

PROSPECÇÃO BIBLIOMÉTRICA DE TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D E FILAMENTO PLÁSTICO COM CARGA METÁLICA PARA CONFECCÃO DE *BOLUS* PERSONALIZADOS NA PRÁTICA CLÍNICA RADIOTERÁPICA

Ana Caroline Silva da Luz – anacarol.radio@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Produtos – Instituto Federal da Bahia

Marcelo Santana Silva – marcelosilva@ifba.edu.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Produtos – Instituto Federal da Bahia

Luís Oscar Silva Martins – luisoscar@ufrb.edu.br

Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual – Universidade Federal do Recôncavo

Wilson Otto Gomes Batista – wilson.otto@ifba.edu.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Produtos – Instituto Federal da Bahia

Resumo — Este estudo realiza uma prospecção bibliométrica sobre o uso da impressão 3D para confecção de bolus personalizados para radioterapia. A pesquisa, de caráter exploratório, analisou 51 publicações obtidas nas bases Web of Science, 79 do Scopus e 51 do PubMed, no período de 2020 a 2025. Os dados foram tratados com apoio das ferramentas Microsoft Excel, Zotero e VOSviewer. Observou-se crescimento constante de publicações a respeito do tema, com pico de 2023 a 2024, destacando Estados Unidos e China como os principais países produtores. As palavras-chave mais frequentes indicam foco na aplicação clínica e no desempenho dos materiais. Os resultados apontam que, embora a aplicação da impressão 3D seja crescente, os estudos específicos utilizando filamentos com carga metálica ainda são escassos. Esses materiais, no entanto, demonstram potencial promissor por possibilitarem bolus com menor espessura, melhor adaptação anatômica e maior capacidade de atenuação da dose — características valiosas especialmente em regiões com restrição de espaço. O cenário atual indica a necessidade de mais investigações clínicas e experimentais para consolidação dessa abordagem.

Palavras-chave: bolus, radioterapia, impressão, PLA filamento metálico, manufatura aditiva.

Abstract— This study conducts a bibliometric survey on the use of 3D printing for the fabrication of personalized bolus for radiotherapy. The exploratory research analyzed 51 publications from the Web of Science, 79 from Scopus, and 51 from PubMed, covering the period from 2020 to 2025. Data were processed using Microsoft Excel, Zotero, and VOSviewer. A steady growth in publications on the topic was observed, with a notable increase between 2023 and 2024, highlighting the United States and China as the leading contributing countries. The most frequent keywords indicate a focus on clinical application and material performance. The results show that, although the application of 3D printing is expanding, studies specifically involving metal-filled filaments are still scarce. However, these materials show promising potential, as they allow the production of boluses with reduced thickness, improved anatomical conformity, and greater dose attenuation — features especially valuable in anatomically constrained regions. The current scenario highlights the need for further clinical and experimental research to consolidate this approach.

Keywords— *bolus, radiotherapy, 3D printing, PLA metal filament, additive manufacturing.*

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Relatório 24 da International Commission on Radiation Units and

Measurements (ICRU, 1976), bolus é definido como um material com propriedades equivalentes às do tecido humano posicionado sobre ou ao redor da região a ser irradiada com o objetivo de modificar a distribuição da dose, promovendo seu aumento da superfície.

Os bolus utilizados na prática clínica podem ser comerciais, customizados, padrão, ou individualizados, sendo confeccionados com uma variedade de materiais. Historicamente materiais tais como silicone, cera de parafina e mix D, são empregados com a finalidade de obter a superficialização de dose em tratamentos radioterápicos, tanto com utilização de fótons e elétrons (Spezzia, 2016). Comercialmente existem bolus a base de resinas, polímeros orgânicos, vinil sem látex (Superflab) e existem muitos materiais que podem ser confeccionados, como a gaze de algodão embebida com vaselina (Vyas *et al.*, 2013).

A espessura necessária para o uso do *bolus* em radioterapia, a fim de alcançar seu objetivo, é usualmente aquela que promove o equilíbrio eletrônico do feixe terapêutico, ou seja, a espessura equivalente em água (Fatih *et al.*, 2021). Em tratamentos que requerem o uso de outros acessórios como a máscara termoplástica, o uso dos *bolus* convencionais se torna inviável devido a sua espessura, que são na ordem de centímetros, gerando inadequação do seu uso e função.

