INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇO
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM RADIOLOGIA

NATÁLIA DOMINGUES BORGES

ESTRUTURAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS PARA PRODUÇÃO DE *PHANTOMS* RADIOLÓGICOS DE BAIXO CUSTO

FLORIANÓPOLIS, 2026

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇO
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM RADIOLOGIA

NATÁLIA DOMINGUES BORGES

ESTRUTURAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS PARA PRODUÇÃO DE *PHANTOMS* RADIOLÓGICOS DE BAIXO CUSTO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Radiologia.

Professor Orientador: Marco Antônio Bertoncini Andrade, Me.

FLORIANÓPOLIS, 2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Borges, Natalia Domingues
ESTRUTURAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS PARA PRODUÇÃO DE PHANTOMS RADIOLÓGICOS DE BAIXO CUSTO / Natalia Domingues Borges; orientação de Marco Antônio Bertoncini Andrade . – Florianópolis, SC, 2026.
47 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. CST em Radiologia. Departamento Acadêmico de Saúde e Serviços.
Inclui Referências.

1. Impressão 3D. 2. Phantoms de Baixo Custo. 3. Banco de dados. 4. Controle de qualidade. I. Antônio Bertoncini Andrade , Marco. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. ESTRUTURAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS PARA PRODUÇÃO DE PHANTOMS RADIOLÓGICOS DE BAIXO CUSTO.

ESTRUTURAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS PARA PRODUÇÃO DE *PHANTOMS* RADIOLÓGICOS DE BAIXO CUSTO

NATÁLIA DOMINGUES BORGES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em Radiologia e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia em Radiologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 10 de julho, 2026.

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
Marco Antonio Bertoncini Andrade
Data: 05/08/2026 16:05:12-0300
CPF: ***.822.259-**
Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br

MARCO ANTÔNIO BERTONCINI ANDRADE, ME.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC)

Documento assinado digitalmente
CAROLINE DE MEDEIROS
Data: 05/08/2026 15:45:25-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

CAROLINE DE MEDEIROS, DRA.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC)

Documento assinado digitalmente
FELIPE RAMOS CORREA
Data: 03/08/2026 19:39:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

FELIPE RAMOS CORREA, DR.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC)

AGRADECIMENTOS

Finalizar esse trabalho, acima de tudo, foi um exercício de persistência. Por isso, meu primeiro agradecimento é para mim mesma, por não ter desistido, mesmo quando o cansaço mental parecia maior do que a minha força. Houve dias em que fechei o computador com lágrimas nos olhos, acreditando que não conseguiria continuar. Ainda assim, encontrei coragem para recomeçar no dia seguinte.

Agradeço também ao universo e às forças maiores que ouviram minhas preces, iluminaram meu caminho e me deram esperança.

À Maria Luiza, minha eterna gratidão. Obrigada por ter sido meu alicerce durante toda essa caminhada, por acreditar em mim quando eu já não conseguia acreditar, por me levantar nos dias difíceis e por sempre me lembrar de que eu era capaz. Seu amor, apoio e palavras de incentivo foram essenciais para que eu conseguisse.

À minha mãe, que, mesmo distante fisicamente, nunca deixou de estar presente em minha vida, oferecendo incentivo e força.

À minha sogra, agradeço pelo acolhimento, pelo apoio e por acreditar em mim.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória. Seja com uma palavra de apoio, uma mensagem ou simplesmente acreditando em mim, cada demonstração de afeto fez diferença.

A todos vocês, o meu mais sincero e profundo obrigada. Com todo o meu carinho: eu amo vocês.

RESUMO

A crescente adoção da manufatura aditiva na área médica, especialmente da impressão 3D pelo método *Fused Filament Fabrication* (FFF), impulsionou o desenvolvimento de *phantoms* radiológicos de baixo custo para aplicações em ensino, pesquisa e controle de qualidade em radiologia. Essa tecnologia possibilita a produção de geometrias complexas com significativa redução de custos, ampliando a viabilidade da utilização de simuladores radiológicos acessíveis. Entretanto, informações relacionadas a materiais termoplásticos, parâmetros de impressão e propriedades radiológicas encontram-se dispersas na literatura científica, dificultando a padronização dos processos e a reprodutibilidade experimental. O presente trabalho teve como objetivo propor a estruturação de um banco de dados voltado à organização de informações relevantes para a fabricação de *phantoms* radiológicos por meio da tecnologia FFF. A pesquisa caracteriza-se como descritiva, qualitativa e de natureza aplicada, sendo desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e de artigos científicos e materiais técnicos relacionados à impressão 3D aplicada à Tomografia Computadorizada. Foram organizados dados referentes a materiais de impressão, parâmetros de fabricação, configurações de preenchimento e valores de Unidades de Hounsfield (HU). A revisão da literatura demonstrou que os valores de HU variam conforme o material utilizado e os parâmetros de preenchimento adotados, evidenciando a necessidade do registro sistemático dessas informações. Como resultado, foi proposta uma estrutura conceitual de banco de dados capaz de centralizar informações técnicas relevantes, auxiliando pesquisadores na consulta de parâmetros necessários para a produção de *phantoms* radiológicos de baixo custo. Conclui-se que a sistematização desses dados pode favorecer a padronização, a reprodutibilidade e a disseminação do conhecimento científico relacionado à manufatura aditiva aplicada à radiologia.

Palavras-chave: Radiologia. *Phantoms* de Baixo Custo. Dosimetria. Garantia da Qualidade. Impressão 3D. Banco de dados.

ABSTRACT

The growing adoption of additive manufacturing in the medical field, particularly 3D printing using the Fused Filament Fabrication (FFF) method, has driven the development of low-cost radiological *phantom*s for applications in education, research, and quality control in radiology. This technology enables the production of complex geometries at significantly reduced costs, increasing the feasibility of using affordable radiological simulators. However, information regarding thermoplastic materials, printing parameters, and radiological properties is scattered throughout the scientific literature, hindering process standardization and experimental reproducibility. In this context, the objective of this study was to propose the creation of a database aimed at organizing information relevant to the fabrication of radiological *phantom*s using FFF technology. The research is descriptive, qualitative, and applied in nature, and was conducted through a literature review and documentary analysis of scientific articles and technical materials related to 3D printing applied to computed tomography. Data regarding printing materials, manufacturing parameters, infill configurations, and Hounsfield Unit (HU) values were organized. The literature review demonstrated that HU values vary depending on the material used and the filling parameters adopted, highlighting the need for systematic recording of this information. As a result, a conceptual database structure was proposed to centralize relevant technical information, assisting researchers in accessing the parameters necessary for the production of low-cost radiological *phantom*s. It is concluded that the systematization of this data can promote standardization, reproducibility, and the dissemination of scientific knowledge related to additive manufacturing applied to radiology.

Keywords: Radiology. Low-Cost *Phantom*s. Dosimetry. Quality Assurance. 3D Printing. Database.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....10

1.1 Problema de pesquisa.....12

1.2 Justificativa.....12

1.3 Objetivo Geral.....13

1.4 Objetivos Específicos.....13

2 REVISÃO DA LITERATURA.....14

2.1 Sistema de Informação.....15

2.1.1 Banco de Dados.....15

2.2 Funcionamento da tecnologia FDM/FFF.....18

2.3 Materiais para impressão 3D.....19

2.3.1 Ácido polilático (PLA).....20

2.3.2 Estireno de butadieno de acrilonitrila (ABS).....20

2.3.3 Poliamida (NYLON).....21

2.3.4 Poliuretano Termoplástico (TPU).....21

2.3.5 XCT Radiopaco.....21

2.4 Software de fatiamento.....22

2.5 *Phantom*s.....23

2.6 Tomografia Computadorizada.....25

2.6.1 Unidades de Hounsfield.....26

2.6.2 Relação entre *infiil* e Unidade de Hounsfield......27

3 METODOLOGIA.....29

3.1 Delineamento de pesquisa.....30

3.2 ASPECTOS ÉTICOS.....31

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....32

5 Parâmetros Identificados Para Composição Do Banco De Dados 33

5.1 Parâmetros Radiológicos.....33

5.1.1 Identificação da composição do Filamento.....34

5.1.2 Percentual e Padrão de Preenchimento (Infill).....34

5.2 Parâmetros construtivos.....35

5.2.1 Temperatura do bico de extrusão.....36

5.2.2 Temperatura da Mesa de Impressão.....37

5.2.3 Velocidade de Impressão.....37

5.2.4 Número de Perímetros (Shell).....38

5.2.5 Altura de Camada.....39

6 CONCLUSÃO.....41

1 INTRODUÇÃO

Em um contexto no qual soluções acessíveis em radiologia tornam-se cada vez mais necessárias, este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta a proposta de uma estrutura de banco de dados destinado a apoiar a produção de *phantoms* radiológicos de baixo custo. O trabalho reúne, de forma organizada, informações sobre materiais alternativos, parâmetros de impressão 3D e desempenho radiológico.

O avanço tecnológico tem transformado profundamente a sociedade e as organizações, exigindo a implementação de sistemas de informação capazes de gerenciar o crescente volume de dados e otimizar processos. Em sua essência, um banco de dados é definido como um conjunto de dados armazenados em memória externa, meticulosamente organizado por uma estrutura de dados e projetado para atender aos requisitos informacionais de uma organização, seja ela uma empresa, universidade ou hospital (Penteado, 2014).

