

Integração de processos de impressão 3D para o desenvolvimento e produção de biomodelos anatômicos para uso didático

Integrating 3D printing processes for the development and production of anatomic biomodels for didactic use

Claudio Pereira de Sampaio, Dr, Universidade Estadual de Londrina

claudiopereira@uel.br

Sonia Maria Fabris, Dr, Universidade Estadual de Londrina

sofabris@uel.br

José Antonio Vicentin, Designer, Laboratório de P&D e Fabricação Digital do HU-UEL (Fab.i HU)

zevicentin@gmail.com

Lucas Maiola Astolfo, Fisioterapeuta, Laboratório de P&D e Fabricação Digital do HU-UEL (Fab.i HU)

lucas.maiola.astolfo@uel.br

Resumo

Este artigo apresenta e descreve o processo de desenvolvimento de um biomodelo de uso didático para o ensino de anatomia, o qual foi produzido por meio de impressão 3D combinando-se o uso de duas tecnologias distintas: impressão por filamento fundido (FDM) e impressão por processamento digital de luz (*digital light processing*, ou DLP) com resina líquida. O método de pesquisa baseia-se em experimentação com prototipagem e teste de um artefato com base em design. Os resultados indicaram que o processo aqui descrito possibilita a criação de um biomodelo de uso didático com boa qualidade de detalhes, e que a combinação de processos distintos de impressão 3D é uma estratégia eficaz para esta finalidade. Também foi possível verificar que, sob a ótica da sustentabilidade, este processo apresenta alguns aspectos ambientais, sociais e econômicos vantajosos, bem como outros que podem ser aprimorados, em especial quanto às questões de fim de vida dos materiais utilizados.

Palavras-chave: Modelos anatômicos; ensino de anatomia; impressão 3D.

Abstract

This article presents and describes the development process of a biomodel for teaching anatomy, which was produced by 3D printing combining the use of two distinct technologies: fused filament printing (FDM) and digital light processing (DLP) printing with liquid resin. The research method is based on experimentation with prototyping and testing of a design-based artifact. The results indicated that the process described here enables the creation of a biomodel for teaching with good quality details, and that the combination of distinct 3D printing processes is an effective strategy for this purpose. It was also possible to verify that, from a sustainability perspective, this process presents some advantageous environmental, social and economic aspects, as well as others that can be improved, especially regarding end-of-life issues of the materials used.

Keywords: Anatomic models; anatomy teaching; 3D printing.

1. O uso de biomodelos no ensino em cursos na área de saúde

O ensino atual na área da saúde vem utilizando-se de novas técnicas e metodologias para melhorar o processo de ensino-aprendizagem, as habilidades e competências dos acadêmicos (Louredo *et al.*, 2019). O uso de impressão tridimensional nos estudos da anatomia e outras disciplinas com a intenção de complementar as aulas, evidencia um campo alternativo que contribui e aprimora a qualidade da aprendizagem e o entendimento das estruturas anatômicas (Louredo *et al.*, 2019); Barbosa *et al.*, 2021). Seu uso como recurso educacional incentiva a participação ativa dos acadêmicos a desenvolverem o raciocínio lógico e a capacidade de resolver problemas (Suárez-Escudero *et al.*, 2020).

A anatomia está presente nas diversas áreas das ciências da saúde, dentre elas a fisioterapia, e vem sendo beneficiada com a impressão 3D, pois esta minimiza um problema crônico em função da falta de peças anatômicas humanas, por vezes de má qualidade devido a deterioração orgânica das peças e possibilita um maior manuseio e entendimento do assunto (Louredo *et al.*, 2019). A importância da tecnologia de manufatura aditiva está diretamente relacionada ao fato de oportunizar aos graduandos formas ativas e didáticas de ensino, focadas no tato (essencial no ensino de aluno deficiente visual), na visualização em escala real de tamanho e detalhes, no reconhecimento das estruturas ósseas e segmentares da peça, além da identificação de alterações em exames de imagem digital, como a tomografia computadorizada (TC) e ressonância magnética (RM), contribuindo efetivamente para a melhoria do processo de aprendizagem e uma formação de maior qualidade (Balestrini, C. & Campo-Celaya, T., 2016).

Os biomodelos em 3D são a representação anatômica, produzidos a partir de imagens digitais do próprio paciente adquiridas por RM ou TC (Garcia *et al.*, 2022). Estes permitem o aprendizado com estruturas detalhadas, próximas às reais e que o aluno se conecte e interaja mais com os projetos e a metodologia de ensino garantindo aulas mais interativas e dinâmicas, onde o desenvolvimento do pensamento crítico e analítico é estimulado para a tomada de decisão, ao mesmo tempo em que contribui efetivamente para a prática docente do professor universitário (Barbosa *et al.*, 2021). De acordo com Onisaki & Vieira (2019) a disseminação da impressão 3D e seu uso como ferramenta pedagógica possibilita aos professores produzirem seus próprios materiais educativos, atendendo de forma mais assertiva as necessidades observadas em suas práticas em sala de aula (Onisaki, H. H. C., & Vieira, R. M.B., 2019). Orlando *et al.* (2009) afirmam que os biomodelos impressos em 3D juntamente com a teoria pode propiciar a reflexão e o aprofundamento do conteúdo teórico, pois o fato de visualizar o biomodelo permite ao aluno manusear o material, visualizando-o os detalhes de vários ângulos e, melhorando assim sua compreensão e fixação conteúdo abordado (Aguiar, L. D. C. D., 2016).

