



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS CENTRO CIÊNCIAS DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ODONTOLOGIA
CURSO ODONTOLOGIA

Tatiana Jesse Fontes de Oliveira

**ANÁLISE DOS FILAMENTOS PARA IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL (3D):
AVALIAÇÃO DAS UNIDADES HOUNSFIELD**

Florianópolis

2026

Tatiana Jesse Fontes de Oliveira

**ANÁLISE DOS FILAMENTOS PARA IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL (3D):
AVALIAÇÃO DAS UNIDADES HOUNSFIELD**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Odontologia do Centro de Ciências da Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Odontologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Armini Caldas

Coorientador: Me. João Victor Cunha Cordeiro.

Florianópolis

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Jesse Fontes de Oliveira, Tatiana

ANÁLISE DOS FILAMENTOS PARA IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL
(3D): :AVALIAÇÃO DAS UNIDADES HOUNSFIELD /Tatiana Jesse
Fontes de Oliveira ; orientador, Ricardo Armini Caldas,
coorientador, João Victor Cunha Cordeiro, 2026.
36 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
da Saúde, Graduação em Odontologia, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Odontologia. 2. Impressão Tridimensional. 3.
Radioterapia. I. Armini Caldas, Ricardo. II. Cunha
Cordeiro, João Victor . III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Odontologia. IV. Título.

Tatiana Jesse Fontes de Oliveira

**ANÁLISE DOS FILAMENTOS PARA IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL (3D): AVALIAÇÃO
DAS UNIDADES HOUNSFIELD**

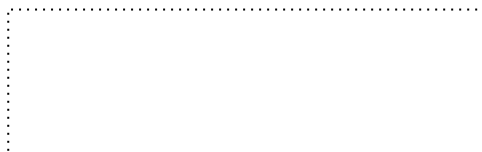
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Cirurgiã Dentista e aprovado em sua forma final pelo Curso Odontologia.

Local modalidade remota, 06 de 05 de 2026.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



Prof. Dr. Ricardo Armini Caldas

Orientador(a)



Dra. Prof. Dra Lauren Oliveira Lima Bohner

Instituição UFSC



Dr.(a) Dr. Maurício Malheiros Badaró

Instituição UFSC

Florianópolis, 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, de forma especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Armini Caldas, pela orientação segura, dedicação e valiosas contribuições ao longo deste trabalho. Ao meu coorientador, Me. João Victor Cunha Cordeiro, expresso minha sincera gratidão pelo apoio, disponibilidade e incentivo constante, fundamentais para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Agradeço também aos membros da banca examinadora por terem aceitado o convite e pela disponibilidade em contribuir com a avaliação deste trabalho. Aos meus amigos, pelo apoio, incentivo e companheirismo ao longo dessa jornada. À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor, compreensão e suporte incondicional em todos os momentos, sendo essenciais para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

O bolus é um dispositivo colocado sobre a pele durante a radioterapia para superficializar a dose irradiada. Tradicionalmente, é confeccionado em cera; no entanto, esse processo pode ser digitalizado por meio da impressão tridimensional (3D). A metodologia foi estabelecida para investigar a viabilidade de diferentes filamentos para impressoras 3D, com fácil acesso no mercado nacional, para aplicação hospitalar em radioterapia. A análise dos filamentos foi conduzida com base nos valores das Unidades Hounsfield (HU) obtidos a partir de amostras produzidas por impressoras de Fused Deposition Modeling (FDM). Foram avaliados 16 filamentos de impressão 3D, compostos por ABS, PLA e PETG para avaliar a viabilidade de uso em tratamento radioterápico. Como resultados os filamentos de ABS apresentaram valores negativos de HU, variando de -63,8 (ABS MG Preto) a -142 (ABS Ebony. O PLA mostrou maior variação, com valores entre -183 (PLA Neutro) e +469 (PLA Madeira). Destaca-se o PLA Branco Dental, com valor de 8,5 HU, próximo de zero, e baixa variação (12,5 HU), indicando maior consistência dos resultados. O PETG apresentou a menor variação nos valores de HU entre os filamentos analisados (3,5 HU), sugerindo maior estabilidade frente à RI. Em relação ao custo, o filamento ABS Natural Marfim foi o mais acessível (R\$ 59,00/kg), enquanto o PLA Verde Militar apresentou o maior valor (R\$ 125,36/kg). Podemos concluir que apesar da necessidade de investimento em infraestrutura, a confecção de bolus por impressão 3D apresenta menor custo em comparação ao método tradicional em cera. Além disso, essa técnica reduz o tempo de trabalho ativo e a variabilidade do processo manual, contribuindo diretamente para maior precisão no tratamento radioterápico.

