054.

115. Hussein N, Honjo O, Barron DJ, Haller C, Coles JG, Van Arsdell G, *et al.* Assessment tool validation and technical skill improvement in the simulation of the Norwood operation using three-dimensional-printed heart models. Eur J Cardiothorac Surg 2020:ezaa321. DOI: 10.1093/ejcts/ezaa321.

116. Peel B, Lee W, Hussein N, Yoo SJ. State-of-the-art silicone molded models for simulation of arterial switch operation: Innovation with parting-and-assembly strategy. JTCVS Tech 2022;12:132-142. DOI: 10.1016/j.xjtc.2021.12.009.

117. Hoashi T, Ichikawa H, Nakata T, Shimada M, Ozawa H, Higashida A, *et al.* Utility of a super-flexible three-dimensional printed heart model in congenital heart surgery. Interact Cardiovasc Thorac Surg 2018;27(5):749-755. DOI: 10.1093/icvts/ivy160.

118. Tiwari N, Ramamurthy HR, Kumar V, Kumar A, Dhanalakshmi B, Kumar G. The role of three-dimensional printed cardiac models in the management of complex congenital heart diseases. Med J Armed Forces India 2021;77(3):322-330. DOI: 10.1016/j.mjafi.2021.01.019.

119. Brunner BS, Thierij A, Jakob A, Tengler A, Grab M, Thierfelder N, *et al.* 3D-printed heart models for hands-on training in pediatric cardiology - the future of modern learning and teaching? *GMS J Med Educ* 2022;39(2):Doc23. DOI: 10.3205/zma001544.
120. Ma Y, Ding P, Li L, Liu Y, Jin P, Tang J, *et al.* Three-dimensional printing for heart diseases: clinical application review. *Biodes Manuf* 2021;4(3):675-687. DOI: 10.1007/s42242-021-00125-8.
121. Milano EG, Capelli C, Wray J, Biffi B, Layton S, Lee M, *et al.* Current and future applications of 3D printing in congenital cardiology and cardiac surgery. *Br J Radiol* 2019;92(1094):20180389. DOI: 10.1259/bjr.20180389
122. García PM, Moure AF, Bendayán IM, Barreiro VB, Núñez FR. Draw your heart disease: a graphic assessment of the knowledge of congenital heart disease of patients and their parents. *Int J Cardiol* 2021;8(6):243. DOI: 10.23937/2378-2951/1410243.
123. van der Linde D, Konings EE, Slager MA, Witsenburg M, Helbing WA, Takkenberg JJ, *et al.* Birth prevalence of congenital heart disease worldwide: a systematic review and meta-analysis. *J Am Coll Cardiol* 2011;58(21):2241-7. DOI: 10.1016/j.jacc.2011.08.025.
124. 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):2672-2684. DOI: 10.1093/eurheartj/ehac266.

125. 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):813-818. DOI: 10.1007/s00246-017-1586-9.

126. 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.

127. Awori J, Friedman SD, Chan T, Howard C, Seslar S, Soriano BD, *et al.* 3D models improve understanding of congenital heart disease. *3D Print Med* 2021;7(1):26. DOI: 10.1186/s41205-021-00115-7.

128. van den Eynde J, Franchi T, Foo YC, Mills B, Ali S, Doulamis IP, *et al.* The 100 most influential articles in congenital heart disease in 2000–2020: A bibliometric analysis. *IJC Congenital Heart Disease (CHD)* 2021;4(2): 100156. DOI:10.1016/j.ijcchd.2021.100156

129. Tchervenkov CI, Herbst C, Jacobs JP, Al-Halees Z, Edwin F, Dearani JA, *et al.* Current status of training and certification for congenital heart surgery around the world: proceedings of the meetings of the global council on education for congenital heart surgery of the world society for pediatric and congenital heart surgery. *World J Pediatr Congenit Heart Surg* 2021;12(3):394-405. DOI: 10.1177/21501351211003520.

130. Murni IK, Musa NL. The need for specialized pediatric cardiac critical care training program in limited resource settings. *Front Pediatr* 2018;6:59. DOI: 10.3389/fped.2018.00059.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)



Projeto Pequenos Corações 3D

Olá,

Você está sendo convidado(a) para participar da pesquisa "**Desenvolvimento de modelos de cardiopatia congênita em impressão 3D - potenciais aplicações no ensino da cardiologia pediátrica**".

