CARDIOLOGIA
TEORIA E PRÁTICA
EDIÇÃO XVIII

Capítulo 22

NANOTECNOLOGIA NA IMPRESSÃO 3D EM ALTERAÇÕES ANATÔMICAS CARDÍACAS

PATRICK CRISTIAN LIMA ORIHUELA[1]
LEONARDO MORAES ARMESTO[1]
THABATA ROBERTO ALONSO[1]
CAROLINE DE OLIVEIRA NIEBLAS[1]
LAÍS FERREIRA STAHL[1]
DIEGO MOREIRA KNOBLOCH[1]
PEDRO FELIPE FERRARI SILVA[1]
GUSTAVO DE MACEDO KNOLL[1]
GIOVANA MARQUES FARGIANI[1]
RAFAEL RODRIGUES DE CARVALHO[1]
ISABELLA SICILIANO MONTALTO[1]
PEDRO HENRIQUE VELOSO DE SOUZA[1]
MARIA EDUARDA MEIRELES CONTE[1]
ANA CLÁUDIA PEREIRA PINHEIRO[2]
EDUARDO GREGÓRIO CHAMLIAN[3]

1. Discente – Medicina da Universidade Municipal de São Caetano do Sul – USCS.
2. Discente – Medicina Veterinária da Universidade Municipal de São Caetano do Sul – USCS.
3. Docente/Orientador – Universidade Municipal de São Caetano do Sul – USCS.

Palavras-chave
Nanotecnologia; Impressão Tridimensional; Cardiologia.

DOI 10.59290/978-65-6029-190-4.22

EDITORA PASTEUR

INTRODUÇÃO

A importância da impressão 3D tem crescido no campo da saúde de maneira a fazer-se presente em segmentos como pesquisa, terapêutica e cirurgia, de forma que seu uso se torna, a cada dia, imprescindível na garantia do melhor cuidado para os pacientes (SANTOS *et al*., 2021).

Em contexto, a tecnologia 3D, no aspecto de imagem e/ou impressão, pode ser utilizada para a geração de modelos de planejamento pré-cirúrgico, criação de dispositivos biocompatíveis e educação básica ou continuada. Nesse sentido, a cardiologia, como especialidade, faz uso de tais recursos na interface de melhor análise de condições patológicas, implicações anatomofisiológicas, ensino sobre anatomia de precisão e topográfica, além de planejamento intervencionista com impressão para fins terapêuticos (LINDQUIST *et al*., 2021).

Santos *et al.* (2021) apontam que, por meio da nanotecnologia, inovações para o setor da impressão 3D permitem melhorias nos processos já desenvolvidos, ao mesmo tempo em que intensificam arcabouços inovadores, visando abordagens no campo da engenharia tecidual, mecano-estrutural e biomédica, com aplicação em cardiologia. Nessa ótica, a impressão 3D e a nanotecnologia se tornaram fortes aliadas para o desenvolvimento de novos tratamentos e modelos voltados para a medicina personalizada.

Assim, a nanomaterialidade, em face da biônica, permite o melhor detalhamento ainda que por meio de geometrias mais complexas durante a impressão 3D, forjando e usufruindo de materiais específicos na busca pelo resultado desejado. Ainda, a introdução dos nanosensores, agrega utilidades e competências potencialmente diagnósticas e terapêuticas na medicina de precisão (DAVE *et al.*, 2024). Em sinergia, Santos *et al.* (2021) problematizam o estado da arte, apontando ainda que o avanço dessas tecnologias também traz consigo desafios, como a busca por materiais compatíveis e a replicação fiel de complexas estruturas. Esses avanços necessitam de uma colaboração interdisciplinar para transformar essa tecnologia em prática clínica, possibilitando uma abordagem personalizada e direcionada às características das doenças cardíacas.

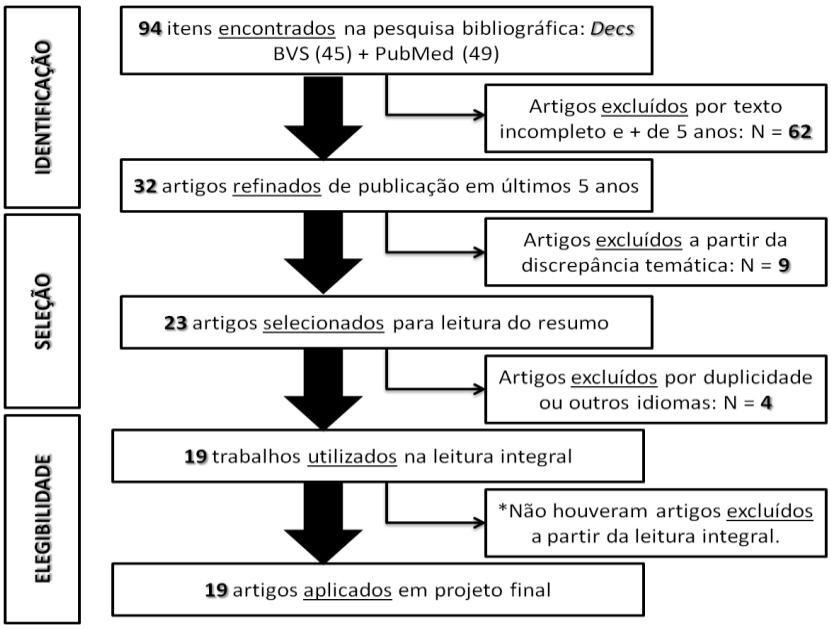
Por conta desses avanços, o estudo se justifica pela relevância à cardiologia, a qual será beneficiada à medida que progride em pesquisas e endossa a criação de tecidos artificiais miméticos por meio da melhor especificidade dos materiais envolvidos. Esse propósito culmina no desenvolvimento de estruturas vasculares complexas focadas na produção de tecidos, e sua implantação mediada pelo uso da realidade virtual para aprimorar o planejamento e o treinamento em cirurgia cardiovascular (LINDQUIST *et al.*, 2021).