Na atualidade a tecnologia de impressão 3D (manufatura aditiva) e a oferta de filamentos plásticos com carga de partículas metálicas possibilitam a fabricação de *bolus* personalizados com espessuras da ordem de milímetros. Os polímeros termoplásticos padrão, como ácido polilático (PLA), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e polietileno tereftalato glicol (PETG), são os materiais mais comuns para impressão e frequentemente servem como base para estudo dos *bolus* (Jung *et al.*, 2024). A associação desses filamentos plásticos com adição de filamento com carga metálica, vem se apresentando como uma alternativa promissora, pois esses elementos aumentam a densidade efetiva do filamento, permitindo a criação de *bolus* com menos espessura física, mas com maior poder de atenuação. Isso é crucial para áreas que exigem modificação de dose em profundidades rasas ou quando há restrições de espaço (Ehler, 2020).

O objetivo deste estudo é realizar uma prospecção bibliométrica de tecnologias de impressão 3D, com utilização de filamentos plásticos com carga metálica e bolus personalizados com o uso dessas tecnologias.

2 METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa de caráter exploratório com abordagem quali-quantitativa cujo o levantamento dos dados prospecção ocorreu de maio a de julho de 2025.

Foi realizada a busca com a delimitação temporal de 5 anos, considerando os anos de 2020 a 2025. Essa estratégia teve como objetivo identificar o avanço da tecnologia em questão. Com a utilização de filtros, foram selecionados artigos de pesquisa e artigos de revisão. As buscas foram realizadas em títulos, resumos e palavras-chave.

2.1 BASE DE DADOS UTILIZADAS

Foram utilizadas as bases de dados científicas *Web of Science* (coleção principal), *Scopus* e *PubMed*. Todas as bases de dados foram acessadas por meio do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

As palavras-chave adotadas, por estarem mais direcionadas ao tema proposto na pesquisa, foram *bolus*, *radiotherapy*, *compensator*, *3D printed*, *additive manufacturing*, *PLA metal filamento* e *radiation therapy*. Essas palavras foram utilizadas isoladas e combinadas entre si por meio dos conectivos booleanos AND e OR. As aspas foram usadas para a expressão exata das palavras em

inglês. Resultando em: ("PLA metal filament" OR "bolus radiotherapy" OR "3d printing") AND ("3D printing" OR "additive manufacturing") AND ("bolus" OR "compensator") AND ("radiotherapy" OR "radiation therapy") AND ("bolus" OR "compensator") AND (bolus OR small thickness). Para melhorar a busca, foram utilizadas as mesmas palavras-chaves em todas as bases de dados.

Os artigos encontrados foram exportados em formato CSV e RIS e analisados quantitativamente no Microsoft Excel e VOSviewer.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROSPECÇÃO BIBLIOMÉTRICA

Por meio da busca de documentos (artigos, artigos de pesquisa, artigos de revisão) com as palavras-chave, foi possível quantificar o número de artigos para a realização do estudo. A busca sistematizada nas bases de dados resultou em 197 documentos, sendo 51 do *PubMed*, 79 do *Scopus* e 66 da *Web of Science*. Após a remoção de duplicatas no Zotero, resultou em 95 registros, conforme a tabela 1. Após a avaliação de títulos e resumos, considerando os critérios definidos, foram selecionados 20 artigos mais relevantes para a análise.

Tabela 1 - Palavras-chave e seus respectivos resultados nas bases de dados de acordo com cada cruzamento realizado no período de maio a junho de 2025.

Bases de Pesquisa	Nº de artigos	Palavras-chave
PubMed/MEDLINE	51	
Scopus	79	("PLA metal filament" OR "bolus radiotherapy" OR "3d printing") AND ("3D printing" OR "additive manufacturing") AND ("bolus" OR "compensator") AND ("radiotherapy" OR "radiation therapy") AND ("bolus" OR "compensator") AND ("bolus" OR "compensator") AND (bolus OR small thickness)
Web of Science	66	
Total	197	
Total após remoção de duplicatas	95	

Fonte: Autora, 2025.