Palavras-chave: Materiais biocompatíveis; Impressão Tridimensional; Terapia complementar; Radioterapia.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

RT Radioterapia

RI Radiação Ionizante

PLA Ácido Polilático

ABS Acrilonitrilo Butadieno Estireno

PETG Polietileno Tereftalato Glicol

3D Tridimensional

TC Tomografia Computadorizada

HU Unidades Hounsfield

FDM *Fused Deposition Modeling*

STL *Standard Triangle Language*

DICOM *Digital Imaging and Communications in Medicine*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	11
2.1	RADIOTERAPIA.....	11
2.2	BOLUS RADIOTERÁPICO.....	11
2.3	BOLUS PERSONALIZADOS.....	12
2.4	IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL NA PRODUÇÃO DE BOLUS	13
2.5	VALORES DE UNIDADES HOUNSFIELD (HU)	14
3	JUSTIFICATIVA	15
4	OBJETIVOS	16
4.1	OBJETIVOS GERAL.....	16
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
5	METODOLOGIA.....	17
5.1	CONFEÇÃO DAS AMOSTRAS	17
5.2	PROTOCOLO DE CALIBRAÇÃO DA IMPRESSORA FDM	18
5.3	VALORES DE HU	21
6	RESULTADOS	23
7	DISCUSSÃO	26
8	CONCLUSÃO.....	29
	REFERÊNCIAS.....	30
	ANEXO A – ATA DE APRESENTAÇÃO.....	36

1 INTRODUÇÃO

A radioterapia (RT) faz parte do tratamento de cerca de metade dos pacientes com câncer, podendo ser utilizada tanto sozinha quanto em conjunto com outros procedimentos, como a cirurgia (Olivares-Urbano et al., 2020). O tratamento de RT baseia-se na interação da radiação ionizante (RI) com os tecidos biológicos, induzindo a morte celular por consequência de contato direto ou indireto com a RI (Daguenet et al., 2020). Justamente por ser uma abordagem tão importante, é fundamental entender em detalhes como essa radiação age no organismo para que possamos tornar os tratamentos cada vez mais eficazes (Prasanna et al., 2012).

Os tecidos biológicos podem ser classificados de acordo com sua densidade, o que é importante para diferenciar o coeficiente de absorção da RI entre eles. Por meio desses dados torna-se mais previsível a distribuição da RI, ao mesmo tempo em que se reduz a exposição desnecessária dos tecidos sadios por aumentar a precisão dosimétrica (Hounsfield, 1973). Quando a RI penetra no corpo, a dose absorvida pelos tecidos não é mais alta logo na superfície devido ao efeito de preservação da pele. Esse efeito acarreta que a dose da RI é menor na superfície da pele, aumentando progressivamente o acúmulo da dose até atingir a dose máxima. A região entre a superfície irradiada e a profundidade em que a dose atinge o valor máximo é chamada de região de *build-up* (acúmulo) (Y. Khan et al., 2013).

Em situações em que há necessidade de aumentar a dose de radiação na superfície, recomenda-se o uso de bolus (Dipasquale et al., 2018). Esse recurso tem como objetivo elevar a dose nos tecidos superficiais, principalmente em áreas anatômicas com contornos irregulares (Huang et al., 2021). Para reduzir a exposição desnecessária de órgãos de risco e os efeitos colaterais da RT, o bolus deve adaptar-se a anatomia a ser irradiada, não seja tóxico e seja acessível à instituição hospitalar (Robar et al., 2018). Esse dispositivo pode ser produzido com materiais convencionais, como gaze úmida e cera ou personalizados por meio da impressão tridimensional (3D) com filamentos como o ácido polilático (PLA) e o acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) (Zhao et al., 2017).

A confecção dos bolus convencionais é, muitas vezes, desconfortável para o paciente, uma vez que pode exigir a manipulação de áreas sensíveis. Assim, o uso da tecnologia de escaneamento de superfície 3D para reprodução da área anatômica permite otimizar o tratamento, proporcionado maior conforto ao paciente (Sasaki et al., 2019). As principais vantagens da impressão 3D na confecção dos bolus incluem a facilidade de produção, maior

precisão e menor tempo de trabalho dos profissionais, uma vez que dispensa a moldagem anatômica (Rooney et al., 2020). Além disso, a má adaptação do bolus à pele do paciente levar a formação de espaços de ar, os quais podem reduzir a homogeneidade da dose superficial de RI, fazendo com que a dose planejada pela equipe médica não seja efetivamente administrada na região alvo (Lu et al., 2021).