Tendo em vista essa temática, o objetivo do estudo foi elucidar as diferentes utilidades da nanotecnologia na impressão 3D de estruturas cardíacas para finalidades biomédicas. Portanto, o trabalho se constitui na divisão estrutural metodológica, considerando critérios inclusivos e exclusivos literários, vinculando-os aos resultados, imediatamente discutidos, dos quais os autores tratam de analisar a utilização de recursos nanomateriais na reprodução total ou parcial de estruturas orgânicas cardiológicas, em processo de ajustes, troca ou melhoria para atividades médicas interativas, alcançando, por fim, às perspectivas futuras do setor e aos aspectos conclusivos de área tão ampla quanto emergente em desenvolvimento tecnológico e inovação operativa e aplicada.

MÉTODO

O estudo trata-se de uma revisão integrativa de literatura, realizada no período de setembro a outubro de 2024, por meio de pesquisas nas bases de dados BVS e PubMed. Foram utilizados os descritores: "*Printing, Three-Dimensional*", "*Heart*" e "*Cardiology*". Como critérios de inclusão foram abarcadas publicações em inglês, português e espanhol, recuperadas a partir de descritores DeCS, divulgadas no período de 2019 a 2024, estudos do tipo (revisão, meta-análise, relato de caso), de disponibilidade integral nas bases de dados. Foram excluídos do estudo artigos fora do período temporal pretendido, duplicados, que não abordaram diretamente a proposta estudada, encontrados em periódicos não indexados, disponibilizados somente na forma de resumo e que não atendiam aos demais critérios de inclusão. A **Figura 22.1** apresenta a relação de artigos selecionados para leitura integral após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão.

Figura 22.1 Fluxo de artigos selecionados para leitura



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao aplicar os DeCS (*Printing, Three-Dimensional*) AND (*Heart*) AND (*Cardiology*), foram encontrados 94 artigos. Destes, compunham-se artigos em inglês, espanhol e outros idiomas, incluindo chinês, mas que apresentavam a versão também em inglês, convalidando-os a critérios inclusivos. Após aplicar os critérios de período dos últimos 5 anos e de disponibilidade na íntegra, foram elencados 32 artigos; destes, nove não apresentavam contextualização com o tema buscado pelos pesquisadores e outros quatro foram descartados por duplicidade ou idiomas não pretendidos. Dessa forma, foram selecionados 19 artigos para a leitura integral, visto que apresentavam a versão de texto completo na versão *Open Access* e se correlacionam com a temática do estudo. Todos os estudos foram lidos integralmente, utilizados no desenvolvimento do capítulo e estão sistematizados no **Quadro 22.1**.

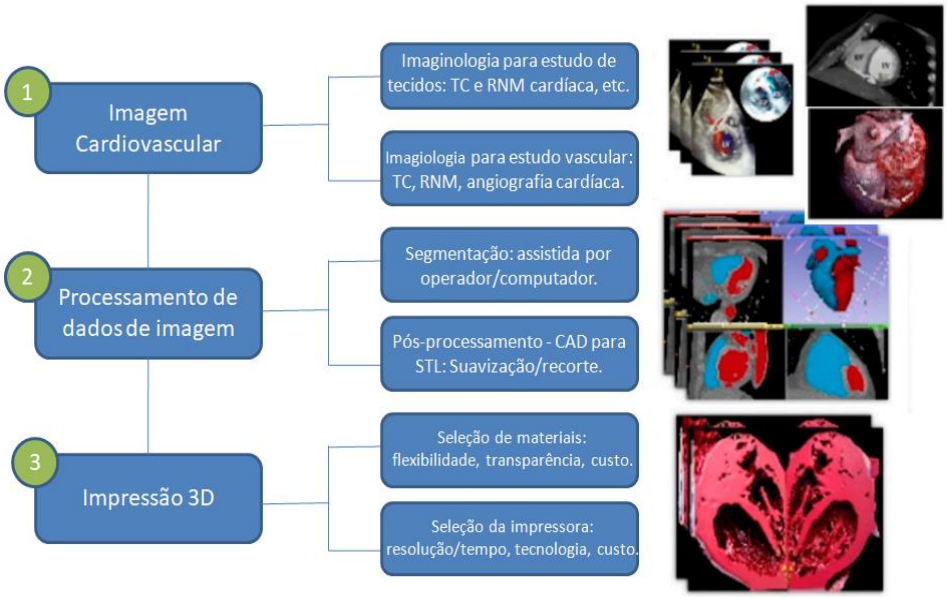
Quadro 22.1 Relação dos resultados encontrados