Nessa pesquisa **médicos** que atuam na **área de cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica** serão expostos em ambiente controlado aos **protótipos** desenvolvidos durante o estudo e solicitados a responder um **questionário estruturado** sobre suas percepções. O tempo estimado para o preenchimento é de **dez minutos**.

A sua participação no estudo é **voluntária**. Não há riscos previsíveis associados à sua participação nesse projeto. Entretanto, caso se sinta desconfortável em responder alguma questão **você pode desistir da participação a qualquer momento**. É muito importante para nós aprender e qualificar nosso projeto com as suas opiniões.

Os dados coletados serão utilizados apenas nessa pesquisa e serão codificados permanecendo **confidenciais**.

Caso haja dúvida a qualquer momento durante o preenchimento do questionário, você pode contactar o pesquisador Francisco Candido Monteiro Cajueiro pelo telefone 17 9737 5025 ou pelo email francisco.cajueiro@edu.famerp.br.

APÊNDICE B – QUESTIONPRO

Caracterização do Entrevistado

Qual a sua formação médica?

- ☐ Cardiologista Pediátrico
- ☐ Ecocardiografista Pediátrico
- ☐ Intensivista Cardiopediátrico
- ☐ Radiologista Pediátrico
- ☐ Hemodinamicista Pediátrico
- ☐ Cirurgião Cardiovascular Pediátrico

Quantos anos de atuação na área de cardiopatias congênicas?

As minhas atividades no trabalho com cardiopatias congênicas incluem:

(Possível mais de uma opção)

- ☐ Assistência
- ☐ Pesquisa
- ☐ Ensino

Considero meu nível de conhecimento sobre a utilização de impressão 3D na área médica:

- ☐ Excelente
- ☐ Bom
- ☐ Razoável
- ☐ Nenhum

Considero a dificuldade de visualização espacial um dos principais obstáculos na compreensão das cardiopatias congênitas.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Avaliação Individual dos Protótipos

Protótipo 1 - Comunicação Interatrial Ostium Secundum + Persistência do Canal Arterial

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a Comunicação Interatrial Ostium Secundum + Persistência do Canal Arterial.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Protótipo 2 - Defeito do Septo Atrioventricular Total

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem o Defeito do Septo Atrioventricular Total.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Resposta:

☐☐☐☐**Protótipo 3 - Coarctação de Aorta Justaductal**

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a Coarctação de Aorta Justaductal.

Concordo Totalmente Concordo Parcialmente Discordo Parcialmente Discordo Totalmente

Resposta:

☐☐☐☐**Protótipo 4 - Tetralogia de Fallot**

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a **Tetralogia de Fallot**.

Concordo Totalmente Concordo Parcialmente Discordo Parcialmente Discordo Totalmente

Resposta:

☐☐☐☐**Protótipo 5 - Interrupção de Arco Aórtico Tipo C**

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a **Interrupção de Arco Aórtico Tipo C**.

Concordo Totalmente Concordo Parcialmente Discordo Parcialmente Discordo Totalmente

Resposta:

☐☐☐☐**Protótipo 6 - Truncus Arteriosus Tipo I**

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem o **Truncus Arteriosus Tipo I**.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Protótipo 7 - Atresia Pulmonar Tipo A

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a **Atresia Pulmonar Tipo A**.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Protótipo 8 - Transposição de Grandes Artérias

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a **Transposição de Grandes Artérias**.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Protótipo 9 - Conexão Anômala Total de Veias Pulmonares Infracardiaca

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a **Conexão Anômala Total de Veias Pulmonares Infracardiaca**.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Protótipo 10 - Atresia Tricúspide Tipo C

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a **Atresia Tricúspide Tipo C**.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Protótipo 11 - Síndrome do Coração Esquerdo Hipoplásico

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a **Síndrome do Coração Esquerdo Hipoplásico**.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Protótipo 12 - Comunicação Interventricular Perimembranosa com Extensão para a Via de Saída do Ventrículo Direito + Persistência do Canal Arterial

Consigo identificar no modelo as principais características anatômicas que definem a **Comunicação Interventricular Perimembranosa com Extensão para a Via de Saída do Ventrículo Direito + Persistência do Canal Arterial**.