3.1.1 ANÁLISE QUANTITATIVA DESCRITIVA

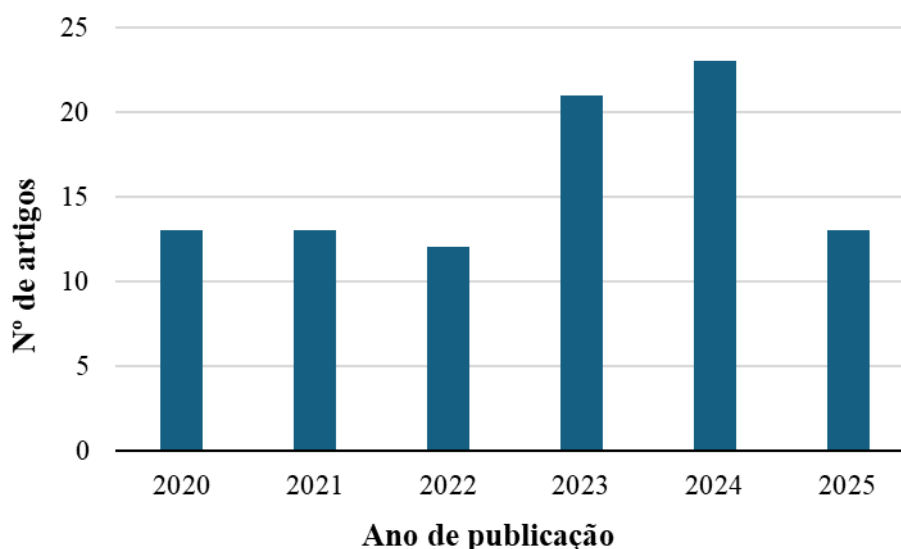
Após a remoção de duplicatas e a compilação de todos os estudos, para a análise quantitativa foi considerado: (a) distribuição de artigos por ano de publicação; (b) países e (c) periódicos utilizados. Essa caracterização estabelece uma base sólida para a análise qualitativa subsequente, o que é crucial para o desenvolvimento de *bolus* personalizados utilizando impressão 3D associado a outras tecnologias.

3.1.1.1 DISTRIBUIÇÃO DE ARTIGOS POR ANO DE PUBLICAÇÃO

Observou-se que do ano de 2020 a 2022, os estudos foram fundacionais, focados em caracterização dos materiais, amadurecimento tecnológico e validação inicial dos métodos. Os anos de 2023 e 2024 foram os anos de maior número de publicações, considerando um pico no interesse pelo tema.

O quantitativo de publicações no presente ano (2025), sugere que o tema continua atual, com tendência de manutenção da produção científica e continuidade do avanço tecnológico e clínico. A distribuição dos artigos por ano de publicação está representada no gráfico 1.

Gráfico 1 - Distribuição de artigos por ano de publicação.



Fonte: Autora, 2025.

3.1.1.2 DISTRIBUIÇÃO POR PAÍSES

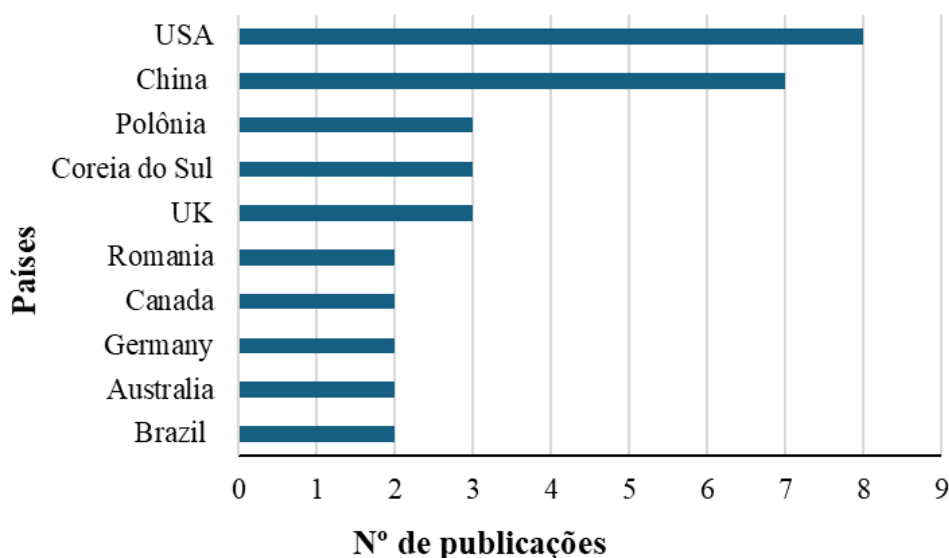
Estados Unidos (EUA) e China são os países com maior número de publicações. A China se destaca por suas políticas de investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), onde a inovação tecnológica é uma prioridade nacional. O país possui uma vasta rede de hospitais universitários com centros de pesquisa integrados a engenharia biomédica, facilitando a translação de estudos do laboratório para aplicação clínica. Além disso, há um financiamento substancial direcionado a áreas de oncologia, física médica e impressão 3D. Os EUA possuem uma estrutura sólida de pesquisa clínica e acadêmica, com universidades de renome como Harvard, Stanford e MD Anderson, que abrigam centros de referência em radioterapia e engenharia médica. O apoio financeiro de agências como NIT (National Institutes of Health) e SNF (National Science Foundation) é essencial, pois priorizam pesquisas translacionais e tecnologias médicas, tendo ênfase na validação de novos métodos.