Artigo	Autor/Ano	Periódico
Three-dimensional printing applications in percutaneous structural heart interventions	Harb *et al*. (2019)	Circulation: Cardiovascular Imaging
Utility and access to 3-dimensional printing in the context of congenital heart disease: an international physician survey study	Illman *et al.* (2020)	CJC Open Journal
The digital heart-lung unit: applications of exponential technology	Sadeghi *et al.* (2021)	European Heart Journal
Real three-dimensional cardiac imaging using leading-edge holographic display	Mori *et al*. (2021)	Clinical Anatomy
3D printing: a cutting edge technology for treating post-infarction patients	Cernica *et al*. (2021)	Life Journal
Virtual simulations in planning intravascular treatment of aortic coarctation – retrospective	Topuzov *et al.* (2022)	Advances in Interventional Cardiology
Targeted therapies in genetic dilated and hypertrophic cardiomyopathies: from molecular mechanisms to therapeutic targets	Boer *et al*. (2022)	European Journal of Heart Failure
Creation of patient-specific silicone cardiac models with applications in pre-surgical plans and hands-on training	Mattus *et al*. (2022)	Journal of Visualized Experiments
The impact of 3D printed models on spatial orientation in echocardiography teaching	Salewski *et al*. (2022)	BMC Medical Education
Clinical 3D modeling to guide pediatric cardiothoracic surgery and intervention using 3D printed anatomic models, computer aided design and virtual reality	Ghosh *et al*. (2022)	3D Printing in Medicine
3D-printed heart models for hands-on training in pediatric cardiology: the future of modern learning and teaching?	Brunner *et al*. (2022)	Journal for Medical Education
Patient-specific 3D-printed models in pediatric congenital heart disease	Sun (2023)	Children
3D-printed cardiac models for fetal counseling: a pilot study and novel approach to improve communication	Marella *et al*. (2023)	Pediatric Cardiology
An opportunity to see the heart defect physically: medical student experiences of technology-enhanced learning with 3D printed models of congenital heart disease	Luxford *et al.* (2023)	Medical Science Educator
Utility and access to 3-dimensional printing in the context of congenital heart disease: an international physician survey study	Milano *et al.* (2019)	Brazilian Journal Radiology
Three-dimensional printing of fetal models of congenital heart disease derived from microfocus computed tomography	Sandrini *et al.* (2020)	Frontiers in Pediatrics
Evaluating 3D-printed models of coronary anomalies: a survey among clinicians and researchers at a university hospital in the UK	Lee *et al.* (2019)	BMJ Open
Three-dimensional printing in structural heart disease and intervention	Fan *et al.* (2019)	Annals of Translational Medicine
Echocardiography update for primary care physicians: a review	Chan *et al.* (2020)	Hong Kong Medical Journal

Os resultados literários apontam para a obtenção das estruturas em 3D, nas quais os autores referem o passo a passo iniciado pela seleção de imagens, seguido da transformação da

imagem 2D em arquivo para leitura da impressora em 3D, mediado pelo estudo da compatibilidade dos materiais utilizados para a impressão, que devem estar em harmonia com o modelo da impressora utilizada em cada pesquisa, tal como observado na **Figura 22.2**.

Figura 22.2 Impressão 3D em aplicações médicas - fluxo de trabalho



Fonte: Adaptado de CERNICA *et al*., 2021.

De forma inovadora, Cernica *et al*. (2021) examinaram o papel da impressão 3D na cardiologia, com foco no tratamento de pacientes pós-infarto. A tecnologia de impressão 3D é apresentada como uma ferramenta inovadora e extremamente útil no planejamento de intervenções complexas em doenças cardiovasculares, pois permite criar modelos anatômicos específicos para cada paciente, gerados a partir de exames de imagem, como tomografias computadorizadas (TC) e ressonâncias magnéticas (RM). O autor aponta que esses modelos podem ser fabricados a partir de quatro modelos de impressão 3D:

- Impressão por método de polimerização: usado para imprimir estruturas anatômicas mais complexas e refinadas, o qual, apesar de sua alta precisão, não é sempre utilizado devido ao custo elevado;
- Impressão por materiais rígidos (acrilonitrila butadieno estireno): método usado principalmente no processo pré-intervencional, que, além de ser muito econômico, visa aprimorar a compressão estrutural;
- Impressão por materiais flexíveis (poliuretano termoplástico): o método permite a impressão de diversos tipos de estruturas anatômicas, oferecendo uma boa resistência física e flexibilidade;
- Impressão por múltiplos materiais: ainda em desenvolvimento, esse método usufrui da impressão de modelos anatômicos com alta compatibilidade elástica e biológica, ao usar diversos materiais no momento da impressão.