Diante dessa necessidade crescente por organização e tratamento de informações, os sistemas de informação (SI) desempenham um papel crucial ao otimizar fluxos informacionais relevantes, transformando dados em conhecimento que subsidia a tomada de decisão e a intervenção estratégica na realidade organizacional (Moresi, 2000). Em âmbito similar, os bancos de dados constituem o pilar fundamental desses sistemas, garantindo que as informações precisas e necessárias estejam disponíveis de forma confiável e oportuna. Assim, a implementação eficiente de um banco de dados é vital para a operação e a competitividade de qualquer entidade moderna.

Nesse contexto de dependência por informações estruturadas, destaca-se a radiologia médica como uma das áreas que mais necessitam de dados organizados e confiáveis. Essa especialidade, indispensável para o diagnóstico e acompanhamento de patologias, utiliza métodos não invasivos,

como raios X e tomografia computadorizada, para visualizar estruturas internas do corpo humano. Devido à exposição inerente à radiação ionizante, a segurança radiológica e a garantia da qualidade dos exames tornam-se imperativos clínicos e éticos. Nesse cenário, surgem os *phantoms*, objetos simuladores desenvolvidos para reproduzir as propriedades físicas e radiológicas dos tecidos biológicos, sendo essenciais para o controle de qualidade, calibração de equipamentos e precisão da dosimetria.

Logo, é importante ressaltar que a evolução dos *phantoms* ao longo do século XX resultou em modelos cada vez mais sofisticados, como os simuladores antropomórficos, desenvolvidos para imitar a anatomia humana, seja em sua composição ou formato. No entanto, seu alto custo — decorrente da complexidade de fabricação e do uso de materiais de elevada pureza, como o óxido de alumínio — ainda limita o acesso a esses dispositivos em diversos países, incluindo o Brasil. Diante desse desafio, pesquisas recentes têm buscado soluções de baixo custo, entre elas a utilização da impressão 3D pela técnica *Fused Filament Fabrication* (FFF), que permite construir objetos tridimensionais por deposição sucessiva de camadas de filamento termoplástico fundido.

Apesar de representar um avanço importante, a adoção dessa tecnologia gera um volume crescente de dados sobre diferentes materiais alternativos e suas propriedades físicas, parâmetros de impressão e desempenho radiológico. A ausência de um repositório centralizado e estruturado para organizar essas informações dificulta a disseminação do conhecimento e a padronização de processos na fabricação de *phantoms* acessíveis.

Portanto, ao reunir esse conjunto de dados em um único sistema, pretende-se fornecer aos pesquisadores, estudantes e profissionais da área um instrumento capaz de apoiar a confecção de *phantoms* acessíveis, promovendo segurança, qualidade e democratização da tecnologia na radiologia.

1.1 Problema de pesquisa

Quais informações técnicas e parâmetros de impressão devem compor um banco de dados destinado à produção de *phantoms* radiológicos de baixo custo por tecnologia FFF?

1.2 Justificativa

O desenvolvimento desta pesquisa justifica-se pela ausência de um repositório organizado e acessível que reúna informações técnicas sobre materiais utilizados na impressão 3D para fabricação de *phantoms* e suas propriedades de atenuação radiológica. Atualmente, não existe um compilado disponível ao público interessado, sejam pesquisadores, estudantes ou profissionais da área da saúde, que possibilite a seleção adequada de materiais para impressão e a definição de parâmetros de fabricação para a confecção de *phantoms* de baixo custo. Essa lacuna dificulta a disseminação do conhecimento e limita a autonomia de instituições que poderiam se beneficiar de simuladores personalizados para fins de ensino, treinamento, calibração e controle de qualidade em radiologia.

Dessa forma, o presente estudo tem como propósito principal propor uma estrutura conceitual de um banco de dados, que reúna informações essenciais sobre os filamentos disponíveis no mercado nacional, considerando tanto suas características físicas quanto suas respostas radiológicas. Ao investigar a influência de variáveis como a porcentagem de *infill* e o padrão de preenchimento, busca-se identificar combinações que melhor simulem as propriedades de diferentes tecidos humanos.

Com isso, propôs-se um banco de dados para o desenvolvimento futuro de uma ferramenta de consulta prática e confiável, que contribua para democratizar o acesso à tecnologia de manufatura aditiva na área da saúde, incentivando a produção de *phantoms* de baixo custo no Brasil. Além de ampliar a acessibilidade, o estudo favorece o avanço científico e tecnológico no campo da simulação médica, promovendo práticas seguras, inovação e maior

reprodutibilidade em pesquisas acadêmicas e aplicadas. Assim, este trabalho propõe uma estrutura conceitual para a organização de um banco de dados.

1.3 Objetivo Geral

Propor uma estrutura conceitual de um banco de dados para organização e compilação de informações sobre diferentes materiais utilizados na impressão 3D, de modo a auxiliar na escolha do filamento e parâmetros de impressão mais adequados para a produção de *phantoms.*

1.4 Objetivos Específicos

São objetivos do trabalho:

a) identificar e descrever os diferentes materiais usados na impressão 3D e como influenciam a absorção da radiação;
b) coletar as características dos materiais importantes para o processo de impressão de *phantoms*;
c) propor a estrutura de um banco de dados para organizar e disponibilizar essas informações de forma simples e acessível.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, é relevante para este trabalho porque possibilita a criação de objetos tridimensionais personalizados por meio da deposição sucessiva de camadas de material. Essa flexibilidade técnica tornou a tecnologia essencial para a produção de *phantoms* radiológicos, que necessitam de geometrias específicas e propriedades físicas ajustáveis para simular tecidos humanos. Além disso, como apontam Hull (1986) e Gibson, Rosen e Stucker (2018), o avanço dessa tecnologia ampliou suas aplicações em diversas áreas científicas, incluindo a saúde, o que reforça sua pertinência no desenvolvimento de simuladores de baixo custo.

Os Sistemas de Informação (SI) tornam-se indispensáveis porque a impressão 3D, especialmente quando aplicada em pesquisas clínicas e experimentais, gera um volume expressivo de dados. Esses dados incluem características de filamentos, parâmetros de impressão, variações de densidade, fatores de atenuação e resultados de testes de desempenho. Conforme Moresi (2000) destaca, transformar esse conjunto de dados brutos em conhecimento exige processos estruturados de coleta, organização e análise — justamente as funções centrais de um SI. Assim, sistemas de informação são necessários para garantir que essas informações possam ser recuperadas e utilizadas de maneira eficiente por profissionais e pesquisadores.

A relação entre bancos de dados e a manufatura aditiva se estabelece porque é o banco de dados que fornece a infraestrutura necessária para armazenar, organizar e disponibilizar os dados produzidos durante os processos de impressão. Tais sistemas permitem registrar, por exemplo, propriedades físicas de materiais, configurações de *slicing*, porcentagens de *infill* e valores de Unidades de Hounsfield obtidos em tomografia computadorizada.

Dessa forma, esses conceitos precisam estar articulados no presente estudo porque a proposta envolve tanto a tecnologia de impressão 3D quanto a necessidade de organizar informações técnicas relacionadas à sua aplicação na

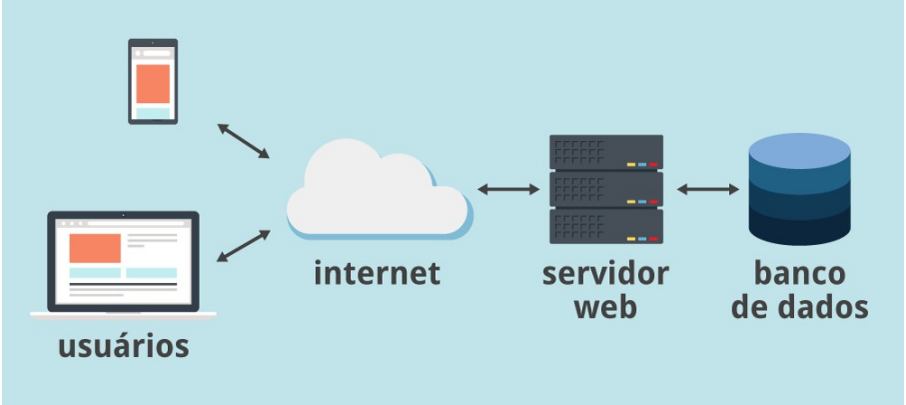
fabricação de *phantoms* radiológicos. Sem a integração entre manufatura aditiva, sistemas de informação e banco de dados, seria inviável compilar o conhecimento de forma estruturada, dificultando a comparação entre materiais, a reprodutibilidade dos experimentos e a padronização de parâmetros utilizados na área.

2.1 Sistema de Informação

Nas organizações modernas, os Sistemas de Informação (SI) se baseiam em sistemas de computador e operam dentro dos limites das funções organizacionais, eles são recursos importantes para facilitar os trabalhos de uma organização (Watchaton; Krairit, 2019).

A Figura 1 mostra o fluxo de funcionamento de uma aplicação web, na qual usuários acessam o sistema pela internet, que se conecta a um servidor web responsável por processar as requisições e consultar um banco de dados.

Figura 1 - Fluxo de comunicação entre usuários, servidor web e banco de dados.



Fonte: Tudo Sobre Hospedagem de Sites (2025).

2.1.1 Banco de Dados

Segundo Torey *et al.* (2007), dado é o componente básico de um arquivo, é um elemento com um significado no mundo real, que compõe um

sistema de arquivos. Como exemplo, podemos citar nome, sobrenome, cidade, bairro e outros.

Informação, após a interpretação dos dados, possibilita associar um significado aos dados ou processá-los. Normalmente a informação vem de convenções utilizadas por pessoas por meio de associações aos dados. Como exemplo, têm-se:

- dado: imagem mostra uma área branca muito densa no osso.
- informação: pode indicar fratura ou calcificação.