Há presença marcante de publicações também em países como Polônia, Coreia do Sul e Reino Unido e Brasil. Os estudos mais frequentes da Polônia, estão associados a caracterização dosimétrica de materiais impressos em 3D (PLA, TPU, ABS) e avaliação da reprodutibilidade de impressão e controle de qualidade do bolus. A produção polonesa é tecnicamente sofisticada, mas com menor foco em aplicação clínica direta (Kolzlowska *et al.* 2020). A produção científica realizada na Coreia do Sul, a exemplo do estudo realizado por Lee *et al.* 2022, é com foco em estudo que visa a validação clínica localizada (cabeça/pescoço), ou seja, tende a ser mais voltada para casos clínicos específicos e não para abordagens exploratórias de novos materiais, como na China. Além disso, poucos grupos publicam regularmente na área. O Reino Unido, se configura com pioneiro em produção científica voltada para implementação clínica de protocolos e padronização do uso de bolus impresso em 3D (Taylor *et al.*, 2021). No Brasil, os tipos de produção científica mais frequentes são estudos técnicos e exploratórios com foco na viabilidade de materiais alternativos, a exemplo do PLA nacional como

material de bolus de baixo custo para utilização no Sistema Único de Saúde (SUS) (Diaz *et al.*, 2022).

O avanço da produção científica apresenta um potencial crescente com foco em soluções acessíveis. No entanto, ainda existe uma série de barreiras, como financiamento público, dependência de insumos importados, validação clínica e infraestrutura hospitalar integrada à pesquisa. Os dados podem ser analisados no gráfico 2.

Gráfico 2 – Número de publicações por país.

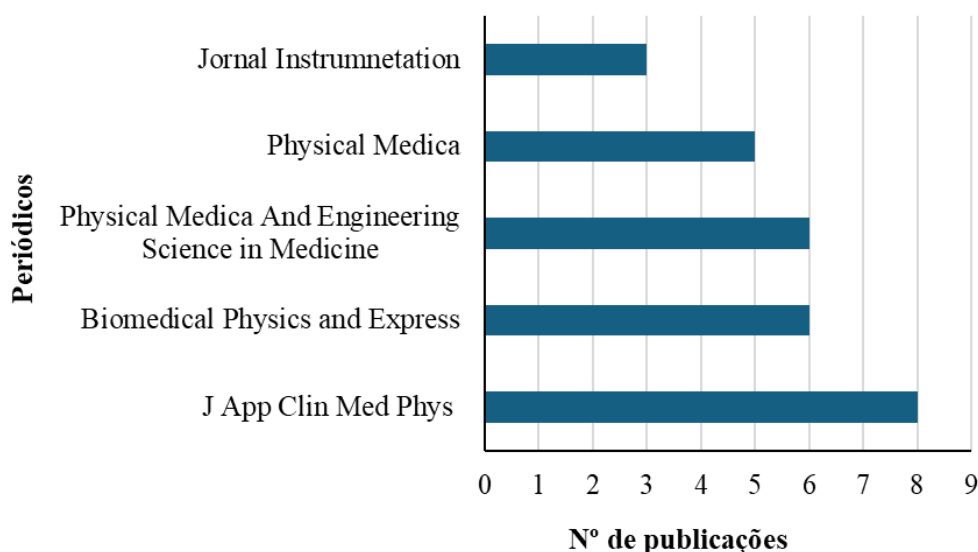


Fonte: Autora, 2025.