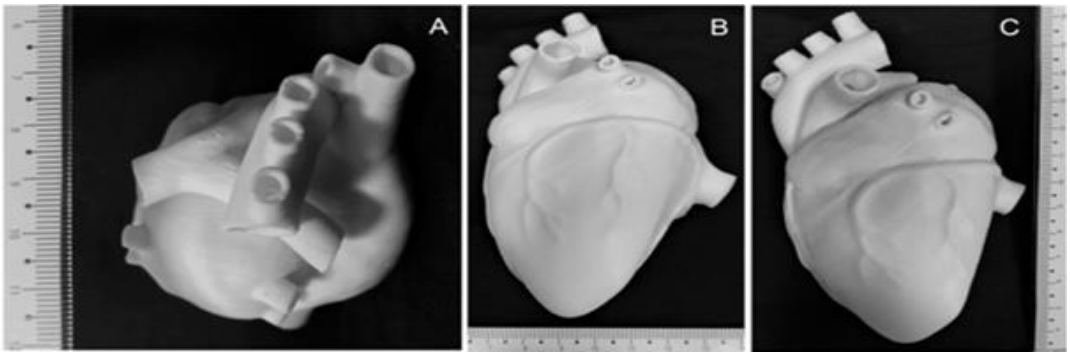
Desse modo, a impressão 3D de estruturas anatômicas possui alto potencial para mudança de paradigma em relação ao diagnóstico e manejo terapêutico mais personalizado, principalmente na área da cardiologia. A aplicação mais

promissora é a "bioprintagem" e "impressão molecular", o que permitirá uma abordagem mais eficaz para várias patologias cardíacas. Em outra perspectiva, outras ferramentas de nanotecnologia, como a edição gênica, podem ser utilizadas para compreender melhor o mecanismo de desenvolvimento das doenças cardíacas e rastrear medidas terapêuticas.

Para tanto, Boer *et al.* (2022) exploram mutações em genes que levam à manifestação de fenótipos específicos das cardiomiopatias, como, por exemplo, o caso da hipertrofia e dilatação ventricular. Apesar da pesquisa dessas patologias genéticas ser um desafio, os autores abordam alguns estudos que vêm sendo desenvolvidos, como é o caso da biotinta feita a partir de células-tronco, o que permite a criação de tecidos para bioimpressão. O referido estudo faz uso de células-tronco pluripotentes induzida com células hiPSC-CMs, no qual a meta com essas células é alcançar a criação de tecidos cardíacos tridimensionais através da bioimpressão partindo do cultivo celular, visando estudar uma estrutura multicelular semelhante à estrutura cardíaca biológica e permitindo relacionar a manifestação de doenças cardíacas com a mutação gênica induzida no cultivo. Assim, a combinação de nanotecnologia e bioimpressão permite compreender melhor as manifestações de fenotipagem celular colaborando para medicina de precisão em cardiomiopatias genéticas ou adquiridas e viabilizando estudar novos alvos terapêuticos nesse sentido.

Topuzov *et al.* (2022) estudaram a utilização de simuladores de realidade virtual para a escolha ideal de *stents* usados especialmente na terapêutica percutânea de coarctação de aorta em crianças, uma doença congênita que consiste no estreitamento de um pequeno trecho da artéria aorta em sua porção descendente. Para tal planejamento, são utilizados modelos virtuais de aorta, baseados em tomografia computadorizada (TC) e simuladores de realidade virtual. Essa ferramenta auxilia na minimização de erros futuros na seleção de *stents*, permitindo uma aplicação mais ampla no planejamento de tratamentos intravasculares para coarctação aórtica. Salewski *et al.* (2022) e Ghosh *et al.* (2022) apresentam evidências da superioridade do uso de modelos impressos em 3D em comparação com materiais de ensino baseados em imagens 2D convencionais no estudo da ecocardiografia transtorácica (TTE) já que são úteis para uma compreensão mais aprofundada da anatomia do coração e permitem melhor entendimento visual e palpável, exemplificado na **Figura 22.3**. A impressora utilizada pelos autores consegue confeccionar modelos com precisão de até 0,014 mm em materiais maleáveis, como borracha (Agilus 30, Stratasys, Eden Prarie MN) que facilita a interação com as estruturas. Tal fato permite aos cirurgiões testar locais de ventriculotomia, avaliar a exposição dos VSDs (defeito de septo ventricular) através da válvula tricúspide, e determinar a distância e a geometria de vasos anômalos em pacientes submetidos a reparo de drenagem venosa pulmonar anômala. Os autores apontam que houve uma evolução conjunta na modelagem digital e virtual em virtude do desenvolvimento do módulo SlicerVR no 3D Slicer, onde os arquivos usados para criar modelos impressos puderam ser importados para o espaço virtual em poucos minutos. A integração da realidade virtual (VR) com o programa de modelagem foi impulsionada principalmente por solicitações da equipe cirúrgica e intervencionista.