Conhecimento na área da saúde pode ser definido como o conjunto de informações, experiências, evidências científicas e práticas adquiridas, organizadas e aplicadas pelos profissionais com o objetivo de promover, manter ou recuperar a saúde das pessoas.

Dado → Informação → Conhecimento → Tomada de decisão.

A relação entre sistemas de informação e bancos de dados é essencial para o funcionamento organizacional. Os sistemas de informação dependem de bancos de dados para armazenar e organizar os dados que serão processados e transformados em informações úteis, enquanto os bancos de dados só adquirem valor quando integrados a sistemas capazes de utilizar esses dados em atividades operacionais e gerenciais. Assim, ambos se complementam: o banco de dados fornece a estrutura de armazenamento e o sistema de informação transforma esses dados em suporte para decisões, garantindo eficiência e confiabilidade nos processos organizacionais (Laudon; Laudon, 2014; Elmasri; Navathe, 2011). A Figura 2 mostra o fluxo de funcionamento de um banco de dados.

Figura 2: Fluxo de funcionamento de um banco de dados.



Fonte: Alura (2025)

Estudos recentes têm demonstrado a importância da organização sistemática de dados para aplicações envolvendo impressão 3D e radiologia. Kozee *et al*. (2023), por exemplo, desenvolveram um banco de dados contendo características físicas e radiológicas de 13 materiais comerciais utilizados em impressoras FFF, consolidando informações como densidade, valores de HU e comportamento em diferentes percentuais de *infill*.

Além das propriedades dos materiais, parâmetros de impressão influenciam diretamente as características radiológicas dos objetos produzidos. Park *et al*. (2019) demonstraram que o aumento do percentual de *infill* eleva progressivamente os valores de Unidade de Hounsfield (HU), possibilitando a simulação de diferentes tecidos. Os autores também observaram que materiais distintos apresentam respostas radiológicas específicas, reforçando a importância do registro padronizado do tipo de filamento e dos parâmetros de impressão para garantir a reprodutibilidade dos *phantoms*.

Hofmann *et al.* (2026) destacam que materiais de impressão 3D com a mesma classificação comercial, como PLA, ABS e PETG, podem apresentar diferentes propriedades de atenuação de raios X em função da presença de aditivos, corantes e modificações na composição. Os autores ressaltam ainda a necessidade de caracterização contínua desses materiais, considerando a constante evolução das formulações comerciais e seu impacto nas propriedades radiológicas. Complementando essas evidências, Dancewicz *et al*. (2017) compilaram propriedades radiológicas de diversos polímeros impressos, criando tabelas e registros técnicos que funcionam como um banco de dados

experimental voltado à caracterização de materiais. Esses achados evidenciam a importância do registro sistemático dos materiais e parâmetros de impressão para a reprodutibilidade de *phantoms* radiológicos.

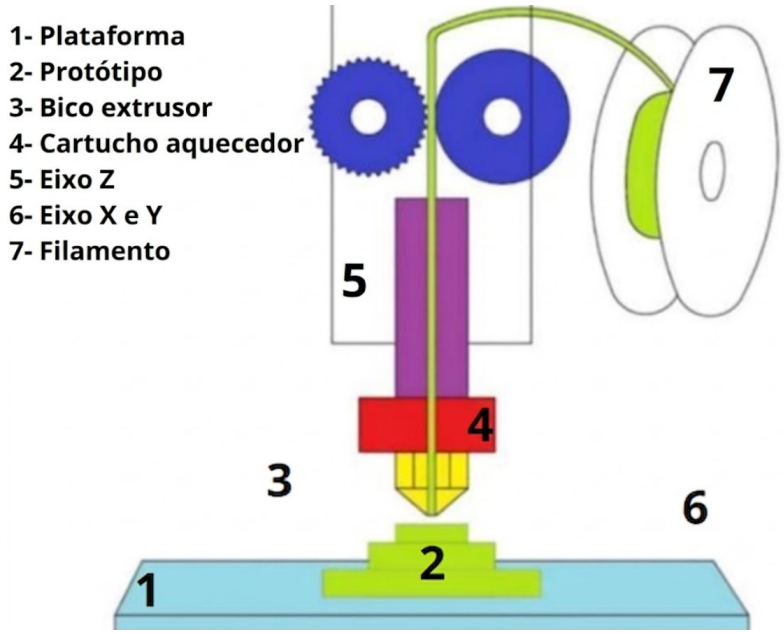
2.2 Funcionamento da tecnologia FDM/FFF

A tecnologia conhecida como *Fused Filament Fabrication* (FFF em português Fabricação por Filamento Fundido), ou *Fused Deposition Modeling* (FDM — Modelagem por Deposição Fundida), baseia-se no uso de um bico extrusor aquecido que funde o filamento termoplástico e o deposita sucessivamente, camada por camada, sobre uma base de impressão (Savi, 2022, p. 23).

O material empregado consiste em um filamento disposto em um carretel, que é tracionado por uma roda motriz e direcionado até um bico aquecido com temperatura controlada, onde é fundido até alcançar um estado semilíquido. A partir disso, o bico extrude e deposita o material com precisão, camada após camada, formando películas ultrafinas que dão origem aos elementos estruturais. Todo esse processo segue o contorno de cada camada previamente definido pelo software.

A seguir, é ilustrado o princípio de funcionamento desse tipo de impressora 3D (Figura 3).

Figura 3 – Esquema de extrusão de uma Impressora 3D FFF.



Fonte: Adaptado de Kunkel, Maria Elizete & Cano, Ana. (2020).

A plataforma (1) é o componente responsável por sustentar a peça durante todo o processo de impressão. Em muitos equipamentos, essa superfície é aquecida para melhorar a adesão da primeira camada e minimizar deformações.

Sobre essa plataforma é formado o protótipo (2), que é construído camada por camada conforme o percurso do bico extrusor, definido pelo software de fatiamento.

O bico extrusor (3) é o elemento encarregado de fundir o filamento e depositá-lo de maneira precisa. O cartucho aquecedor (4) é responsável por fornecer calor e responsável por tornar mais fluido o filamento na deposição. O deslocamento do conjunto de extrusão ao longo dos eixos X e Y permite a deposição controlada do material, formando cada camada do objeto.

O movimento vertical necessário para a construção do protótipo é realizado pelo fuso do eixo Z (5), que posiciona a plataforma (ou, em alguns modelos, a própria extrusora) na altura adequada após cada camada concluída. Já o deslocamento horizontal da extrusora é controlado pelos fusos dos eixos X e Y (6), garantindo precisão no posicionamento do material.

O filamento (7), que serve como matéria-prima, é continuamente alimentado ao bico extrusor, onde é aquecido até atingir um estado semilíquido e, então, depositado em trilhas finas que constituem as camadas do protótipo.

2.3 Materiais para impressão 3D

A tecnologia de impressão 3D FFF/FDM utiliza a extrusão de filamentos de polímeros termoplásticos como PLA, ABS, TPU, NYLON e outros. Esses filamentos, geralmente de 1,75 mm de diâmetro, são enrolados em carretéis e derretem ao serem aquecidos no bico extrusor (entre 190°C e 260°C) e depositados camada por camada sobre a mesa aquecida (de 0°C a 110°C) para formar o objeto final.

Os filamentos estão disponíveis em diversas cores e são o principal insumo das impressoras 3D FDM/FFF, como é visto na Figura 4.

Figura 4 – Filamentos coloridos



Fonte: 3dLab (2025)

2.3.1 Ácido polilático (PLA)

O ácido polilático (PLA) é obtido pela conversão de amido extraído de fontes vegetais renováveis, como milho e batatas, em glicose, que o fermenta em ácido lático e depois o polimeriza. O PLA possui boa biocompatibilidade, alta resistência e é totalmente biodegradável. Para a impressão, os parâmetros

recomendados são: temperatura do bico extrusor entre 190 °C e 220 °C, mesa aquecida entre 50 °C e 70 °C e velocidade de impressão a partir de 50 mm/s. O produto final após a decomposição é água e dióxido de carbono. Portanto, é não tóxico e não causa poluição ambiental. (Mazzanti; Malagutti; Mollica, 2019).

2.3.2 Estireno de butadieno de acrilonitrila (ABS)

O ABS é um dos filamentos mais comumente usados. Por ser um polímero amorfo, ele não é biodegradável, mas destaca-se por suas excelentes propriedades mecânicas, como alta resistência a impactos, a abrasão e a produtos químicos. Para a sua impressão, os parâmetros recomendados são: temperatura do bico extrusor entre 230 °C e 260 °C, mesa aquecida entre 100 °C e 130 °C e velocidade de impressão variando de 80 a 500 mm/s. (Mazzanti, Malagutti; Mollica, 2019).

2.3.3 Poliamida (NYLON)

O nylon é conhecido por sua flexibilidade, resistência ao calor e resistência a impactos. É durável e possui bons valores de resistência. Para a sua impressão, os parâmetros recomendados são: temperatura do bico extrusor entre 220 °C e 245 °C, mesa aquecida entre 60 °C e 80 °C e velocidade de impressão entre 30 mm/s e 60 mm/s. (Mazzanti; Malagutti; Mollica, (2019).

2.3.4 Poliuretano Termoplástico (TPU)

É conhecido por sua flexibilidade e boa resistência mecânica; porém, na impressão 3D pelo método FFF, o material pode gerar problemas operacionais. Sua elevada viscosidade e aderência dificultam a extrusão, aumentando o risco de obstrução do bico e variações no fluxo de deposição. Para a sua impressão, os parâmetros recomendados são: temperatura do bico extrusor entre 210° C a 240° C, mesa aquecida entre 35° C a 60° C (em alguns

casos podendo ser até utilizada fria) e velocidade de impressão entre 15 mm/s e 40 mm/s. (Fuentes del toro *et al*., 2025).