Ter este recurso tecnológico nas universidades permite criar ou recriar um modelo real, de forma prática, palpável, produzido em pouco tempo e a um preço acessível. Isso possibilita o acesso a realidade laboral do estudante em todos os cursos na área de saúde, bem como, em outros cursos que utilizam dessa tecnologia da modelagem em 3D (Louredo *et al.*, 2019). Verifica-se, portanto, que os biomodelos impressos em 3D são uma forma alternativa de material didático-pedagógico que visa facilitar a compreensão do ensino e em associação às aulas teórico-práticas proporciona melhor compreensão ao aluno, por meio da observação, análise e manipulação desses materiais, uma vez que a aprendizagem é mais eficaz quando confrontada com o material do estudo (Orlando *et al.*, 2009).

2. A produção de biomodelos por meio de impressão 3D

A impressão 3D vem revolucionando a medicina, proporcionando modelos anatômicos precisos, de baixo custo e rápidos de serem produzidos para ensino e pesquisa, bem como para diagnóstico e planejamento cirúrgico. Os biomodelos impressos em 3D permitem a

visualização detalhada de estruturas anatômicas, e tal fato amplia seu uso não só para o estudo, mas também como forma de melhorar a tomada de decisões médicas, reduzindo riscos cirúrgicos. Mas há também desafios técnicos e logísticos que exigem um conhecimento aprofundado dos processos e materiais, garantindo que os modelos atendam aos padrões clínicos e operacionais exigidos na área da saúde. A construção dos biomodelos passa por alguns passos:

- Aquisição de Dados por meio de imagens médicas, geralmente obtidas de tomografia computadorizada (TC) ou ressonância magnética (RM). Essas imagens são convertidas em arquivos DICOM (formato universal de arquivos tomográficos);
- Geração de Malha, Segmentação e Modelagem em softwares especializados, como o Invesalius, o Materialise Mimics e o 3D Slicer, que são utilizados para segmentar as imagens e gerar um modelo tridimensional da estrutura anatômica desejada. Esse modelo é exportado em formato STL para a impressão;
- Escolha do Método de Impressão: os principais métodos utilizados são o FDM, ideal para modelos didáticos e de planejamento cirúrgico básico, e o DLP, que proporciona alta precisão, sendo indicado para modelos detalhados e simulações;
- Pós-processamento: inclui a remoção de suportes, polimento e esterilização (se necessário). Dependendo do material utilizado, pode ser necessário tratamento adicional para melhorar a durabilidade e biocompatibilidade do modelo.

Nesse processo, os problemas mais comuns enfrentados são as imagens de baixa resolução, que podem comprometer a precisão dos biomodelos, bem como erros na conversão de DICOM para STL, que pode introduzir falhas na geometria, sendo necessário revisar o modelo em softwares de edição e corrigir os erros antes da impressão. Escolhas inadequadas de materiais também podem comprometer a resistência e usabilidade do modelo. É importante selecionar materiais específicos para cada aplicação, considerando fatores como rigidez, biocompatibilidade e flexibilidade. O processo a ser relatado neste artigo apresenta e discute um exemplo de seleção de materiais e processos conforme a necessidade de cada componente do biomodelo para uso didático.

3. Processos FDM e DLP para impressão 3D para biomodelos

A tecnologia de impressão 3D FDM (*Fused Deposition Modeling*) e DLP (*Digital Light Processing*) são amplamente utilizadas na área médica para a produção de biomodelos anatômicos, cada uma com suas características específicas. O método FDM permite a criação de modelos resistentes e de baixo custo. Essa tecnologia é ideal para prototipagem rápida e para a produção de biomodelos de grande escala, sendo útil em planejamentos cirúrgicos e no ensino médico. No entanto, sua principal desvantagem é a menor resolução e acabamento superficial mais rugoso, o que pode limitar a reprodução precisa de detalhes anatômicos finos.

Já a tecnologia DLP produz modelos com alta precisão e excelente nível de detalhes. Essa característica torna o DLP ideal para biomodelos que exigem superfícies lisas e formas anatômicas detalhadas, como estruturas ósseas complexas ou vasos sanguíneos. Além disso, a resina pode ser formulada para apresentar propriedades biomecânicas semelhantes às de tecidos humanos, ampliando sua aplicabilidade na simulação cirúrgica e no desenvolvimento de próteses personalizadas. No entanto, o custo dos materiais e dos equipamentos DLP é significativamente mais alto que o FDM, além de exigir um processo de pós-cura que pode aumentar o tempo total de produção. Outro fator é que esta tecnologia normalmente possui área de impressão reduzida, limitando o uso a estruturas pequenas.

Portanto, a escolha entre FDM e DLP na impressão de biomodelos depende das necessidades específicas do projeto. Enquanto o FDM se destaca pelo custo acessível e pela

produção de modelos maiores e mais robustos, o DLP é a melhor opção para quem busca detalhes precisos e superfícies lisas. Em muitos casos, uma abordagem híbrida pode ser adotada, combinando as vantagens das duas tecnologias para otimizar a qualidade e a funcionalidade dos biomodelos utilizados na área médica.