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Resposta:	☐	☐	☐	☐

Avaliação Global dos Protótipos

Os protótipos apresentados são:

	Concordo Totalmente	Concordo Parcialmente	Discordo Parcialmente	Discordo Totalmente
Fidedignos à anatomia da doença	☐	☐	☐	☐
Visualmente agradáveis	☐	☐	☐	☐
De tamanho adequado	☐	☐	☐	☐
Fáceis de manipular	☐	☐	☐	☐
Aparentemente resistentes	☐	☐	☐	☐
Capazes de motivar o estudo	☐	☐	☐	☐

Acredito que os modelos de cardiopatias congênitas impressos em 3D podem ser, em diferentes esferas, adjuvantes na educação e ensino de:

(Possível mais de uma opção)

- ☐ Estudantes de Graduação da Área de Saúde
- ☐ Membros da Equipe Interdisciplinar - Fisioterapeutas, Enfermeiros, Nutricionistas, Psicólogos, Assistentes Sociais, Terapeutas Ocupacionais, Técnicos de Enfermagem, Farmacêuticos e demais profissionais.
- ☐ Cardiologistas, Cirurgiões Cardiovasculares, Anestesiologistas e Residentes.
- ☐ Familiares e Responsáveis pelas crianças

Sinta-se à vontade para escrever abaixo sugestões, percepções, críticas ou comentários.

APÊNDICE C – SUBMISSÃO DE ARTIGO AO BRAZILIAN JOURNAL OF CARDIOVASCULAR SURGERY

Brazilian Journal of Cardiovascular Surgery



Development of 3D Printed Models of Congenital Heart Diseases: Potential Applications in Pediatric Cardiology and Cardiac Surgery Education

Journal:	<i>Brazilian Journal of Cardiovascular Surgery</i>
Manuscript ID	Draft
Manuscript Type:	Original Article
Keywords - Please find additional keywords from the following lists: http://decs.bvs.br/ and http://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh.: Three-Dimensional Printing, Congenital Heart Disease, Medical Education, Pediatric Cardiology, Pediatric Cardiac Surgery	
Abbreviations, acronyms, symbols:	

SCHOLARONE™
Manuscripts

<https://mc04.manuscriptcentral.com/rbccv-scielo>

ANEXOS

ANEXO A – APROVAÇÃO CEP



FACULDADE DE MEDICINA DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO
AUTARQUIA ESTADUAL - LEI Nº 8899 de 27/09/94
(Reconhecida pelo Decreto Federal nº 74179 de 14/06/74)

Parecer nº 4.837.776

COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

O projeto de pesquisa CAAE 48575021.3.0000.5415 sob a responsabilidade de Francisco Candido Monteiro Cajueiro com o título “Desenvolvimento de modelos educacionais em impressão 3D para o ensino em cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica” está de acordo com a resolução do CNS 466/12 e foi **aprovado por esse Comitê na Plataforma Brasil em 09/07/2021**. Lembramos ao senhor (a) pesquisador (a) que, no cumprimento da Resolução 251/97, o Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos (CEP) **deverá receber relatórios semestrais sobre o andamento do Estudo**, bem como a qualquer tempo e a critério do pesquisador nos casos de relevância, além do envio dos relatos de eventos adversos e também da notificação da data de inclusão do primeiro participante de pesquisa, para conhecimento deste Comitê. **Salientamos ainda, a necessidade de relatório completo ao final do Estudo.**

Profa. Dra. Beatriz Barco Tavares Jontaz Irigoyen
Coordenadora do CEP-FAMERP

Prof. Dr. Gerardo Maria de Araujo Filho
Vice-Coordenador do CEP-FAMERP

Documento emitido no dia 6 de julho de 2023.

Código de validação: BC57-7A4E-834A-4B79-AA68

A autenticidade deste documento pode ser verificada na página da FAMERP

<http://certdec.famerp.br/Valida.aspx>

ANEXO B – CARTA DE ANUÊNCIA INSTITUCIONAL

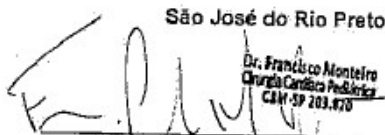
Comitê de Ética em Pesquisa da Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto –
CEP/FAMERP
Av. Brigadeiro Faria Lima, 5416 – Vila São Pedro – Fone/fax: 17 – 32015813
São José do Rio Preto – SP

D E C L A R A Ç Ã O

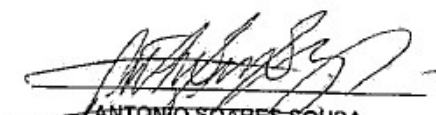
Declaro para os devidos fins que:

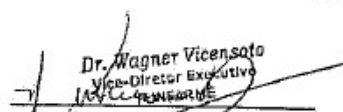
- ☐ Tenho ciência dos termos da Resolução 466/12 do Conselho Nacional de Saúde e que cumprirei os mesmos;
- ☐ Que tornarei público os resultados do projeto de pesquisa Desenvolvimento de modelos educacionais em impressão 3D para o ensino em cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica sejam eles favoráveis ou não;
- ☐ Que há infraestrutura necessária para o desenvolvimento do referido projeto.

São José do Rio Preto, 18 de junho de 2021.


Dr. Francisco Monteiro
Cirurgião Cardíaco Pediátrico
CRM-SP 203.870
FRANCISCO CANDIDO MONTEIRO
CAJUEIRO
Pesquisador

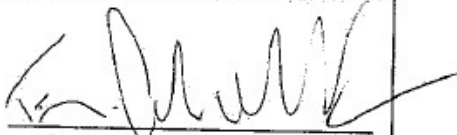
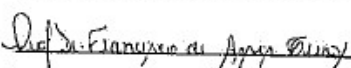
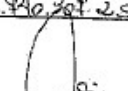

ULISSES ALEXANDRE CROTI
Coordenador Geral CardioPedBrasil
Centro do Coração da Criança - HCM
Orientador


ANTONIO SOARES SOUSA
Diretor Administrativo HCM


Dr. Wagner Vicentoso
Vice-Diretor Executivo
FUNFARME
JORGE FARES
Diretor Executivo FUNFARME


Prof. Dr. Francisco de Assis Cury
Diretor Geral
FRANCISCO DE ASSIS CURY
Diretor Geral FAMERP

ANEXO C – PLATAFORMA BRASIL

 MINISTÉRIO DA SAÚDE - Conselho Nacional de Saúde - Comissão Nacional de Ética em Pesquisa - CONEP FOLHA DE ROSTO PARA PESQUISA ENVOLVENDO SERES HUMANOS			
1. Projeto de Pesquisa: Desenvolvimento de modelos educacionais em impressão 3D para o ensino em cardiologia e cirurgia cardiovascular pediátrica			
2. Número de Participantes da Pesquisa: 20			
3. Área Temática:			
4. Área do Conhecimento: Grande Área 4, Ciências da Saúde			
PESQUISADOR RESPONSÁVEL			
5. Nome: Francisco Candido Monteiro Cajueiro			
6. CPF: 064.335.794-77		7. Endereço (Rua, n.º): TELES JUNIOR 155 B EDF. PRAIA DE JURUBAIBA AFLITOS APTO 1201, RECIFE PERNAMBUCO 52050375	
8. Nacionalidade: BRASILEIRO		9. Telefone: 81996060487	10. Outro Telefone:
11. Email: emaildefrancisco@gmail.com			
Termo do Compromisso: Declaro que conheço e cumpro os requisitos da Resolução CNS 466/12 e suas complementares. Comprometo-me a utilizar os materiais e dados coletados exclusivamente para os fins previstos no protocolo e a publicar os resultados sejam eles favoráveis ou não. Aceito as responsabilidades pela condução científica do projeto acima. Tenho ciência que essa folha será anexada ao projeto devidamente assinada por todos os responsáveis e fará parte integrante da documentação do mesmo.			
Data: 18 / 06 / 2021		 Dr. Francisco Monteiro Cirurgião Cardíaco Pediátrico CRM-37 201.810	
INSTITUIÇÃO PROPONENTE			
12. Nome: Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto - FAMERP - SP		13. CNPJ: 00.329.036/0001-50	
14. Unidade/Orgão:		15. Telefone: (17) 3201-5813	
16. Outro Telefone:			
Termo do Compromisso (do responsável pela instituição): Declaro que conheço e cumpro os requisitos da Resolução CNS 466/12 e suas Complementares e como esta instituição tem condições para o desenvolvimento deste projeto, autorizo sua execução.			
Responsável: 		CPF: 295.440.384-25	
Cargo/Função: <u>Reitor Geral</u>		 Prof. Dr. Francisco de Assis Cury Diretor Geral FAMERP	
Data: 23 / 06 / 2021			
PATROCINADOR PRINCIPAL			
Não se aplica.			