3.1.1.3 DISTRIBUIÇÃO POR PERIÓDICO

Os periódicos mais recorrentes foram o *Jornal of Applied Clinical Medical Physics*, *Biomedical Physics & Engineering Express* e *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, conforme o gráfico 3. Esses periódicos são acessíveis a autores de diferentes países, tem acesso open access ou híbrido, facilitando a visibilidade global dos artigos e valorizam pesquisas colaborativas e metodologias que podem ser reproduzíveis. Todos eles publicam estudos que conectam física aplicada à medicina, engenharia biomédica e tecnologias em desenvolvimento. Priorizam estudos com validação prática em ambiente hospitalar, testes de precisão dosimétrica, avaliações que usem pacientes reais, phantoms ou modelos computacionais.

Gráfico 3- Top 5 periódicos com seus respectivos números de publicações.



Fonte: Autora, 2025.

3.1.2 ANÁLISE NO VOSVIEWER

Através do VOSviewer, foram realizadas duas análises: coautoria de autores e coocorrência de palavras-chave.

3.1.2.1 ANÁLISE DE COAUTORIA DE AUTORES

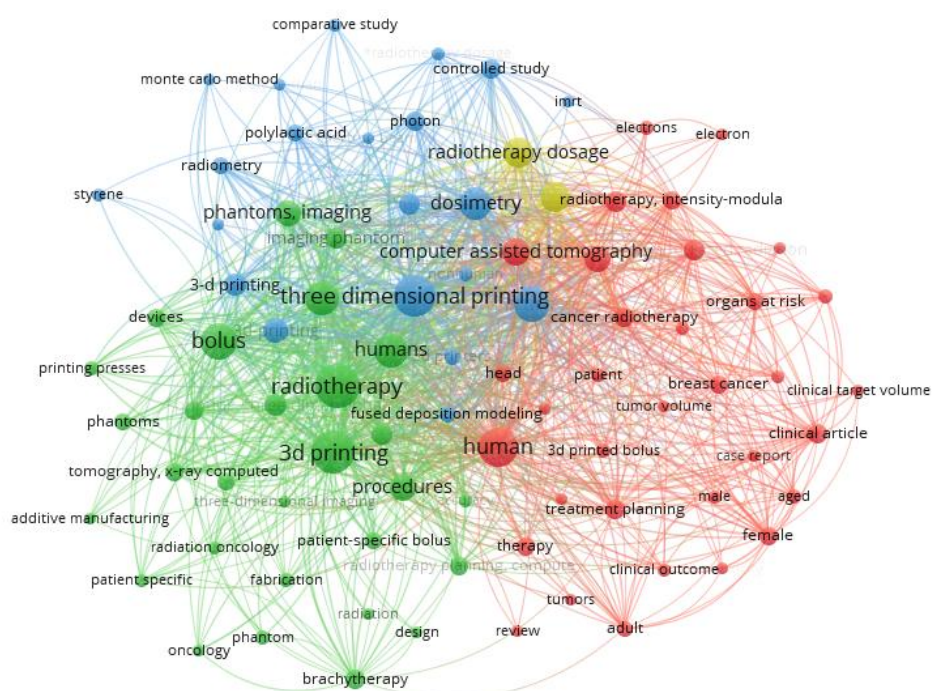
A análise de coautoria revelou 103 autores únicos, conforme mapa gerado pelo VOSviewer e representado na figura 1. Cada nó (esfera colorida) representa um autor, a proximidade desses nós representa colaboração em publicações e as cores indicam cluster de colaboração, ou seja, grupo de autores que publicam juntos com frequência. O tamanho do nome e da esfera indica o número de publicações ou citações. Os principais núcleos colaborativos estão representados por respectivos clusters identificados por cor: cluster verde (liderado por Wang, J. e Wang, X) de origem chinesa, demonstra ser um grupo ativo em desenvolvimento e avaliação de bolus com materiais modificados, além de participarem de estudos com modelagem CAD, impressão 3D e simulações clínicas. Autores como Li, D. e Ciobanu, A.C. também fazem parte do cluster; cluster vermelho (Dubrowski P. e Liu, X.), de origem canadense e polonesa, desenvolvem pesquisa em ciências médicas aplicadas, simulações com phantoms e treinamentos clínicos; cluster azul (Albantow C.E e Cao, Z.) de origem do Reino Unido, desenvolvem trabalhos aplicados em ambiente clínico, voltados a implementação do bolus personalizados em protocolos hospitalares; cluster roxo (liderado por Bewley Arnaud F. e Adell-Gomez, N.) de origem nos Estados Unidos, estão ligados a pesquisa sobre validação clínica e aplicação em radioterapia de cabeça e pescoço e possuem alta integração com centros clínicos; clusters laranja (Kim, S. e Liu, X), originados da Coreia do Sul, desenvolvem estudos clínicos com ênfase na anatomia facial e adaptação anatômica do *bolus*, com foco em ajuste fino, redução de espaços de ar e conforto do paciente; cluster amarelo (Beltran, Chris, J. Cullen, A), de origem EUA, possuem atuação voltada à instrumentação médica e controle de qualidade em radioterapia. O resumo que demonstra as temáticas dos estudos considerando os respectivos coautores, encontra-se na tabela 2.