Figura 22.3 Detalhamento dimensional de órgão impresso para estudo



Com isso, ocorreu um acréscimo na aplicação da modelagem baseada em *Computer Aided Design* (CAD) de reparos cirúrgicos potenciais. Bafles intracardíacos, condutos de Fontan, enxertos de interposição, retalhos simples de VSD e outras estruturas foram projetados usando uma junção de ferramentas proprietárias e de código aberto. Isso facilitou a avaliação de reparos possivelmente necessários em relação às estruturas ao redor da região de interesse e a visualização de lesões residuais. Dentre os principais desafios para a criação dos modelos, estão as imagens-fonte de baixa resolução. A iniciativa para esse obstáculo foi o estabelecimento de diretrizes para a resolução aceitável e qualidade de imagens seccionais, ocorrendo, dessa forma, grande acréscimo na eficiência e no nível de detalhe na geração dos modelos. Além disso, a associação do estudo pré-procedimento em modelos a um espaço dedicado a imagens 3D próximo aos profissionais gerou um aumento da comunicação e colaboração e incremento do uso das ferramentas de visualização tridimensional. Brunner *et al.* (2022) apontam que, a partir do avanço tecnológico, os modelos impressos 3D foram introduzidos nos cursos de anatomia, objetivando facilitar tanto a compreensão de anormalidades cardíacas quanto a comunicação médico-paciente pela compreensão visual e palpável, apontando vantagem para um planejamento cirúrgico personalizado. De acordo com o presente estudo, foi analisado o potencial observado quanto à utilização de modelos 3D para treinamento no campo da cirurgia cardíaca pediátrica. O estudo demonstrou que o tempo para realização de tarefas pode ser diminuído a partir da repetição de um exercício inúmeras vezes. Portanto, considerando que a confiança do cirurgião é muito importante para o sucesso do procedimento, tanto o médico quanto o paciente poderiam se beneficiar com o treinamento pré-procedimento nos laboratórios com o modelo cardíaco tridimensional, como no caso da diminuição do tempo em cirurgia.

Não obstante, Sun (2023), Sadeghi *et al.* (2021) e Illman *et al.* (2020) apontam, sinergicamente, que a geração de modelos cardíacos 3D a partir de imagens 2D envolve tanto um processamento semi-automático quanto edição manual. A tomografia computadorizada é a modalidade mais usada para impressoras 3D por conta de sua resolução espacial. Porém, ressonância magnética cardíaca e ecocardiografia também podem ser utilizadas. Os modelos impressos tridimensionais são valiosos na educação médica oferecendo vantagens sobre as imagens tradicionais no entendimento de anatomia e patologia cardíaca. Outra ferramenta inovadora é o uso de realidade virtual (VR), realidade aumentada (AR) e realidade mista (MR) como uma alternativa para os modelos 3D. O usuário está mergulhado em um ambiente virtual (VR)

enquanto na realidade aumentada (AR) os objetos se sobrepõem ao mundo real, já em realidade mista (MR) há a possibilidade de objetos do mundo real, interagir com elementos virtuais. Assim como os modelos impressos, essas realidades podem ser utilizadas no planejamento, simulação e aprendizagem cirúrgica. Os autores indicam que VR e MR aplicadas para planejamento cirúrgico e estudo anatômico são mais eficientes em comparação aos modelos 3D, porém, foi apontado que grande parte dos usuários relata que ambas as modalidades se complementam.

Harb *et al.* (2019) abordam o impacto da impressão 3D cardíaca que tem se mostrado uma ferramenta poderosa para melhorar a visualização anatômica, o planejamento de procedimentos e a simulação de intervenções percutâneas, especialmente em doenças cardíacas estruturais. Esse processo envolve a criação de réplicas anatômicas específicas para cada paciente, com base em dados volumétricos de imagem obtidos por técnicas como ecocardiografia, tomografia computadorizada (TC) ou ressonância magnética (RM). A impressão 3D tem sido amplamente utilizada no planejamento de intervenções cardíacas, como substituições transcateter de válvulas (TAVR), fechamento de fístulas paravalvares (PVL), e oclusão de apêndice atrial esquerda (LAA). Modelos impressos ajudam a entender melhor a anatomia individual do paciente e prever possíveis complicações durante os procedimentos. Além disso, os modelos impressos também têm sido usados no ensino e treinamento de residentes e profissionais de saúde, permitindo simulações práticas de procedimentos complexos. Isso é importante em intervenções minimamente invasivas, que exigem precisão. No entanto, esse modelo apresenta desafios e limitações, como por exemplo, a ausência de estudos clínicos que comprovem o valor agregado da impressão 3D para os resultados dos pacientes. Não há também uma metodologia aceita para avaliar a precisão dos modelos impressos, o que dificulta a replicabilidade e a padronização dos processos. Apesar de seu potencial, a adoção generalizada da impressão 3D em clínicas e hospitais ainda é limitada pelos custos, pela falta de dados robustos e pela falta de padronização no processo.