3. O Laboratório Fab.i HU

A impressão 3D tem sido usada de maneiras cada vez mais avançadas na área da saúde, permitindo novos níveis de precisão, personalização e eficiência de custos. Sua popularização se deu principalmente na época da pandemia de Covid-19. Neste mesmo período foi fundado, uma parceria do Design e Fisioterapia, o Laboratório de P&D e Fabricação Digital do Hospital Universitário de Londrina (Fab.i HU), sendo institucionalizado pelo referido hospital em 2021. A princípio o laboratório foi concebido para repor a falta de EPIs no hospital e evitar que os profissionais da saúde se contaminassem, e em seguida, com o objetivo de desenvolvimento e produção de produtos que atendesse as necessidades dos pacientes internados e dos profissionais ao desempenharem suas funções.

Neste período de quatro anos foram realizadas Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e fabricação digital de equipamentos hospitalares; pesquisa de materiais e processos; processos de inovação e produtos, e modelagem 3D; digitalização 3D; impressão de biomodelos para cirurgia bucomaxilofacial a partir de imagem de tomografia computadorizada, entre outros, com auxílio de bolsistas de iniciação científica e tecnológica dos cursos de Design e Fisioterapia da Universidade Estadual de Londrina - UEL. O ano de 2024 foi marcado pela consolidação e divulgação interna e externa do laboratório, assim como dos processos, produtos e impactos sociais gerados para a comunidade. Além da expansão da área de infraestrutura do laboratório, a atuação foi diversificada para as diversas áreas da saúde que integram o hospital, sendo que uma das aplicações mais promissoras atualmente é o desenvolvimento de biomodelos anatômicos como ferramenta pedagógica no curso de Fisioterapia da UEL.

4. Procedimentos Metodológicos

A metodologia utilizada neste estudo é de caráter experimental, com foco na captura e edição de imagens clínicas em softwares 3D, produção e teste de protótipos em laboratório equipado com equipamentos de impressão 3D, seguida da avaliação de uso em ambiente de sala de aula com estudantes de Fisioterapia. Deve-se ressaltar que os resultados deste estudo, apresentados a seguir, abrangem tanto a sistematização e descrição do processo quanto os artefatos dele resultantes. Em seguida estes resultados serão então discutidos a partir de aspectos técnicos, de uso, ambientais, sociais e econômicos.

5. Resultados

O desenvolvimento do biomodelo aqui apresentado foi solicitado pelo docente para uso na disciplina de Fisioterapia em Pediatria e Neonatologia, da 3ª série do curso de Fisioterapia da UEL, com o objetivo de facilitar o ensino sobre a fisiologia de partes anatômicas do conjunto respiratório formado por pulmões, traquéia, brônquios e suas ramificações. Para o desenvolvimento foram utilizados os seguintes equipamentos, insumos e softwares: Notebook Helios Predator com processador core i7 10750H, 16Gb de memória RAM, placa de vídeo RTX2060 e SSD 512 Gb; 02 impressoras FDM Creality Ender 5 Plus com bico de impressão 0.4mm; 02 impressoras DLP Creality Halot One; 01 máquina de cura UV Creality UW-01; Filamento de PLA 0.4mm; Resina líquida cristal; Softwares Invesalius 3.1.1, Rhinoceros 3D versão 7.0 Educacional, Ultimaker Cura versão 4.13.1 e Creality Halot Box versão 3.3.8.

O processo de desenvolvimento e teste foi dividido em cinco partes: Parte 1: Etapas comuns a todos os componentes; Parte 2: Etapas específicas do processo FDM; Parte 3: Etapas específicas do processo DLP; Parte 4: Montagem do conjunto; Parte 5: Uso em sala de aula.

Parte 1: Etapas comuns a todos os componentes

A parte 1 do processo incluiu as seguintes etapas:

1. **Definição do objetivo:** Produção de um modelo anatômico de uso didático de um sistema pulmonar infantil (traqueia, pulmões, brônquios e ramificações) para uso na disciplina de Fisioterapia em Pediatria e Neonatologia, da 3ª série do curso de Fisioterapia da UEL;
2. **Obtenção da imagem digital 3D** por meio de tomografia computadorizada, com geração de arquivo DICOM;
3. **Geração do modelo digital 3D** a partir da imagem digital 3D, com uso do software Invesalious. Trata-se de um software de licença aberta (*open source*) que foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer. Seu uso é relativamente fácil, com uma curva de aprendizagem favorável que possibilita seu uso em laboratórios de pesquisa. Possui recursos para a separação de partes por tipo de material (ossos, músculos, gordura etc.) conforme a sua densidade, e permite a geração de uma malha poligonal 3D que pode ser exportada e editada em outros softwares de modelagem 3D. O uso do Invesalious inclui as seguintes sub-etapas:
 - a. Importação do conjunto de imagens obtidas por tomografia: nesta etapa a pasta com os dados da paciente gerados pelo tomógrafo, em formato DICOM, foram importados para o software Invesalious;
 - b. Escolha da região de interesse: nesta etapa as áreas de interesse a serem utilizadas para impressão 3D foram escolhidas, utilizando-se o recurso de camadas a partir de uma faixa de alcance específica, neste caso entre os valores de limiar -766 e -202, relativos a Tecido Epitelial de Criança;
 - c. Configuração da superfície 3D: Para a criação da superfície 3D foi selecionada a superfície gerada anteriormente (em verde), alterando-se a visualização para transparência intermediária, a fim de facilitar a visualização das formas tridimensionais, especialmente das com muitos detalhes, como os brônquios;
 - d. Exportação do modelo 3D em formato. stl: após a geração da superfície 3D, a última etapa foi a exportação do modelo em formato. stl, para que pudesse ser editado em softwares de modelagem 3D.