2.3.5 XCT Radiopaco

O filamento é feito de uma composição de ABS e uma carga à base de sulfato de bário ($BaSO_4$) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Seu material não possui nenhuma toxicidade (em relação ao ABS) e não desenvolve mau cheiro durante a impressão, mesmo assim, uma boa ventilação do lugar de trabalho é indicada. Para a sua impressão, os parâmetros recomendados são: temperatura do bico extrusor entre 240 °C, mesa aquecida de 100 °C e velocidade de impressão entre 60 mm/s. O material produz atenuação à radiação com variação entre -370 a 2700 HU a 120 kVp em uma Tomografia Computadorizada, a depender de preenchimento da peça e da concentração de carga. Esse material foi desenvolvido pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC). Os filamentos desenvolvidos apresentam as seguintes variações:

- **XCT-A**: filamento com capacidade de atenuação entre -370 e 1600 HU de acordo com a variação do *infill* na impressão. Adequado para simular desde tecidos moles como pulmão até dentina e ossos corticais.
- **XCT-B**: filamento com capacidade de atenuação entre -180 e 1950 HU. Adequado para simular dentina e ossos com grande atenuação cortical.
- **XCT-C**: filamento com capacidade de atenuação entre -106 e 2700 HU. Adequado para simular dentina, ossos de alta atenuação e esmalte dentário.

2.4 Software de fatiamento

Softwares de fatiamento são ferramentas que convertem o modelo digital de um objeto em um arquivo no formato *G-code*. O *G-code* é a linguagem de programação utilizada para controlar o movimento e as ações da máquina,

consistindo em uma sequência de comandos que definem, entre outros parâmetros, as coordenadas X, Y e Z.

Eles dividem a peça em diversas camadas e determinam as trajetórias que a impressora 3D deverá seguir. Nesses programas, também é possível ajustar diversos parâmetros de impressão, como velocidade, altura das camadas, porcentagem de preenchimento (*infill*), entre outros.

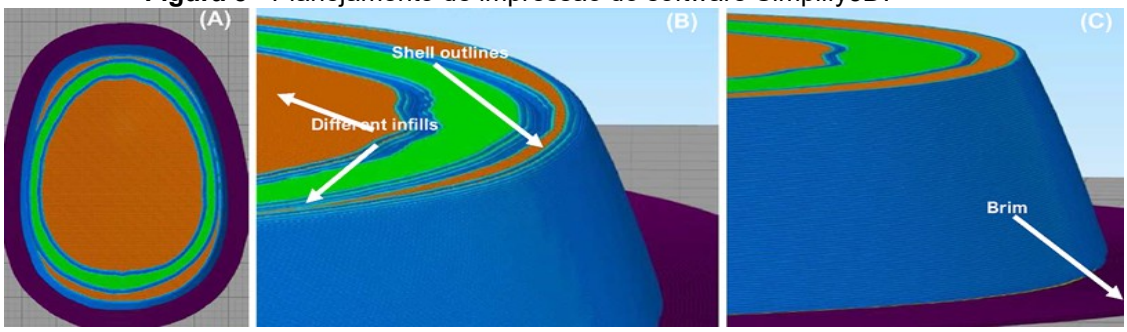
O Simplify3D é um dos softwares de fatiamento, segundo o próprio fabricante (SIMPLIFY3D, 2025) sua principal função é converter o modelo digital 3D em um planejamento detalhado de impressão. Após essa etapa, o programa traduz o planejamento em um conjunto de instruções compreensíveis pela impressora 3D, gerando o arquivo *G-code*, responsável por guiar todo o processo de fabricação camada por camada. Ainda segundo Guan *et al*. (2021), o fatiamento é o fator chave para determinar a qualidade da impressão.

No software é possível ajustar diversos parâmetros que influenciam diretamente o resultado da peça, como:

a) Preenchimento (*infill*): Define a quantidade de material dentro do modelo, variando de 0% (oco) a 100% (maciço).
b) Padrão de preenchimento (*infill pattern*): Determina o formato do preenchimento interno, com até 11 opções disponíveis no software.
c) Altura de camada (*layer height*): Corresponde à espessura de cada camada, indicando o deslocamento da extrusora no eixo Z.
d) Temperatura da mesa e do bico: Estabelece as temperaturas de trabalho da mesa aquecida e da extrusora durante a impressão.

Na Figura 5 é ilustrado o planejamento de impressão do software Simplify3D.

Figura 5 - Planejamento de impressão do software Simplify3D.



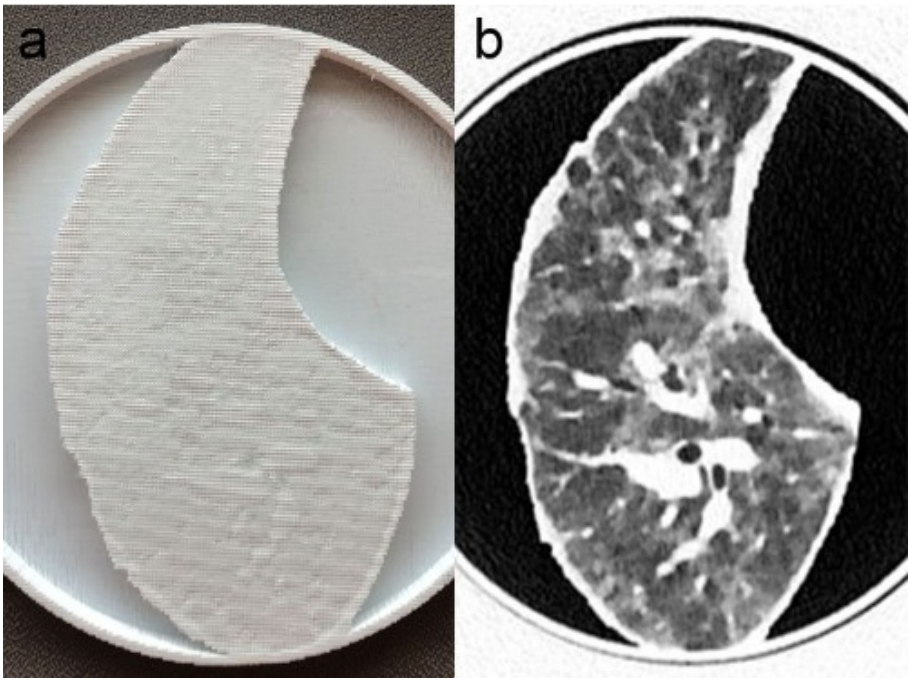
(A) Visão geral da peça a ser impressa**; (B)** Detalhe dos contornos das cascas e diferentes preenchimentos**; (C)** Detalhe da estrutura da borda
Fonte: Savi *et al*. (2025).

2.5 *Phantoms*

Phantoms podem ser compreendidos como modelos físicos projetados para simular o corpo humano e/ou atenuações diferenciais em contextos científicos e médicos. Sua finalidade principal é replicar fielmente as características anatômicas e o comportamento radiológico (a forma como os tecidos interagem com a radiação) (Silvestro, 2019). Por essa capacidade de mimetismo, eles se tornaram ferramentas indispensáveis em três áreas cruciais: treinamento de profissionais, pesquisas experimentais e a calibração de equipamentos de imagem médica.

A seguir, Figura 6**:** *Phantom* pulmonar impresso em 3D a partir de dados reais de tomografia computadorizada.

Figura 6 – (a) imagem de CT obtida do *phantom* (b) demonstrando correspondência anatômica e radiológica, com reprodução da textura interna e dos valores de atenuação do parênquima pulmonar.



Fonte: (MEI *et al*., 2022)

Para alcançar esse realismo, os *phantoms* são construídos com materiais especiais que imitam a maneira como os tecidos biológicos (como ossos, gordura e músculos) reagem ao serem expostos à radiação (Dewerd, 2014). Isso permite que simulações de procedimentos ou exames sejam realizadas com segurança e fidelidade.

Estes modelos avançados são capazes de reproduzir a geometria e as propriedades de absorção de radiação de uma anatomia específica com precisão impressionante, elevando o nível de detalhe em pesquisas avançadas e garantindo a qualidade dos diagnósticos (Leary *et al*., 2015).

De acordo com Mei *et al*. (2022), *phantoms* impressos em 3D tornam-se ferramentas essenciais e importantes para garantia de qualidade e desenvolvimento tecnológico em CT, uma vez que permitem reproduzir com alta fidelidade a geometria, textura e atenuação de tecidos a partir de imagens reais do paciente.

2.6 Tomografia Computadorizada

A tomografia computadorizada (TC) é uma modalidade de imagem não invasiva que utiliza equipamento de raios X para gerar imagens transversais do corpo. Essa modalidade tornou-se uma importante técnica de imagem desde sua introdução na prática clínica na década de 1970.

Diferentemente dos métodos de radiografia tradicionais (que se baseiam em projeções planares), a TC opera através de um sistema sofisticado. Nele, feixes colimados de raios X são direcionados ao paciente e sofrem atenuação ao atravessar os tecidos do corpo. Essa radiação atenuada é, então, capturada por conjuntos de detectores. O sinal registrado pelos detectores é processado por um computador, que realiza a reconstrução das imagens. Embora a captação inicial geralmente ocorra no plano axial, o poder computacional do sistema permite a reconstrução volumétrica e a posterior visualização em múltiplos planos (sagital, coronal e axial), oferecendo uma visão detalhada e em cortes transversais da anatomia interna (Bushong, 2017). Na Figura 7, vemos, Godfrey Hounsfield, inventor da tomografia computadorizada, ao lado do primeiro aparelho de TC.