Marella *et al.* (2023) investigam a utilização de modelos cardíacos impressos em 3D como uma ferramenta inovadora para aprimorar a comunicação entre profissionais de saúde e pais durante o aconselhamento pré-natal sobre doenças cardíacas congênitas (DCC). O estudo piloto avaliou a viabilidade e a eficácia desses modelos em comparação com métodos tradicionais, como desenhos bidimensionais, focando na compreensão e no conhecimento dos pais sobre condições como a comunicação interventricular (CIV) e a coarctação da aorta. Os resultados mostraram que o uso de modelos 3D não apenas é viável, mas também pode melhorar a compreensão de pais e/ou familiares, com a maioria dos cardiologistas concordando que esses modelos facilitaram a comunicação e aumentaram a satisfação durante as consultas. Além disso, o artigo discute as limitações do estudo, como o pequeno tamanho da amostra e a avaliação de um número restrito de lesões cardíacas, e sugere a necessidade de pesquisas futuras com amostras maiores e modelos para lesões mais complexas. O impacto emocional do diagnóstico de DCC também é abordado, com a hipótese de que os modelos 3D podem ajudar a reduzir a ansiedade parental associada a esses diagnósticos. Assim, o estudo destaca a importância de uma comunicação eficaz no aconselhamento pré-natal e o potencial dos modelos 3D como ferramentas educativas que beneficiam tanto os profissionais de saúde quanto as famílias.

Fan *et al*. (2019), em concordância, evidenciam que o uso de impressoras em 3D apresenta vantagens na abordagem de procedimentos que envolvem a recuperação de danos da estrutura cardíaca como, por exemplo, regurgitação mitral ou defeitos no septo atrial. Isso porque a reconstrução em 3D das imagens cardíacas colabora para o melhor planejamento cirúrgico e por decorrência reduzem o tempo de procedimento realizado. Lee *et al*. (2019) corroboram Fan *et al.* (2019) e apontam que os modelos anatômicos oriundos da impressão 3D possibilitam benefícios para além do planejamento cardíaco, auxiliando no treinamento de estudantes de medicina e residentes no que tange à compreensão da morfologia cardíaca, suas estruturas e até mesmo a textura de seus componentes. Os autores apresentam em seu estudo o uso de ferramentas 3D de forma complementar aos exames de imagem como a tomografia computadorizada a fim de estudar anormalidades anatômicas do coração.

Para Chan *et al*. (2020) e Mori *et al.* (2021), a ecocardiografia, em associação com a tomografia, permite a elaboração de imagens em 3D de forma individualizada e personalizada dos pacientes, a fim de estudar as alterações estruturais cardíacas bem como realizar um planejamento intervencionista de acordo com as necessidades de cada indivíduo. Em seu estudo, Luxford *et al*. (2023) apresentam métodos mistos que investigam a eficácia de modelos impressos em 3D e um módulo online no ensino de patologia cardíaca pediátrica para estudantes de medicina. A pesquisa envolveu questionários e grupos focais, onde os alunos expressaram suas atitudes e percepções sobre o uso desses recursos. Os resultados mostraram que os estudantes consideraram a experiência divertida e inovadora, quando comparada com métodos de ensino mais tradicionais, como livros didáticos ou recursos online que os ajudaram a compreender melhor as complexidades das doenças cardíacas congênitas. A participação foi voluntária e os dados foram coletados após um *workshop* obrigatório, permitindo uma análise aprofundada da autoeficácia e do engajamento dos alunos. Além disso, o estudo enfatiza a importância da autoeficácia e autonomia na aprendizagem, sugerindo que a utilização de recursos tecnológicos, como modelos 3D, pode melhorar a confiança e a competência dos estudantes em contextos clínicos.

O estudo de Milano *et al.* (2019) discute a aplicação da impressão 3D na cirurgia cardíaca congênita, destacando sua capacidade de criar modelos físicos personalizados que ajudam a entender a complexidade da anatomia em pacientes com doenças congênitas. Segundo o estudo, a impressão 3D permite uma visualização mais clara das relações espaciais e dimensões reais das estruturas cardíacas e extracardíacas, o que pode ser benéfico tanto para médicos experientes quanto para aqueles com menos familiaridade em interpretar imagens cardiovasculares. Conforme demonstrado pelos autores, a tecnologia tem se mostrado valiosa na preparação para cirurgias e na comunicação entre médicos e pacientes, melhorando a adesão e a satisfação do paciente. Ademais, os autores enfatizam a importância da colaboração entre engenheiros biomédicos e clínicos na criação de modelos 3D, sugerindo que a formação de operadores especializados em impressão 3D pode ser necessária para aplicações cardíacas específicas. O estudo também menciona que a redução do tempo de pós-processamento e a melhoria das técnicas de impressão 3D podem facilitar a tradução dessa tecnologia na prática clínica, prometendo avanços significativos no tratamento de doenças cardíacas congênitas no futuro.