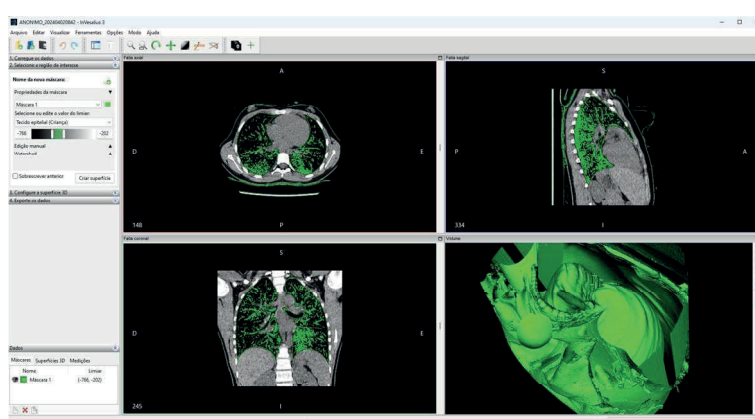


Figura 1: Escolha da região de interesse no software Invesalious.

4. Importação e edição do modelo digital 3D no software Meshmixer para limpeza e retirada de partes desnecessárias e redução do tamanho

Para a preparação do modelo digital 3D foi utilizado o software Meshmixer, de uso gratuito, que apresenta uma boa capacidade de abertura de arquivos de modelos 3D complexos de grande tamanho, bem como recursos que permitem otimizá-los. Após a importação do modelo foi

realizada a limpeza, retirando-se todas as partes que não seriam necessárias, como partes da roupa, pele e outros objetos capturados na tomografia. Além disso, um dos maiores desafios ao se manipular modelos digitais 3D oriundos de tomografia e do Invesalius é o tamanho significativo dos arquivos, que pode inviabilizar a sua edição, ao exigir uma capacidade de processamento e memória muito alta do computador. Por isso, após a limpeza buscou-se reduzir a resolução da malha gerada, neste caso em 50%, passando-se de 5,2 milhões para 2,6 milhões de faces triangulares. Após a limpeza e redução o modelo foi exportado no formato .stl, para então ser editado no software Rhinoceros 3D.

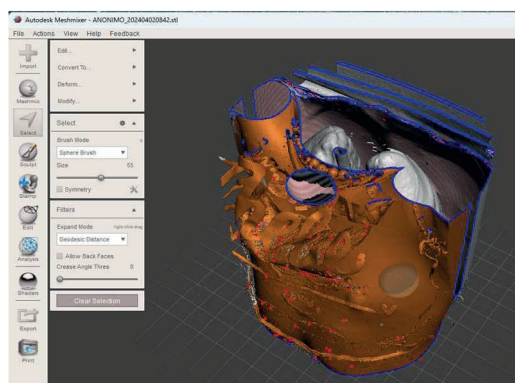


Figura 2: limpeza do modelo no software Meshmixer.

5. Importação e edição do modelo digital 3D no software Rhinoceros 3D, com subdivisão e exportação do modelo em partes independentes

Após a importação para o software Rhinoceros 3D, o modelo 3D foi subdividido, a fim de viabilizar a impressão das partes de forma independente. Buscou-se esta estratégia por ser inviável imprimir o conjunto completo de uma vez só, dada a complexidade dos diversos elementos anatômicos. Assim, optou-se por imprimir as partes maiores e menos complexas (pulmões, traquéia e brônquios) pelo processo de deposição de filamento fundido (FDM), utilizando-se filamento de PLA, enquanto as partes mais complexas e delicadas (ramificações dos brônquios) foram impressas em resina líquida. Para isso, cada parte foi separada em uma camada específica no Rhinoceros e exportada em formato .stl.

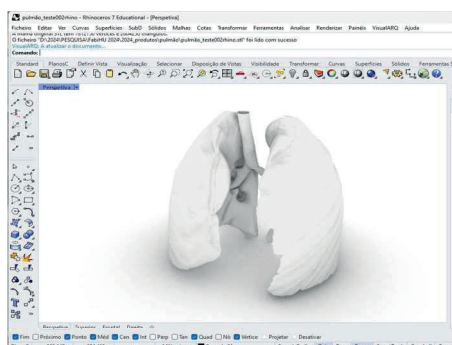


Figura 4: Modelo digital 3D importado para o software Rhinoceros 3D.