Figura 7 - Godfrey Hounsfield ao lado do primeiro aparelho de Tomografia Computadorizada.



Fonte: Adaptado de SARAIVA *et al.* (2023).

2.6.1 Unidades de Hounsfield

A Unidade de Hounsfield (HU), assim denominada em homenagem a Sir Godfrey Hounsfield, é a escala de medida da densidade radiológica usada em tomografia computadorizada (TC). Ela quantifica o quanto um tecido atenua (ou absorve) os raios X em relação à água e ao ar, permitindo diferenciar tipos de tecidos no corpo.

Esta unidade estabelece uma medida comparativa do coeficiente de atenuação (HU) dos diferentes volumes de um tecido em relação à água (Nadaes, 2015). Essa comparação é crucial para diferenciar as estruturas internas do corpo na imagem. Para a obtenção dos valores expressos em HU, a referência matemática utilizada é a Equação (1), que permite quantificar a densidade de cada *voxel*. A unidade de Hounsfield é calculada pela Equação 1:

$$HU = \left(\frac{\mu tecido - \mu agua)}{\mu agua - \mu ar} \right) x\,1000 \quad (1)$$

onde:

- μtecido = coeficiente de atenuação do tecido,
- μagua = coeficiente de atenuação da água,
- μar = coeficiente de atenuação do ar.

Na prática considera-se:

- Água = 0 HU
- Ar = -1000 HU

Com o passar dos anos, diversos trabalhos em tomografia computadorizada investigaram a forma como diferentes tecidos, órgãos e condições patológicas se apresentam nas imagens.

A Tabela 1 apresenta os valores da Escala de Hounsfield associados aos principais tecidos e estruturas do corpo humano.

Tabela 1 - Relação da escala de Hounsfield com partes do corpo humano.

Órgão/Tecido	Unidades de Hounsfield
Osso	1000
Sangue	13 a 18
Fígado	40 a 60
Músculo	50
Gordura	-100 a -50
Cérebro matéria branca	36 a 46
Cérebro matéria cinzenta	20 a 40
Dente	1600 a 3000
Ar	-1000

Fonte: Bushong, 2017; Gaia *et al.*, 2011.

2.6.2 Relação entre *infill* e Unidade de Hounsfield.

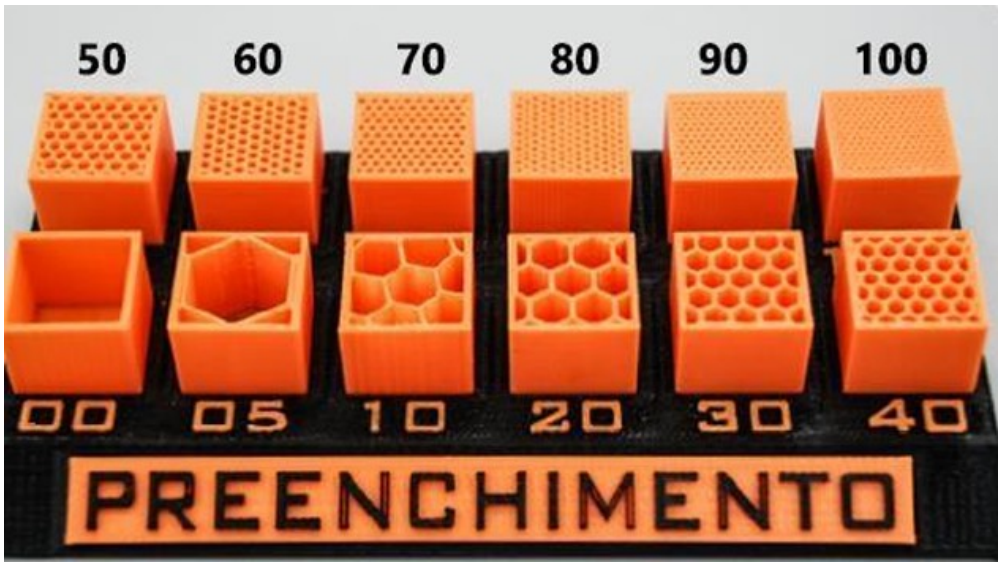
O *infill* – ou preenchimento – corresponde à porção interna da peça impressa em 3D. Sua densidade varia conforme o projeto e está diretamente associada à resistência, ao peso e ao tempo de fabricação. Esse parâmetro é definido no software de fatiamento, que determina tanto a porcentagem quanto o padrão de preenchimento. Segundo Savi (2022), a tecnologia FFF permite reproduzir características de diferentes tecidos humanos, independentemente do material plástico utilizado.

Pesquisas realizadas por Andrade *et al*. (2019), Dancewicz *et al.* (2017) e Okkalidis *et al.* (2018) demonstram que existe uma relação linear entre o percentual de *infill* e os valores de Hounsfield (HU) obtidos na tomografia computadorizada. Assim, torna-se possível definir um HU desejado ajustando-se apenas o nível de preenchimento da peça impressa. A densidade de preenchimento, portanto, influencia diretamente a quantidade de material depositado, o tempo de impressão e a resistência mecânica, impactando também a densidade radiológica da estrutura (AMBRÓS, 2019).

Kozee *et al*. (2023) investigaram 13 materiais comerciais e variaram o *infill* entre 50% e 100%, evidenciando mudanças significativas nos valores de HU. Os autores reforçam que o controle do preenchimento é uma estratégia eficaz para a fabricação de *phantoms* com propriedades radiológicas semelhantes às dos tecidos reais.

Vários são os tipos de preenchimento, tais como: hexagonal, grade, triângulos, linhas e concêntricos. Podendo também ser de várias densidades diferentes, como exemplificado na Figura 8.

Figura 8 – Exemplos de porcentagens de *infill*



Fonte: Menta *et al.* (2018).

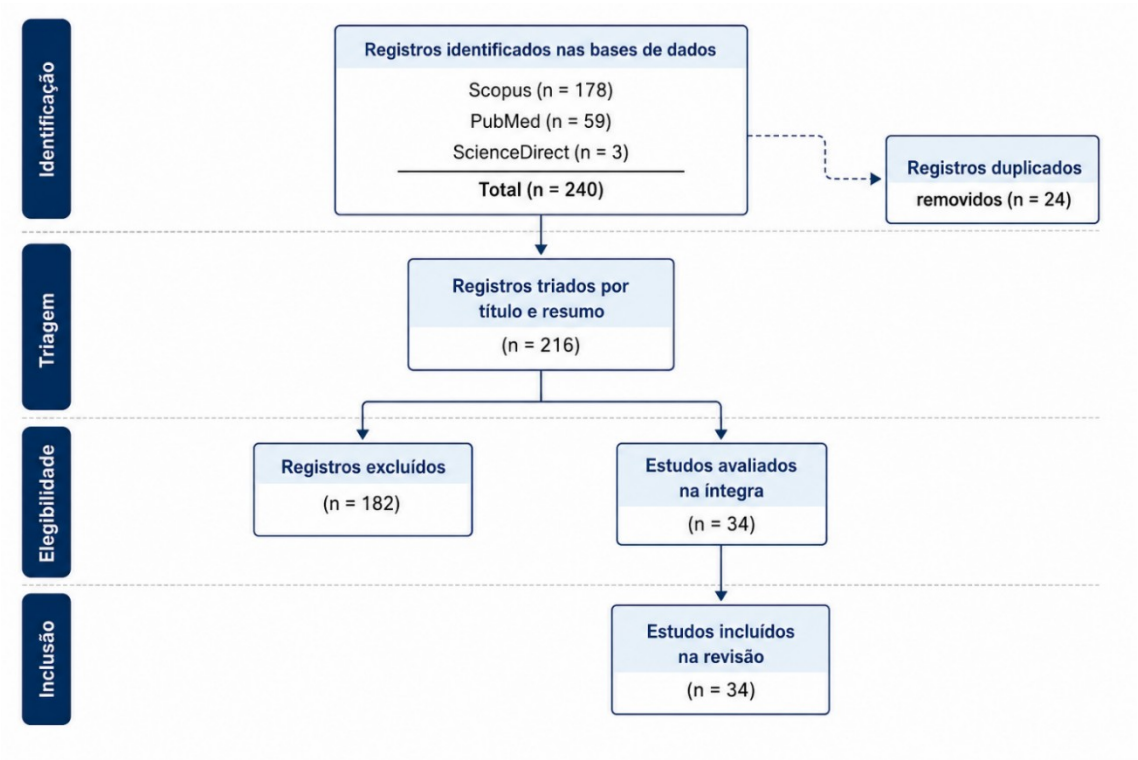
3 METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como descritiva, de abordagem qualitativa e de natureza aplicada. O estudo se baseou em procedimentos bibliográficos e documentais e teve como finalidade propor o modelo conceitual de um banco de dados voltado à produção de *phantoms* radiológicos de baixo custo.

A pesquisa não contemplou a implementação computacional do sistema, concentrando-se na identificação, organização e estruturação das informações consideradas relevantes para a fabricação de *phantom*s radiológicos. A partir dos dados obtidos na literatura analisada, foi proposta uma estrutura de banco de dados destinada ao armazenamento e à consulta de informações relacionadas aos materiais de impressão, parâmetros de fabricação e propriedades radiológicas.