centralidade) são: *three dimensional printing, radiotherapy, bolus, human, 3D printing, dosimetry, computer assisted tomography, patient-specific bolus*. As palavras representam os eixos temáticos centrais, evidenciando as conexões entre tecnologia de impressão 3D, aplicação clínica em radioterapia e personalização de *bolus*. As palavras-chave estão distribuídas por 4 cluster identificados por cor. O cluster da cor vermelha (1), foca na aplicação clínica dos *bolus* personalizados, está centrado em doenças específicas (como câncer de mama), órgãos de risco (OARs) e resultados clínicos, reforçando a relevância translacional das tecnologias. O cluster da cor verde (2) representa o núcleo tecnológico da pesquisa, com foco em técnicas de impressão 3D, personalização de dispositivos médicos e materiais (como PLA), reforçando o papel da engenharia biomédica e da inovação na área. Os cluster da cor azul (3), representa o quantitativo e experimental com foco em modelos de avaliação da dose, simulação de tecidos (phantoms), e materiais de estudo físico relacionado à validação técnica dos dispositivos 3D. Cluster de cor amarela (4), une planejamento terapêutico com imagem médica, mostrando o uso da tomografia computadorizada para a construção de modelos personalizados e técnicas como Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT) para ajuste de dose.

Figura 2. Mapa de palavras-chave com mínimo de 5 recorrências.

Fonte:
2025.

O
palavras-
mostra uma
temática



Autora,

mapa de
chave
rede
rica e

multidisciplinar com forte correlação entre tecnologia, aplicação clínica e validação experimental. As palavras mais recorrentes revelam que a impressão 3D está tecnologicamente avançada; focada em aplicação clínica personalizada; sustentada por validação técnica rigorosa. Na tabela 3, segue uma síntese das palavras-chave mais recorrentes e suas respectivas justificativas, evidenciando os motivos de sua presença destacada na literatura científica analisada.

Tabela 3 – Razões para a recorrência das palavras-chave.

Palavra-chave	Justificativa da recorrência
<i>three dimensional printing / 3d printing</i>	Base tecnológica central da linha de pesquisa, usada para criar <i>bolus</i> personalizados.

<i>radiotherapy</i>	Campo clínico de aplicação — todos os estudos se voltam à melhora da entrega da dose.
<i>bolus</i>	Dispositivo médico central da investigação.
<i>human</i>	Indica foco em aplicações clínicas reais, com pacientes.
<i>dosimetry</i>	Necessária para validar o desempenho do <i>bolus</i> personalizado
<i>Phantom/imaging</i>	Usados em testes laboratoriais antes da aplicação clínica.
<i>patient-specific bolus</i>	Tendência crescente de personalização para melhor adaptação anatômica.

Fonte: Autora, 2025.

4 CONCLUSÃO

Com base na análise bibliométrica realizada, observou-se um crescimento significativo de publicações sobre o uso da impressão 3D na confecção de *bolus* personalizados para radioterapia entre os anos de 2020 e 2025, com destaque para os anos de 2023 e 2024. Os estudos mais frequentes concentram-se na caracterização dosimétrica de materiais poliméricos convencionais, como PLA, ABS e TPU, bem como na avaliação da viabilidade técnica da impressão e adaptação anatômica dos *bolus*. A maior parte das publicações apresenta um enfoque técnico ou exploratório, com validação restrita a simulações ou testes com *phantoms*, e poucas investigações com aplicação clínica direta.

Apesar da diversidade de pesquisas sobre impressão 3D aplicada à radioterapia, identificou-se uma expressiva escassez de estudos voltados ao uso de filamentos plásticos com carga metálica na fabricação de *bolus*. Apenas o estudo de Ehler *et al.* (2020) foi encontrado tratando especificamente de um material composto de cobre-plástico com essa finalidade, o que revela uma lacuna relevante no avanço tecnológico da área. Os filamentos metálicos, por sua maior densidade e capacidade de atenuação, representam uma alternativa promissora para a criação de *bolus* mais finos e eficazes, especialmente em regiões anatômicas com espaço reduzido.