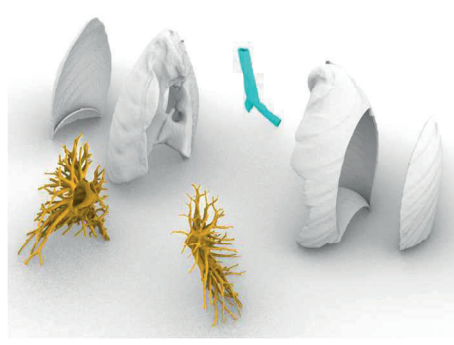


Figura 5: Os componentes do sistema, separados em partes independentes no software Rhinoceros 3D.

5.2 Parte 2: Etapas específicas do processo FDM

Após a separação do sistema em componentes independentes, os que seriam impressos em FDM foram importados para o software Ultimaker Cura, a fim de gerar os arquivos de fatiamento (gcode) que foram então enviados para a impressora 3D Ender 5 Plus.

1. Importação das partes relativas à traqueia e pulmões no software Ultimaker Cura, e preparação para impressão 3D com fatiamento do modelo (gcode)

Para cada um dos componentes foram utilizadas resoluções de impressão diferentes, sendo 0.2 para a traquéia e 0.32 para os pulmões. Além disso, para efeito de teste comparativo, um dos pulmões foi impresso em equipamento com bico extrusor de 0.4mm, e o outro em um equipamento com bico de 1mm. Não houve diferença significativa de qualidade, mas a simulação da impressão em bico de 1mm, realizada no software Cura, indicou um tempo 23% menor (8h30', em vez de 10h56') do que a peça impressa com bico 0.4mm, o que pode implicar em uma redução importante nos tempos de impressão no caso de peças de formato maior. Buscou-se, dessa forma, otimizar o tempo de impressão sem sacrificar a qualidade final da peça, considerando-se a complexidade geométrica de cada uma. Após a etapa de fatiamento, o arquivo .gcode de cada componente foi salvo em um pendrive, e conectado em uma impressora Ender 5 Plus para impressão da peça.

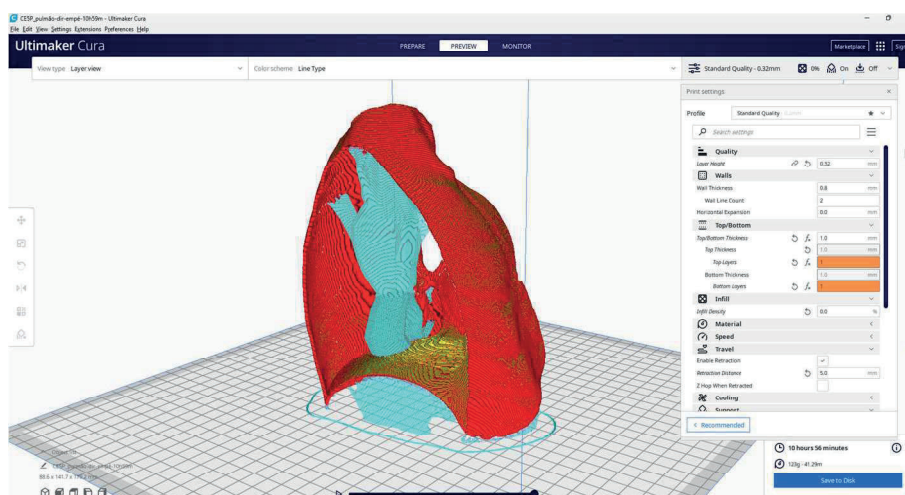


Figura 6: Fatiamento do modelo 3D do pulmão direito, com os suportes de impressão.

2. Colocação do arquivo .gcode na impressora 3D FDM (filamento fundido), impressão 3D da traqueia e pulmões em filamento PLA e retirada dos suportes

As impressões por FDM foram realizadas em dois equipamentos específicos, sendo uma com bico extrusor de 0.4mm (traqueia e pulmão esquerdo) e outra com bico de 1mm (pulmão direito). Os tempos de impressão previstos no software Cura se confirmaram, o que aponta para uma melhor relação custo-benefício ao se imprimir com bico de 1mm; foram mantidas as demais configurações de impressão, em especial a resolução de 0.3mm, que se mostrou suficiente para a impressão os pulmões. A traqueia foi impressa com 0.2mm de resolução, resultando em uma boa qualidade superficial e estrutural, mesmo com uma parede bastante fina, de cerca de 1,5mm, e em um tempo compatível de apenas 1h45'. Houve um ponto de fragilidade de camada de impressão, o qual foi reforçado com aplicação de resina líquida que foi então endurecida em equipamento de cura UV.

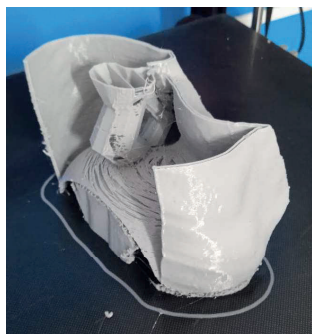


Figura 7: Um dos pulmões sendo impresso em PLA cor cinza, com os suportes de impressão na parte inferior e interna.



Figura 8: Um dos pulmões impresso e recebendo aplicação em resina para reforço de camada.