Por outro lado, Sandrini *et al*. (2020) apresentam uma série de casos que exploram a viabilidade da impressão 3D de corações fetais

normais e com doenças cardíacas congênitas a partir de dados de microtomografia computadorizada (micro-CT). A pesquisa incluiu 21 modelos de anatomias cardiovasculares fetais, obtidos por meio de micro-CT pós-morte, com foco em questões técnicas relacionadas aos processos de imagem e impressão. Os autores destacam a importância da segmentação e da impressão de estruturas complexas, que podem exigir orientação especializada para a identificação de características anatômicas relevantes. Além disso, o estudo aborda a diversidade das amostras, que incluem casos de baixa idade gestacional e recém-nascidos de baixo peso, permitindo uma análise abrangente das morfologias cardíacas. Os resultados sugerem que a micro-CT é uma ferramenta promissora para a avaliação de DCC, oferecendo uma alternativa valiosa à autópsia convencional. A pesquisa contribuiu para o entendimento das aplicações da impressão 3D na cardiologia pediátrica, com implicações significativas para o planejamento cirúrgico e a educação médica.

Mattus *et al*. (2022) apontam terapias alternativas para defeitos cardíacos congênitos, com foco na impressão 3D de estruturas cardíacas, para intervenções cirúrgicas e o uso de silicone como material base para essas estruturas. Os modelos feitos de silicone oferecem uma alternativa mais econômica de tratamento, além de proporcionarem textura e organicidade mais realista, auxiliando na prática terapêutica. Para a produção dessas estruturas, deve-se segmentar a anatomia cardíaca do paciente através de um *software* de segmentação CAD para criar um modelo digital específico e personalizado da estrutura a ser impressa. Após esse processo, o modelo digital vai ser introduzido na impressora 3D que dará início a produção do molde, onde, futuramente, será despejado o silicone. O processo todo, até a secagem da estrutura, possui uma duração média de 36 horas. Assim, ao concluir o protocolo, espera-se obter um modelo cardíaco de silicone específico para o paciente, para preparo cirúrgico. Conforme a complexidade anatômica do modelo aumenta, o protocolo pode ser adaptado para aumentar o número de peças no molde, exigindo projetos e tempo de *designs* mais precisos. Embora este protocolo seja um avanço, possui limitações, como a diferença entre a elasticidade do silicone e a fragilidade do tecido cardíaco real e o alto custo. Uma possível melhoria é a mudança de material, que diminuirá o custo, além de aprimorar a compatibilidade funcional do modelo impresso.

Apesar dos inquestionáveis avanços na impressão 3D e seu comprovado valor clínico e educacional, ainda existem desafios como o alto custo financeiro, o acesso limitado aos equipamentos e a preferência pela tradição de imagens 2D. Além disso, a demora no pós-processamento das estruturas e problemas no processo de impressão pode atrasar o tratamento dos pacientes fazendo com que o uso de VR e MR tenha um maior custo-benefício. Estudos mais atuais e mais sólidos são necessários e devem focar no prognóstico dos pacientes, impactos em longo prazo e custo-benefício comparados aos métodos tradicionais. Sendo assim, os avanços acerca do uso de tecnologia 3D na impressão de tecidos cardíacos carregam um potencial significativo no tratamento de cardiopatias congênitas futuras.

CONCLUSÃO

Com base na análise das diversas tecnologias discutidas, a pesquisa ocupou-se em destacar o papel transformador da impressão 3D, da realidade virtual (RV) e das técnicas avançadas de imagem em cardiologia e cirurgia cardiotorácica. A impressão 3D prova, a cada dia, ser ferramenta essencial para o planejamento de

procedimentos, educação médica e comunicação com pacientes e familiares. Tecnologias como modelagem computacional 3D e *displays* holográficos avançados oferecem novas formas de visualização e interação, permitindo melhor compreensão de análises cardíacas complexas e personalização de tratamentos. O uso de modelos específicos do paciente, como aqueles obtidos a partir de dados de tomografia computadorizada, comprova o potencial dessas tecnologias para fornecer suporte detalhado ao planejamento cirúrgico e à educação médica.

Por outro lado, este capítulo também destaca os desafios financeiros e técnicos associados à implementação generalizada destas tecnologias. Os altos custos e a falta de padronização dos processos de impressão e modelagem continuam sendo obstáculos significativos. A esperança de que a concorrência no mercado possa reduzir custos nos próximos anos, combinada com a colaboração multidisciplinar, contribui para a intensificação sustentável destas ferramentas no futuro. No entanto, mais pesquisas são necessárias para padronizar as metodologias e avaliar os impactos diretos dos simuladores de impressão 3D e da RV nos resultados clínicos dos pacientes, especialmente no que diz respeito à precisão dos modelos impressos e à eficácia das simulações em contextos clínicos, além de aprimoramento em engenharia de nanomateriais que mais intimamente, quando associados às impressões 3D, vençam as barreiras em biocompatibilidade.