Entre as principais limitações dos estudos analisados estão a predominância de abordagens sem validação clínica robusta, a ausência de padronização nos processos de impressão e avaliação dos materiais, a baixa diversidade de filamentos explorados e a escassez de ensaios clínicos controlados. Também se destacam barreiras técnicas e logísticas, como o controle de espessura, adaptação anatômica e qualidade da impressão.

Diante desses achados, as perspectivas futuras incluem o desenvolvimento de pesquisas que explorem novos materiais, especialmente os filamentos com carga metálica, a padronização de métodos de fabricação e avaliação dos *bolus*, e a realização de estudos clínicos que comprovem os benefícios reais dessas tecnologias em ambientes hospitalares. A colaboração entre centros de pesquisa, serviços de radioterapia e indústria pode acelerar a transição dessas inovações para a prática clínica.

O impacto clínico da adoção de *bolus* personalizados impressos em 3D, especialmente com materiais avançados, é significativo. Essa tecnologia pode proporcionar melhor adaptação ao corpo do paciente, maior precisão na entrega da dose e mais conforto durante o tratamento, contribuindo para a eficácia terapêutica e a qualidade de vida. No contexto brasileiro, embora existam iniciativas focadas em materiais de baixo custo, ainda há desafios estruturais e científicos a serem superados.



Avançar nessa direção permitirá não apenas modernizar os serviços de radioterapia, mas também tornar tratamentos personalizados mais acessíveis dentro da realidade do Sistema Único de Saúde (SUS).

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal da Bahia (IFBA), Campus Salvador e ao Colegiado do Mestrado em Engenharia de Sistemas e Produtos (PPGESP/IFBA)

REFERENCIAS

ANON. (1987). ICRU report, 1976--1980. **International Commission on Radiation Units and Measurements**. BASAULA D, HAY B, WRIGHT M, HALL L, EASDON A, MCWIGGAN P, YEO A, UNGUREANU E, KRON T.

CHENG Y, PENG H, JIN F, MA X. **Advances in 3D Printing Technology for Bolus in Radiation Therapy**. Zhongguo Yi Liao Qi Xie Za Zhi. 2025 Mar 30;49(2):154-160. Chinese. doi: 10.12455/j.issn.1671-7104.240410. PMID: 40246716.

DIAZ-MERCHAN JA, ESPAÑOL-CASTRO C, MARTINEZ-OVALLE SA, VEGA-CARRILLO HR. **Bolus 3D printing for radiotherapy with conventional PLA, ABS and TPU filaments: Theoretical-experimental study**. Appl Radiat Isot. 2023 Sep; 199:110908. doi: 10.1016/j.apradiso.2023.110908. Epub 2023 Jun 22. PMID: 37385052.

EHLER, ERIC D. et al. **3D printed copper-plastic composite material for use as a radiotherapy bolus**. Physica Medica: European Journal of Medical Physics, Volume 76, 202 – 206.

FATIH et al. **Characterization of 3D-printed bolus produced at different printing parameters**. Biltekin.Medical Dosimetry, Volume 46, Issue 2, 157 – 163.

JUNG KH, HAN DH, LEE KY, KIM JO, AHN WS, BAEK CH. **Evaluating the performance of thermoplastic 3D bolus used in radiation therapy**. Appl Radiat Isot. 2024 Jul; 209:111329. doi: 10.1016/j.apradiso.2024.111329. Epub 2024 Apr 24. PMID: 38701594.

LU, Y. et al. 3D Printing Polymer-based Bolus Used for Radiotherapy. **Int J Bioprint**. v.7, n. 4, pag.414. DOI: 10.18063/ijb.v7i4.414. 2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8600301/> Acesso em: 20 de junho de 2025.

SPEZZIA, Sérgio. O uso do bolus na radioterapia. Revista da Faculdade de Ciências Médicas de Sorocaba, v. 18, n. 4, p. 183-186. 2016. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/RFCMS/article/view/23688>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

VYAS, V. et al. **On Bolus for Megavoltage Photon and Electron Radiation Therapy**. Med Dosim, v. 38, n. 3, pag. 268-273. DOI:10.1016/j.meddos.2013.02.007. 2013.