Parte 3: Etapas específicas do processo DLP

Assim como foi feito para as partes impressas em FDM, após a separação do sistema em componentes independentes, as ramificações dos brônquios (bronquíolos) que seriam impressos em resina líquida pelo processo DLP (Digital Light Processing) foram importados no formato stl para o software Halot Box, a fim de gerar os arquivos gcode que seriam então enviados para a impressora Halot One.

1. Importação de cada uma das partes relativas aos brônquios no software Creality Halot Box, e preparação para impressão com fatiamento do modelo (gcode)

Para a impressão dos bronquíolos foi necessário subdividir os dois conjuntos (esquerdo e direito) em partes menores, devido à limitação de volume da impressora Halot One. Utilizou-se a resolução de camada de 0.1mm, e foram testadas diversas formas de posicionamento e geração de suportes até que fosse encontrada a melhor configuração. O tempo estimado de impressão para cada conjunto de bronquíolos ficou em torno de 5h. Após a etapa de fatiamento, o arquivo gcode de cada componente foi salvo em um pendrive, e conectado em uma impressora Halot One para impressão.

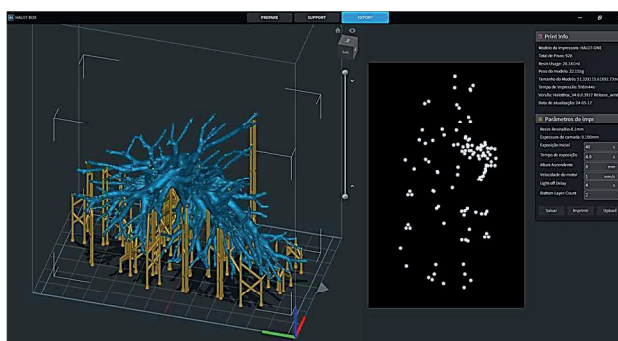


Fig. 9: Fatiamento de um dos conjuntos de brônquios, com os suportes de impressão.

2. Colocação do arquivo gcode na impressora 3D DLP (resina líquida), impressão 3D dos brônquios, retirada de suportes, lavagem com álcool e cura UV

As impressões em resina foram realizadas de forma simultânea em dois equipamentos, sendo um para cada conjunto dos bronquíolos (esquerdo e direito), o que possibilitou uma impressão mais rápida do conjunto. Em ambas foi utilizada resina líquida cristal, e os tempos de impressão previstos no software Halot Box se confirmaram. Após a impressão as peças foram retiradas da plataforma de impressão, foram retirados os suportes de impressão, e cada

peça foi lavada com álcool isopropílico para retirada do excesso de resina. Em seguida as peças foram curadas em equipamento de cura UV.



Fig. 10: Partes dos bronquíolos sendo impressas simultaneamente em duas impressoras de resina.



Fig. 11: Um dos conjuntos impressos, ainda com os suportes fixados à plataforma de impressão.

Parte 4: Montagem do conjunto

Após a impressão de todas as peças em PLA e em resina líquida, foi realizada a montagem do conjunto. Primeiramente foi feita a união da traqueia e dos dois pulmões, aplicando-se resina líquida nas partes em contato, que foi então curada na máquina de cura UV. Após a montagem deste conjunto, foi então iniciada a montagem dos brônquios impressos em resina nas partes internas de cada pulmão.



Fig. 12: União da traqueia e um dos pulmões com aplicação de resina líquida.



Fig. 13: Cura das junções em máquina UV.



Fig. 14: Conjunto de bronquíolos montado em um dos pulmões.



Fig. 15: Conjunto finalizado com as tampas laterais fixadas com ímãs.

A montagem foi finalizada com a colocação das tampas laterais dos pulmões, que são fixadas ao conjunto por meio de três ímãs em cada lado, que foram acoplados ao conjunto por meio de cola de alta aderência e resina líquida curada na máquina UV. As tampas servem para facilitar a visualização das partes internas dos pulmões, facilitando assim o uso didático.

4.5 Uso em sala de aula

A utilização do biomodelo em sala de aula se deu na disciplina de Fisioterapia em Pediatria e Neonatologia, da 3ª série do curso de Fisioterapia da UEL, com o objetivo de que o biomodelo

viesses complementar o embasamento teórico em sala de aula e também para que os alunos tivessem a oportunidade de visualizar e manusear em tamanho real as estruturas anatômicas: a traqueia, os dois pulmões, brônquios e as ramificações internas os bronquíolos (Figura 16). A partir deste biomodelo esperava-se que os alunos correlacionassem, por meio de raciocínio lógico, o conhecimento teórico à prática clínica da Fisioterapia. Esse objetivo foi alcançado, sendo que um dos alunos comentou: “ao visualizar o diâmetro reduzido das ramificações dos brônquios entendi porque um pequeno acúmulo de secreção nestes canais leva esta criança ao desconforto respiratório precoce” e reforçou a importância da atuação do fisioterapeuta nesta população.