Estes resultados sugerem que, superando os desafios dos custos e da padronização, estas tecnologias têm o potencial de revolucionar os cuidados em cardiologia e cirurgia cardiotorácica, abrindo caminho para intervenções mais seguras, personalizadas e eficazes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOER, R.A. *et al.* Targeted therapies in genetic dilated and hypertrophic cardiomyopathies: from molecular mechanisms to therapeutic targets. A position paper from the Heart Failure Association (HFA) and the Working Group on Myocardial Function of the European Society of Cardiology (ESC). European Journal of Heart Failure, v. 24, p. 406, 2022. doi: 10.1002/ejhf.2414.

BRUNNER, B.S. *et al.* 3D-printed heart models for hands-on training in pediatric cardiology – the future of modern learning and teaching? Journal for Medical Education, v. 39, 2022. doi: 10.3205/zma001544.

CERNICA, D. *et al.* 3D printing: a cutting edge technology for treating post-infarction patients. Life Journal, v. 11, 2021. doi: 10.3390/life11090910.

CHAN, J.S.K. *et al.* Echocardiography update for primary care physicians: a review. Hong Kong Medical Journal, v. 26, p. 44, 2020. doi: 10.12809/hkmj198080.

DAVE, S. *et al.* Advancements in healthcare through 3D-printed micro and nanosensors: innovation, application, and prospects. Hybrid Advances, v. 7, 2024. doi: 10.1016/j.hybadv.2024.100311.

FAN, Y. *et al*. Three-dimensional printing in structural heart disease and intervention. Annals of Translational Medicine, v. 7, 2019. doi: 10.21037/atm.2019.09.73.

GHOSH, R.M. *et al.* Clinical 3D modeling to guide pediatric cardiothoracic surgery and intervention using 3D printed anatomic models, computer aided design and virtual reality. 3D Printing in Medicine, v. 8, 2022. doi: 10.1186/s41205-022-00137-9.

HARB, S.C. *et al.* Three-dimensional printing applications in percutaneous structural heart interventions. Circulation: Cardiovascular Imaging, v. 12, 2019. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.119.009014.

ILLMAN, C.F. *et al*. Utility and access to 3-dimensional printing in the context of congenital heart disease: an international physician survey study. CJC Open Journal, v. 2, p. 207, 2020. doi: 10.1016/j.cjco.2020.01.008.

LEE, M. *et al.* Evaluating 3D-printed models of coronary anomalies: a survey among clinicians and researchers at a university hospital in the UK. BMJ Open, v. 9, e025227, 2019. doi: 10.1136/bmjopen-2018-025227.

LINDQUIST, E.M. *et al.* 3D printing in cardiology: a review of applications and roles for advanced cardiac imaging. Annals of 3D Printed Medicine, v. 4, 2021. doi: 10.1016/j.stlm.2021.100034.

LUXFORD, J.C. *et al.* An opportunity to see the heart defect physically: medical student experiences of technology-enhanced learning with 3D printed models of congenital heart disease. Medical Science Educator, v. 33, p. 1095, 2023. doi: 10.1007/s40670-023-01840-w.

MARELLA, N.T *et al.* 3D-printed cardiac models for fetal counseling: a pilot study and novel approach to improve communication. Pediatric Cardiology, v. 44, p. 1800, 2023. doi: 10.1007/s00246-023-03177-y.

MATTUS, M.S. *et al.* Creation of patient-specific silicone cardiac models with applications in pre-surgical plans and hands-on training. Journal of Visualized Experiments, v. 180, e62805, 2022. doi: 10.3791/62805.

MILANO, E.G. *et al.* Current and future applications of 3D printing in congenital cardiology and cardiac surgery. Brazilian Journal Radiology, v. 91, e20180389, 2019. doi: 10.1259/bjr.201803897.

MORI, S. & SHIVKUMAR, K. Real three-dimensional cardiac imaging using leading-edge holographic display. Clinical Anatomy, v. 34, p. 966, 2021. doi: 10.1002/ca.23761.

SADEGHI, A.H. *et al.* The digital heart–lung unit: applications of exponential technology. European Heart Journal, v. 2, p. 713, 2021. doi: 10.1093/ehjdh/ztab069.

SALEWSKI, C. *et al.* The impact of 3D printed models on spatial orientation in echocardiography teaching. BMC Medical Education, v. 11, 2022. doi: 10.1186/s12909-022-03242-9.

SANDRINI, C. *et al.* Three-dimensional printing of fetal models of congenital heart disease derived from microfocus computed tomography: a case series. Frontiers in Pediatrics, v. 7, 2020. doi: 10.3389/fped.2019.00567.

SANTOS, J. *et al.* 3D Printing and nanotechnology: a multiscale alliance in personalized medicine. Advanced Functional Materials, v. 31, 2021. doi: 10.1002/adfm.202009691.

SUN, Z. Patient-specific 3D-printed models in pediatric congenital heart disease. Children, v. 10, 2023. doi: 10.3390/children10020319.

TOPUZOV, N. *et al.* Virtual simulations in planning intravascular treatment of aortic coarctation: a retrospective analysis. Advances in Interventional Cardiology, v. 18, p. 276, 2022. doi: 10.5114/aic.2022.12037