Para a construção desta fundamentação teórica, realizou-se um levantamento bibliográfico nas bases de dados Scopus, PubMed e ScienceDirect, utilizando descritores relacionados à impressão 3D, *phantoms* radiológicos e parâmetros de caracterização de materiais. Foram priorizadas publicações entre 2017 e 2026; a busca inicial resultou em 240 registros. Após a remoção de duplicatas e a aplicação de critérios de exclusão, que priorizaram estudos experimentais com foco em equivalência radiológica e propriedades dos materiais em tecnologia FFF (*Fused Filament Fabrication*), restaram 34 fontes, incluindo artigos, livros e documentos técnicos que compõem a base teórica deste trabalho. A exclusão dos demais registros justifica-se pela divergência do escopo temático, como trabalhos focados em propriedades mecânicas sem aplicação radiológica ou revisões de literatura que não apresentaram dados de atenuação ou valores de Unidades de Hounsfield (HU). O processo de seleção está detalhado no fluxograma da Figura 9.

Figura 9: Fluxograma do processo de seleção dos estudos.



Fonte: Dados da pesquisa.

3.1 Delineamento de pesquisa

Foi realizado um levantamento bibliográfico em bases como (*PubMed*, Scopus, *ScienceDirect*), foram utilizados descritores em português e inglês relacionados à impressão 3D aplicada à radiologia e à fabricação de *phantoms*, incluindo os termos: "3D *printing FFF*", "*radiological phantom*", "*computed tomography*", "*filament*", "Hounsfield *units*", "*parameter*", "banco de dados''.

Alguns descritores foram combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, por exemplo:

a) ("3D printing" OR "Fused Filament Fabrication" OR FFF) AND ("radiological phantom" OR "3D printed phantom");
b) *("computed tomography") AND ("Hounsfield units" OR HU) AND (filament OR material)*;

c) ("3D printing") AND ("infill density") AND ("computed tomography");
d) *("database" OR "banco de dados") AND ("3D printing" OR "radiological phantom")*;
e) ("phantom" OR "fantasma") AND ("computed tomography" OR "tomografia computadorizada").

Foram incluídos artigos publicados nos idiomas português e inglês, que abordassem materiais para impressão 3D, propriedades radiológicas, parâmetros de impressão, fabricação de *phantoms* para tomografia computadorizada, banco de dados, e a relação entre densidade de preenchimento (*infill*) e Unidades de Hounsfield (HU). Foram descartados trabalhos duplicados, artigos sem acesso ao texto completo e publicações que não apresentassem informações relevantes para os objetivos desta pesquisa.

As informações coletadas foram analisadas com o objetivo de identificar os parâmetros mais frequentemente descritos na literatura como relevantes para a fabricação de *phantoms* radiológicos. Com base nessa análise, foram definidos os elementos considerados essenciais para compor a estrutura do banco de dados proposto, incluindo características dos filamentos, parâmetros de impressão e propriedades radiológicas dos materiais.

3.2 ASPECTOS ÉTICOS

A pesquisa em questão não realizou qualquer coleta de dados envolvendo seres humanos. Por isso, não houve necessidade de submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP). Ainda assim, o estudo foi desenvolvido seguindo todos os princípios éticos recomendados para a condução de investigações científicas. Foi utilizada uma ferramenta de inteligência artificial para revisão gramatical e ortográfica do texto, sem participação na elaboração do conteúdo científico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura evidenciou que diversos fatores influenciam as propriedades físicas e radiológicas dos objetos impressos, porém essas informações encontram-se dispersas em diferentes estudos científicos, dificultando sua consulta e aplicação prática por pesquisadores e profissionais da área. A análise dos estudos selecionados possibilitou a identificação dos principais parâmetros que influenciam a fabricação e a equivalência radiológica dos *phantoms*, destacando-se o tipo e o fabricante do filamento, a composição e as propriedades do material, a velocidade de impressão, o percentual e o padrão de preenchimento (*infill*), a temperatura do bico de extrusão, a temperatura da mesa de impressão, a altura de camada, o número de perímetros (*shell*) e os valores de Unidades de Hounsfield (HU). Os estudos selecionados e analisados, incluindo os trabalhos de Savi (2022), Kozee *et al.* (2023), Okkalidis *et al.* (2022), Park *et al.* (2019) e Tino *et al.* (2019), demonstraram que alterações nesses parâmetros podem modificar significativamente características como densidade, geometria e atenuação dos raios X, influenciando diretamente a capacidade do objeto impresso em reproduzir tecidos humanos.

Os resultados encontrados reforçam a importância do registro padronizado dessas informações, uma vez que a ausência de dados detalhados e compilados dificulta a reprodutibilidade dos modelos desenvolvidos e a comparação entre diferentes pesquisas. Materiais distintos podem apresentar ampla variação nos valores de HU e que parâmetros de impressão, especialmente o percentual de *infill*, exercem influência direta nas propriedades radiológicas dos objetos produzidos.

Com base nos parâmetros identificados, foi proposto uma estrutura conceitual de banco de dados capaz de centralizar e organizar informações atualmente dispersas, reunindo os elementos considerados essenciais para a fabricação de *phantoms* radiológicos de baixo custo. A tabela 2 representada a seguir, exemplifica a aplicação desse conteúdo.

Tabela 2 – Exemplo de um banco de dados.

ID	MATERIAL	INFILL	PREENCHIMENTO	T. DO BICO	T. DA MESA	VELOCIDADE	SHELL	ALTURA CAMADA
1	PLA	10%	RETILINEO	240°C	30°C	20mm/s	10	5
2	ABS	30%	GIRÓIDE	150°C	50°C	30mm/s	20	10
3	NYLON	50%	RETANGULAR	200°C	70°C	50mm/s	30	15

Fonte: autora 2026.

Dessa forma, a estrutura proposta contribui para a padronização do registro de dados, facilita a reprodução de modelos previamente desenvolvidos e pode auxiliar pesquisadores na seleção de materiais e configurações adequadas para diferentes aplicações em radiologia.

5 PARÂMETROS IDENTIFICADOS PARA COMPOSIÇÃO DO BANCO DE DADOS

A revisão bibliográfica realizada permitiu identificar os principais parâmetros que influenciam a fabricação de *phantoms* radiológicos por meio da tecnologia FFF. A análise dos estudos demonstrou que a reprodução das propriedades construtivas e radiológicas dos tecidos humanos não depende exclusivamente do material utilizado, mas também das configurações adotadas durante o processo de impressão. Os tópicos a seguir apresentam a relevância de cada um desses elementos para a fabricação de *phantoms*.

5.1 Parâmetros Radiológicos

Os parâmetros radiológicos são fundamentais para garantir a equivalência tecidual do *phantom*, ou seja, sua capacidade de atenuar a radiação de maneira semelhante aos tecidos biológicos humanos. Essa equivalência é obtida pela combinação de diferentes fatores, incluindo as características intrínsecas do material utilizado e as configurações adotadas durante o processo de impressão. Entre os principais parâmetros, destacam-se o percentual e o padrão de preenchimento (*infill*), que controlam a proporção entre material maciço e ar no interior da peça, bem como outros ajustes de impressão que

influenciam a homogeneidade estrutural e as propriedades de atenuação do objeto final impresso.

5.1.1 Identificação da composição do Filamento

A identificação detalhada do filamento é indispensável, visto que Savi *et al.* (2020) observaram que diferentes filamentos comerciais apresentam respostas radiológicas distintas em TC. Ao avaliarem 14 materiais disponíveis no mercado, os autores observaram uma ampla faixa de valores de Unidade Hounsfield (HU), o que indica que a procedência e a fabricação do filamento influenciam diretamente sua aplicabilidade na simulação de tecidos específicos.

Além das variações comerciais padrão, modificações químicas intencionais alteram drasticamente o comportamento do material frente à radiação. Villani *et al.* (2021) demonstraram que matrizes poliméricas idênticas (como o ABS) apresentam atenuação significativamente superior quando aditivadas com compostos de alto número atômico, como o tungstênio e o bismuto, em comparação ao polímero puro. Esse achado evidencia que o comportamento radiológico não depende exclusivamente do polímero-base, mas também das cargas radiopacas incorporadas à sua estrutura.

Diante disso, o registro da matéria-prima no banco de dados proposto não deve se limitar à classificação genérica do polímero. Torna-se essencial contemplar a composição química detalhada, a presença e o tipo de aditivos, e o fabricante do filamento, assegurando a rastreabilidade e o controle sobre as propriedades de atenuação dos *phantoms*.

5.1.2 Percentual e Padrão de Preenchimento (Infill)

O *infill* é um dos parâmetros de impressão de maior impacto sobre as propriedades radiológicas do *phantom*. Ele define a proporção de material sólido depositado no interior do modelo, variando de 0% (peça completamente oca) a 100% (maciça). Ao modificar esse percentual, altera-se a proporção volumétrica

entre polímero e ar, modificando diretamente a densidade efetiva e a capacidade de atenuação à radiação da peça. Como destaca Martins (2017), menores espaços vazios entre os cordões depositados aumentam a densidade efetiva e favorecem maior compactação estrutural.

Na tomografia computadorizada, essa densidade influencia diretamente a resposta radiológica. Tino *et al.* (2019) relatam que o controle do percentual de *infill* se correlaciona diretamente com os valores de Unidade Hounsfield (HU). Experimentalmente, Savi (2022) e Okkalidis, Chatzigeorgiou e Okkalides (2018) observaram que o aumento do preenchimento resulta em elevação linear dos valores de HU. Esse comportamento permite estimar com maior previsibilidade qual configuração pode ser utilizada para aproximar determinado filamento da atenuação do tecido humano simulado.