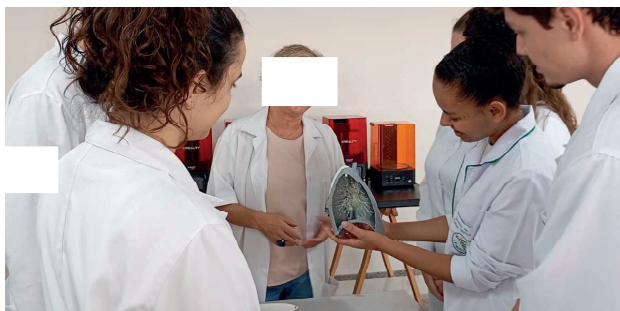


Fig. 16: Conjunto sendo utilizado em aula com estudantes de Fisioterapia.

O uso de contraste entre o pulmão (em cinza) e os brônquios (em resina cristal) mostrou-se mais funcional do que no caso do pulmão em branco. Dois aspectos a serem melhorados são: a fixação da traqueia aos pulmões, pois com a manipulação frequente houve um descolamento de uma das partes; e a espessura das paredes dos pulmões, que dificultou a fixação dos ímãs.

6. Resultados e discussão

A seguir são discutidos os aspectos técnicos e de sustentabilidade do processo de criação do biomodelo apresentado anteriormente.

6.1 Aspectos técnicos

Devido à necessidade de processamento de dados ao longo do processo, é recomendável o uso de um computador com boa capacidade de memória (pelo menos 16Gb) e processamento, de preferência com uma placa de vídeo dedicada (mínimo de 2Gb) a fim de acelerar o processamento das imagens e evitar gargalos na edição.

A geração do modelo digital 3D a partir da tomografia computadorizada mostrou-se relativamente simples, desde que haja uma capacitação prévia no uso do software Invesalious. A otimização da malha 3D gerada é uma etapa essencial, pois tornou mais ágil e fluida a edição do modelo no software Rhinoceros. A capacidade do profissional responsável pelo processo em saber trafegar de forma ágil entre os diferentes softwares é uma das mais importantes para a criação de biomodelos em 3D, tanto quanto a capacidade de utilizar os diferentes tipos de impressoras 3D, sejam elas FDM ou DLP.

Quanto à impressão, percebeu-se que, no caso da FDM, duas variáveis que afetam diretamente o tempo de impressão são o diâmetro do bico e a resolução de camada. No caso da impressão em resina líquida (DLP), verificou-se que pode ser necessário dividir uma peça em partes menores devido ao limite de tamanho da bandeja de impressão. No entanto, este problema pode ser resolvido utilizando-se impressoras com capacidade maior, atualmente já disponíveis no mercado a preços acessíveis. Para a impressão em resina, a resolução de camada em 0.1mm mostrou-se suficiente para se obter os detalhes desejados.

A retirada de suportes e lavagem das peças mostrou-se uma das etapas mais demoradas, bem como a montagem e colagem das partes com uso da própria resina em sucessivas etapas de cura por raio UV. Trata-se de um processo delicado, que demanda do profissional bastante

paciência e cuidado, a fim de não danificar as peças e obter um resultado satisfatório. Isso vale também para a colocação dos imãs de fixação das partes laterais com uso de cola de alta aderência. Além disso, pode ser necessário realizar reparos no caso de alguma parte de soltar, o que ocorreu na etapa de uso, quando a peça da traqueia se soltou da peça do pulmão.

6.2 Aspectos de sustentabilidade ambiental

As principais questões ambientais relativas à impressão 3D de biomodelos referem-se ao processo de impressão por resina líquida, pois trata-se de material termofixo e não-reciclável após o processo de cura. Deve-se ter especial cuidado com o descarte das resinas, que devem ser sempre curadas para ficarem em estado sólido, e então separadas de forma cuidadosa para descarte como resíduo comum. A lavagem em álcool isopropílico também representa um problema ambiental, e uma alternativa para reduzir o impacto ambiental neste caso é o uso de resinas laváveis com água. Os filamentos FDM utilizados neste estudo são de PLA reciclável, podendo ser descartados de forma mais segura, ou fundidos e refilados, desde que haja as condições necessárias.

6.3 Aspectos de sustentabilidade social

Destaca-se aqui o fato deste biomodelo ter sido desenvolvido em um hospital-escola público, pois os ganhos de aprendizagem obtidos pelos estudantes podem resultar na melhoria do atendimento dos pacientes do próprio hospital, que é 100% público pois faz parte do sistema SUS. Com a ampliação do acesso a biomodelos didáticos físicos os estudantes podem utilizá-los sempre que for necessário. Há ainda os ganhos de aprendizagem científica e técnica para os estudantes que atuam como pesquisadores no laboratório, passam a ampliar de forma relevante suas competências para além daquelas desenvolvidas em seus cursos de origem.

6.4 Aspectos de sustentabilidade econômica

Em termos econômicos, ressalta-se que a produção interna dos biomodelos pode significar uma redução de custos para o hospital e a universidade, dado o alto custo de materiais didáticos 3D. Acrescenta-se ainda a dificuldade na aquisição destes materiais, normalmente por meio de licitações que são geralmente bastante demoradas, imprevisíveis e onerosas. Considerando que o custo de implantação e operação de laboratórios de impressão 3D em hospitais é atualmente bastante viável – monta-se um laboratório com os requisitos apresentados neste artigo com cerca de R\$ 30 mil – a impressão de biomodelos *in loco* passa a ser uma opção viável para os hospitais-escola públicos brasileiros. Os equipamentos, insumos e softwares utilizados para o processo representam um custo relativamente baixo, considerando-se o valor entregue ao longo do seu ciclo de uso para os pacientes, profissionais e para a instituição.

7. Considerações Finais

O uso de técnicas combinadas de impressão 3D mostrou-se um recurso valioso para a produção de biomodelos de uso didático. Os aspectos técnicos apontam para um processo viável, e as recomendações presentes neste artigo, bem como as limitações encontradas, tem por objetivo garantir esta viabilidade para o uso em laboratórios em hospitais públicos, como é o caso do HU UEL. O biomodelo resultante deste estudo mostrou-se útil para o estudo em sala de aula, facilitando o aprendizado dos estudantes quanto aos aspectos anatômicos e fisiológicos do órgão estudado. Neste aspecto, a fragilidade é um dos pontos a ser observado em futuras aplicações. Finalmente, foi possível verificar que, embora apresente benefícios sociais e econômicos são relevantes, a impressão 3D de biomodelos também apresenta desafios ambientais quanto ao final do ciclo de vida dos materiais, em especial as resinas UV. Estes desafios deverão ser enfrentados com novos estudos a serem realizados no Fab.i HU.

Referências

- Aguiar, L. D. C. D. (2016). Um Processo Para Utilizar A Tecnologia De Impressão 3d Na Construção De Instrumentos didáticos para o ensino de ciências. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 6 (2), 1689–1699. Disponível em <<http://hdl.handle.net/11449/137894>> acesso em 01 fev. 2025.
- Balestrini, C., & Campo-Celaya, T. (2016). With the advent of domestic 3-dimensional (3D) printers and their associated reduced cost, is it now time for every medical school to have their own 3D printer? *Medical teacher*, 38(3), 312–313. Disponível em <<https://doi.org/10.3109/0142159X.2015.1060305>> acesso em 01 fev. 2025.
- Barbosa, J.B.M; Mendonça, F.J.S. DE F.; Tavares, F.R.M.; Figueredo, J.F.de S.; Leite, M.J.F. Utilização de impressoras 3D para o desenvolvimento de metodologias ativas em cursos de Engenharia. *Research, Society and Development*, v. 10, p. e181101018657, 2021. Disponível em <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/18657/16719/231695>> acesso em 01 fev. 2025.
- Garcia, T.R., Macedo, R.M.; Vieira Vaz, M.H., Borges, G.H.J., Zendron, I.M., Arruda, J.T. Impressão 3D de peças anatômicas como ferramentas de educação e auxílio na prática clínica. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 13, e248111335234, 2022 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35234>. Disponível em: <https://www.academia.edu/117649154/Impress%C3%A3o_3D_de_pe%C3%A7as_anat%C3%B4micas_como_ferramentas_de_educac%C3%A3o_e_aux%C3%ADlio_na_pr%C3%A1tica_cl%C3%ADnica>. Acesso em: 9 fev. 2025.
- Louredo, L. M. ; Duarte, M. M. S. ; Araujo, M. C. E. ; Moreira, S. M. ; Sugita, D. M. ; Arruda, J. T. . Aplicabilidade de biomodelos tridimensionais produzidos com impressora 3D para estudos de anatomia. In: I Congresso dos Acadêmicos de Medicina do Estado de Goiás (CAMEG), 2019, Anápolis. ANAIS I CAMEG. Anápolis: RESU ? Revista Educação em Saúde, 2019. v. 7. p. 10-10. Disponível em <<https://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/educacaoemsaude/article/view/4187>> Acesso em 09 fev. 2025.
- Onisaki, H. H. C., & Vieira, R. M.B. (2019). Impressão 3D e o desenvolvimento de produtos educacionais. *Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico (EDUCITEC)*, 5 (10), 128–137. Disponível em <<https://doi.org/10.31417/educitec.v5i10.638>> Acesso em 01 fev. 2025.
- Orlando, T. C. *et al.* (2009). Planejamento, montagem e aplicação de modelos didáticos para abordagem de biologia celular e molecular no ensino médio por graduandos de ciências biológicas. *Revista Brasileira de ensino de bioquímica e biologia molecular*, 2 (1), 2-17. <https://doi.org/10.16923/reb.v7i1.33>. Disponível em <<https://www.bioquimica.org.br/index.php/REB/article/view/33/29>> Acesso em 01 fev 2025.
- Suárez-Escudero, J. C., Posada-Jurado, M. C., Bedoya-Muñoz, L. J., Urbina-Sánchez, A. J., Ferreira-Morales, J. L., & Bohórquez-Gutiérrez, C. A. (2020). Enseñar y aprender anatomía: Modelos pedagogicos, historia, presente y tendencias. *Acta Médica Colombiana*, 45(4). (PDF) *A utilização de biomodelos em 3D no aprendizado da anatomia humana: uma experiência técnica e metodológica*. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/364975052_A_utilizacao_de_biomodelos_em_3D_no_aprendizado_da_anatomia_humana_uma_experiencia_tecnica_e_metodologica> Acesso em 09 fev. 2025.