Além da densidade volumétrica, o padrão geométrico interno, como retilíneo, colmeia ou giróide, e o tipo de material também afetam a homogeneidade da imagem. Savi, Andrade e Potiens (2020) demonstraram que os valores de HU variam não apenas em função da porcentagem, mas também do padrão de *infill* utilizado, aspecto também observado por Talalwa *et al.* (2020) e Costa *et al.* (2025). Savi (2022) verificou que, para preenchimentos inferiores a 50% no padrão retilíneo, começam a surgir artefatos de amostragem visíveis nas imagens tomográficas.

Diante dessa complexidade e das variáveis interdependentes, torna-se necessário que o banco de dados proposto registre o percentual, o padrão geométrico e o tipo de filamento, garantindo a rastreabilidade e a reprodutibilidade radiológica dos simuladores.

5.2 Parâmetros construtivos

Os parâmetros construtivos englobam as configurações de impressão que influenciam a qualidade física, a precisão geométrica e a reprodutibilidade dos *phantoms*. Eles incluem a temperatura do bico de extrusão e da mesa, que controlam a fusão e fixação do material; a velocidade de impressão e a altura de

camada, responsáveis pelo acabamento e detalhamento, e o número de perímetros (*shell*), que define a espessura das paredes externas. O ajuste preciso dessas variáveis garante que os materiais selecionados sejam impressos sem defeitos estruturais ou distorções que possam comprometer os testes radiológicos.

5.2.1 Temperatura do bico de extrusão

A temperatura do bico de extrusão é um dos principais parâmetros da tecnologia FFF, influenciando diretamente a deposição do material e as propriedades mecânicas e dimensionais da peça produzida. O aumento da temperatura reduz a viscosidade do filamento, favorecendo o preenchimento de vazios internos; entretanto, o aquecimento excessivo pode comprometer a qualidade superficial e a precisão dimensional (Carneiro *et al*., 2019).

Além da adesão entre as camadas, essa variável interfere na homogeneidade interna do objeto. Temperaturas adequadas favorecem uma fusão mais uniforme e reduzem a formação de vazios microscópicos. Özsoykal, Husemoglu e Yurt (2021) observaram que amostras impressas em temperaturas mais elevadas apresentaram menor variação nos valores de Unidade Hounsfield (HU), indicando maior estabilidade estrutural e radiológica.

Por outro lado, extremos térmicos são prejudiciais. Temperaturas abaixo do recomendado geram falhas de extrusão, baixa adesão e lacunas internas. O superaquecimento aumenta excessivamente a fluidez do polímero, causando deformações e deposição irregular — efeito observado por Hong *et al*. (2020) no desenvolvimento de um *phantom* pulmonar, onde a alta temperatura combinada a baixas velocidades gerou estruturas filamentosas na superfície da peça.

Todas essas anomalias geométricas interferem diretamente na densidade real do objeto impresso. Como destaca Savi (2022), a densidade é um fator central para a equivalência tecidual, sendo altamente dependente da estabilidade no processo de fusão e deposição. Portanto, inconsistências

térmicas traduzem-se em artefatos e alterações indesejadas na atenuação tomográfica, dificultando a reprodução fiel dos tecidos simulados entre diferentes equipamentos.

O registro da temperatura do bico de extrusão no banco de dados torna-se indispensável para garantir a rastreabilidade, a padronização e a reprodutibilidade dos processos de manufatura e dos resultados radiológicos associados aos *phantoms* produzidos por FFF.

5.2.2 Temperatura da Mesa de Impressão

A temperatura da mesa, ou cama aquecida, exerce influência sobre a aderência da primeira camada do objeto à superfície de construção e sobre o resfriamento das camadas subsequentes. Para materiais propensos à contração térmica, como o ABS, amplamente utilizado na construção de *phantoms* e presente na composição dos filamentos customizados desenvolvidos por Savi (2022), a mesa aquecida é indispensável para evitar o efeito de empenamento (*warping*). O *warping* ocorre quando as bordas ou cantos da peça resfriam mais rapidamente que o restante do volume, contraindo-se e descolando-se da superfície de impressão, o que deforma a geometria final do objeto.

Esse empenamento compromete a geometria do *phantom*, ocasionando alterações dimensionais capazes de gerar erros relevantes nos resultados dosimétricos. De acordo com Savi (2022), diferenças de apenas 1 mm na reprodução espacial dos tecidos podem resultar em até 12% de erro na mensuração da dose radiológica. Dessa forma, o monitoramento e o registro da temperatura da mesa aquecida tornam-se fundamentais no banco de dados para garantir a precisão geométrica e a reprodutibilidade das impressões.

5.2.3 Velocidade de Impressão

A velocidade de impressão corresponde à taxa com que o bico extrusor percorre o modelo durante a deposição do material, influenciando o

tempo de resfriamento de cada camada e a adesão intercamadas. Quando ajustada de forma inadequada, especialmente em valores muito elevados, pode favorecer subextrusão, formação de porosidades internas e redução da homogeneidade estrutural da peça. Carneiro *et al*. (2019) apontam que a parametrização da velocidade de impressão influencia o resultado final tanto em termos dimensionais quanto em suas propriedades mecânicas. Hong *et al.* (2020), ao fabricarem um *phantom* pulmonar, identificaram que a velocidade de impressão atua em conjunto com a temperatura do bico na determinação da microestrutura superficial da peça, evidenciando a interdependência entre esses parâmetros na definição das características finais do *phantom*. Adicionalmente, Tino *et al.* (2019) destacam que a aplicação da impressão 3D na produção de *phantom*s radiológicos depende do controle dos parâmetros de fabricação para garantir a reprodução consistente das propriedades físicas e radiológicas dos materiais. Portanto, o registro da velocidade de impressão no banco de dados é essencial para permitir a padronização, a repetibilidade e o compartilhamento de dados confiáveis entre pesquisadores.

5.2.4 Número de Perímetros (Shell)

O parâmetro *shell* define a quantidade de perímetros sólidos que compõem as paredes externas e internas do modelo impresso. Diferentemente do *infill*, que controla a proporção de preenchimento interno da peça, os perímetros são depositados de forma contínua, formando uma região de maior densidade ao redor do objeto. Em *phantom*s radiológicos, esse parâmetro deve ser cuidadosamente controlado, pois pode alterar a distribuição espacial dos valores de HU na imagem tomográfica. Savi (2022) identificou que o *shell* pode exercer influência considerável na imagem de *phantom*s, criando uma região periférica com atenuação mais elevada em relação ao interior da peça, o que pode gerar gradientes de HU não representativos do tecido simulado.

Dessa forma, a definição do número de perímetros envolve um equilíbrio entre fidelidade radiológica e resistência mecânica. Um número elevado de *shells* aumenta a espessura da parede sólida, podendo melhorar a

resistência estrutural do *phantom*, mas também pode modificar sua densidade aparente e sua homogeneidade radiológica. Por outro lado, a redução excessiva ou ausência de perímetros pode comprometer a integridade mecânica da peça, dificultando seu manuseio e sua aplicação experimental. Assim, o número de perímetros deve ser registrado no banco de dados, juntamente com o percentual de *infill*, o padrão de preenchimento e o material utilizado, para permitir maior rastreabilidade e reprodutibilidade na fabricação de *phantom*s radiológicos. A Figura 9 ilustra a relação entre o número de perímetros e a espessura das paredes externas.

Figura 9 - Espessuras das paredes externas



Fonte: All3dp

5.2.5 Altura de Camada

A altura de camada determina a espessura de cada faixa de material depositada durante a impressão. Esse parâmetro possui impacto direto sobre a qualidade superficial e geométrica da peça e sobre o tempo total de impressão. No contexto de *phantom*s para tomografia computadorizada, a acurácia dimensional é especialmente crítica: Savi (2022) ressalta que os *phantom*s devem ser construídos de forma que sua geometria esteja em conformidade com

aquela especificada, pois pequenos desvios podem introduzir erros nas estimativas de dose absorvida e atenuação da radiação. Tino *et al.* (2019) reforçam esse critério ao destacar que a reprodução fiel da geometria do paciente é essencial para que o *phantom* seja válido em aplicações de dosimetria. O registro da altura de camada no banco de dados favorece a rastreabilidade do processo e contribui para que futuras reproduções de *phantom* mantenham características geométricas semelhantes às do modelo original.

Com base nos parâmetros identificados e listados nos tópicos acima, foi possível definir os elementos considerados essenciais para compor a estrutura conceitual do banco de dados proposto. Esses elementos contemplam informações sobre materiais, parâmetros construtivos e propriedades radiológicas, constituindo a base para futuras implementações computacionais destinadas ao armazenamento e consulta desses dados.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo propor uma estrutura conceitual de banco de dados para organização e compilação de informações relacionadas à fabricação de *phantom*s radiológicos de baixo custo por meio da tecnologia FFF. A partir da revisão bibliográfica e da análise documental realizadas, foi possível identificar os principais parâmetros que influenciam as propriedades físicas e radiológicas dos objetos impressos, bem como sua importância para a reprodução de tecidos humanos em aplicações radiológicas.

Os resultados obtidos demonstraram que fatores como identificação do filamento, composição do material, temperatura do bico de extrusão, temperatura da mesa de impressão, velocidade de impressão, percentual e padrão de preenchimento, número de perímetros e altura de camada exercem influência direta sobre as características finais dos *phantom*s. Dessa forma, o registro sistemático dessas informações mostra-se essencial para garantir maior padronização, rastreabilidade e reprodutibilidade dos modelos desenvolvidos.

Com base nos parâmetros identificados na literatura, foi proposta uma estrutura de organização dos dados capaz de reunir informações sobre materiais, parâmetros de impressão e propriedades radiológicas relevantes para a fabricação de *phantoms* radiológicos. A proposta busca contribuir para a centralização de conhecimentos atualmente dispersos em diferentes estudos, facilitando o acesso a informações relevantes para pesquisadores, estudantes e profissionais envolvidos com a fabricação de *phantom*s radiológicos.

Como limitação do estudo, destaca-se que não foi realizada a implementação computacional do banco de dados no âmbito deste trabalho, concentrando-se a pesquisa na identificação dos parâmetros relevantes e na proposição de sua estrutura organizacional. Entretanto, a estrutura proposta serve como base para o desenvolvimento de uma plataforma destinada ao armazenamento e consulta dessas informações.

Nesse contexto, destaca-se que o sistema se encontra em desenvolvimento no Laboratório de Manufatura Aditiva e Inovação em Saúde

(LabMAIS), o que permitirá futuramente a implementação prática, visual e interativa da estrutura proposta neste estudo. A incorporação contínua de novos materiais, parâmetros de impressão e resultados experimentais poderá ampliar a abrangência da plataforma, contribuindo para a consolidação de um repositório de informações voltado à fabricação de *phantom*s radiológicos de baixo custo.

Conclui-se que a organização sistemática dessas informações pode contribuir para a democratização do acesso à fabricação de *phantom*s radiológicos de baixo custo, favorecendo o avanço da pesquisa, do ensino e das práticas de garantia da qualidade em radiologia.

REFERÊNCIAS

ALURA. Banco de dados. *Alura*, [s.d.]. Disponível em: https://www.alura.com.br/artigos/banco-de-dados. Acesso em: 20 set. 2025.

3D LAB. **Filamentos**. 2025. Disponível em: https://3dlab.com.br/. Acesso em: 11 nov. 2025.

BUSHONG, S. C. **Radiologic Science for Technologist**: Physics, Biology and Protection. 11. ed. St. Louis: Elsevier, 2017.

CARNEIRO, L. R. R. *et al*. **Influência da temperatura da mesa de impressão 3D na dureza e dimensões geométricas de amostras em ABS**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2019, ABCM. **Anais**... Disponível em: http://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/22207. Acesso em: 18 nov. 2025.

COUGO, P**. Modelagem conceitual e projeto de banco de dados**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2013. Disponível em: https://www.kufunda.net/publicdocs/Modelagem%20conceitual%20e%20projeto%20de%20bancos%20de%20dados%20(Cougo,%20Paulo%20S%C3%A9rgio).pdf. Acesso em: 15 jun. 2026

DANCEWICZ, O. L. *et al.* Radiological properties of 3D printed materials in kilovoltage and megavoltage photon beams. **Physica Medica**, v. 38, p. 111–118, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.05.051. Acesso em: 15 jun. 2026

DATE, C. J. **An Introduction to Database Systems**. 8. ed. Boston: Addison Wesley, 2004. Acesso em: 15 jun. 2026

DEWERD, L. A.; KISSICK, M. (eds.). **The *Phantom*s of Medical and Health Physics: Devices for Research and Development**. New York: Springer, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8304-5. Acesso em: 15 jun. 2026

DONE3D. **História das impressoras 3D**. [s.d.]. Disponível em: https://done3d.growbiz.com.br/historia-das-impressoras-3d/. Acesso em: 31 out. 2025.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. **Fundamentals of Database Systems**. 6. ed. Boston: Addison Wesley, 2011. Acesso em: 15 jun. 2026

FUENTES DEL TORO, S. *et al.* Mechanical performance of 3D-printed TPU auxetic structures for energy absorption applications. **Polymer Testing**, v. 143, p. 108669, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108669. Acesso em: 15 jun. 2026

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GTMAX 3D. **Impressoras 3D**. 2025. Disponível em: https://www.gtmax3d.com.br/. Acesso em: 18 nov. 2025.

GUAN, Y. et al. Entity slicing software development for 3D printing. **China Foundry**, v. 18, n. 6, p. 587–592, 2021.Disponível em: https://doi.org/10.1007/s41230-021-1090-y. Acesso em: 15 jun. 2026

HOFMANN, Thomas; BUSCHMANN, Martin; BELARRA, Adrian; CASTILLO-GARCIA, Maria; CHEVALIER, Margarita; HERNANDEZ-GIRON, Irene; HOMOLKA, Peter. **Mimicking Tissues in 3D-Printed Radiology *Phantom*s: Brand, Product, and Color of Printing Filaments Matter!** *Polymers*, v. 18, n. 7, p. 851, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.3390/polym18070851. Acesso em: 10 jun. 2026.

KOZEE, C. R. et al. Methodology for computed tomography characterization of commercially available 3D printing materials for use in radiology/radiation oncology. **Journal of Applied Clinical Medical Physics**, v. 24, n. 7, e14015, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1002/acm2.13999. Acesso em: 15 jun. 2026

LAUDON, K. C.; LAUDON, J. P. **Management Information Systems: Managing the Digital Firm**. 14. ed. Essex: Pearson, 2016.

LAUDON, K. C.; LAUDON, J. P. **Sistemas de Informação Gerencial**: **Gerenciando o Projeto Digital**. 16. ed. São Paulo: Pearson, 2020.

LIMA, D. F. B. *et al.* Sistema de informação em saúde: conceções e perspetivas dos enfermeiros sobre o prontuário eletrónico do paciente. **Revista de Enfermagem Referência**, série III, n. 5, p. 113–119, 2011. Disponível em: https://www.redalyc.org/pdf/3882/388239964021.pdf. Acesso em: 15 jun. 2026

MARINS, J. A. O.; GUARIENTI, G. S. S. **Introdução a Banco de Dados**. Cuiabá: UFMT, 2019. Disponível em: https://www.studocu.com/pt-br/document/instituto-federal-de-educacao-ciencia-e-tecnologia-sao-paulo/banco-de-dados/fasciculo-introducao-banco-dados-30-08/15426104. Acesso em: 15 jun. 2026

MAZZANTI, V.; MALAGUTTI, L.; MOLLICA, F. FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. **Polymers**, v. 11, n. 7, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/polym11071094. Acesso em: 15 jun. 2026

MEI, K. *et al*. Three-dimensional printing of patient-specific lung *phantom*s for CT: Tissue emulation with accurate profiles and textures. **Medical Physics**, v.

49, n. 2, p. 825–835, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1002/mp.15407. Acesso em: 15 jun. 2026

MENTA, E. *et al.* **Impressão 3D**: imaginar, planejar e materializar. Curitiba: SEED-PR, 2018.

MORESI, A. P. N. F. **Modelagem de Sistemas de Informação**: uma abordagem utilizando Redes de Petri. Brasília: UnB, 2000.

OKKALIDIS, N. *et al*. A filament-based 3D printing approach for replication of CT-compatible bone tissues. **Physics in Medicine**, v. 102, p. 96–102, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.09.009. Acesso em: 15 jun. 2026

PARK, S.-Y. *et al*. Radiological characteristics of materials used in 3-dimensional printing with various infill densities. **Progress in Medical Physics**, v. 30, n. 4, p. 155–159, 2019. Disponível em: 10.14316/pmp.2019.30.4.155. Acesso em: 10 jun. 2026.

PENTEADO, O. P. R. **Banco de Dados**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

SARAIVA, R. de S.; PARENTE FILHO, L. W. S. Importância do tratamento e documentação de imagens de tomografia computadorizada**. Brazilian Journal of Health Review**, v. 6, n. 6, p. 27948–27959, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.34119/bjhrv6n6-112. Acesso em: 10 jun. 2026.
SAVI, M.; ANDRADE, M. A. B.; POTIENS, M. P. A. Commercial filament testing for use in 3D printed *phantom*s. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 174, art. 108906, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108906. Acesso em: 10 jun. 2026

SAVI, M. B. **Estudo de materiais e desenvolvimento de um simulador antropomórfico de cabeça e pescoço por meio de impressão 3D**. 2022. 124 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022. Disponível em: 10.11606/T.85.2022.tde-04082022-143618. Acesso em: 10 jun. 2026

SILVESTRO, E. *et al.* Imaging Properties of Additive Manufactured (3D Printed) Materials for Potential Use for *Phantom* Models. **Journal of Digital Imaging,** v. 33, p. 456–464, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10278-019-00257-5. Acesso em: 18 jun. 2026

STAIR, R.; REYNOLDS, G. **Principles of Information Systems**. 12. ed. Boston: Cengage Learning, 2018.

TALALWA, L. *et al*. Radiological characteristics of a new experimental rubber elastomeric polymer used in three-dimensional printing with different infill densities and patterns. **Journal of Physics Communications**, v. 4, n. 12, p.

125006, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1088/2399-6528/abd1c3. Acesso em: 18 jun. 2026

TINO, R. *et al*. A systematic review on 3D-printed imaging and dosimetry *phantom*s in radiation therapy. **Technology in Cancer Research & Treatment,** v. 18, p. 1–20, 2019. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6856980/. Acesso em: 18 nov. 2025.

VERISSIMO, I. Aplicações da impressão 3D no design industrial: avanços, materiais e sustentabilidade. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos**, v. 8, n. 19, e082304, 2025 Disponível em: https://doi.org/10.55892/jrg.v8i19.2304. Acesso em: 18 jun. 2026

VILLANI, D. *et al.* Characterization of ABS + W and ABS + Bi 3D printing filaments attenuation for different photon beams. **Journal of Physics: Conference Series,** v. 1826, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1826/1/012037. Acesso em: 20 jun. 2026