O material ideal para confecção de bolus deve apresentar propriedades semelhantes às da água, a fim de reproduzir o comportamento dos tecidos biológicos frente à RI. No entanto, o comportamento dos filamentos de impressão 3D ainda é pouco documentado, o que limita sua aplicação na RT (Burleson et al., 2015). As imagens para sua produção do bolus, de acordo com a anatomia do paciente, podem ser obtidas por tomografia computadorizada (TC) e, mais recentemente, por escaneamento de superfície (Kharfi et al., 2024). Entretanto, torna-se necessário ampliar a base de dados clínicos de bolus confeccionados por impressão 3D, com o objetivo de documentar a interação desses filamentos com a RI, viabilizando, a longo prazo, sua reprodução e aplicação na prática clínica da RT (Liu et al., 2025).

Um dos métodos utilizados para avaliar a distribuição da RI é por meio das Unidades Hounsfield (HU), que fornecem uma estimativa da densidade e do comportamento da radiação nos tecidos. Esses valores são obtidos por meio da TC tomógrafo *fan beam*, que permite sua coleta e análise (Saito et al., 2025). Nesse contexto, a análise por meio das Unidades Hounsfield (HU) apresenta grande variabilidade entre filamentos. A comparação dos dados obtidos a partir dos valores de HU, da espessura, do preenchimento e da adaptação aos contornos anatômicos do paciente permite avaliar a reprodutibilidade dos resultados com o objetivo de viabilizar sua implementação efetiva na prática clínica e obter benefícios consistentes no sucesso da RT (Fonseca et al., 2023).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Radioterapia

A radioterapia (RT) é uma modalidade fundamental no tratamento de diversas neoplasias, podendo ser utilizada de forma isolada ou associada a outras abordagens, como a quimioterapia. No entanto, devido à ação da RI, podem ocorrer efeitos colaterais, como fadiga, mucosite, úlceras, inflamação aguda e orofagite, que podem se manifestar tanto localmente quanto à distância da área irradiada (Dilalla et al., 2020). Para minimizar esses efeitos colaterais muitas vezes o tratamento da neoplasia envolve várias modalidades de tratamento como: cirurgia, quimioterapia se modo combinado ou isolado (Kaur et al., 2023).

A RT depende de diversas variáveis físicas, como as propriedades do feixe, a energia utilizada, o campo de irradiação, a distância entre o cabeçote e a pele, o ângulo de incidência da radiação, o equipamento radiológico empregado e a interação de elétrons com os tecidos biológicos. Esses fatores determinam a dose, sua distribuição e a região em que a RI será depositada no tecido biológico (Boman et al., 2018). Além disso, para a implementação da impressão 3D em ambiente hospitalar, é necessário considerar não apenas os benefícios no tratamento radioterápico, mas também o desenvolvimento de protocolos que garantam a segurança dos profissionais responsáveis pela operação dos equipamentos (Stephens et al., 2013).

Uma das limitações no tratamento de neoplasias superficiais com RT é o efeito de preservação da pele, que desloca a dose máxima de radiação para camadas mais profundas, fazendo com que a região superficial receba uma dose inferior à necessária (Zhang et al., 2023). Nesse contexto, o efeito bolus torna-se uma estratégia importante, pois promove o aumento da dose de radiação na superfície, sendo especialmente indicado nesses casos. Sua utilização permite concentrar a dose máxima na região-alvo e, ao mesmo tempo, reduzir a exposição de tecidos mais profundos que devem ser preservados. Dessa forma, o uso do bolus contribui para aproximar a região de maior deposição de dose da RI na superfície, favorecendo uma abordagem terapêutica mais eficaz e segura (Luu et al., 2015).

2.2 Bolus Radioterápico

Na prática clínica da RT, o bolus atua como um modulador da RI, deslocando a região de dose máxima para a superfície da pele. Para que seja efetivo, o material deve apresentar propriedades semelhantes às do tecido biológico a ser mimetizado, além de ser biocompatível

(Keiper et al., 2023). Do ponto de vista físico, o dispositivo deve ser equivalente ao tecido biológico, maleável o suficiente para se adaptar aos contornos anatômicos, além de apresentar durabilidade, baixo custo e estabilidade ao longo das sessões de tratamento. Como vantagem, os bolus personalizados apresentam maior reprodutibilidade em comparação aos modelos comerciais ou confeccionados manualmente, contribuindo para maior consistência e confiabilidade no planejamento radioterápico (Canters et al., 2016)

Os bolus podem ser confeccionados com diferentes materiais, como gaze úmida, cera, gel, algodão umedecido, versões comerciais ou por meio de impressão por manufatura aditiva. O material utilizado influencia diretamente na distribuição e na homogeneidade da dose de radiação, fatores essenciais para o sucesso do tratamento (Verma et al., 2019). Além disso, a adaptação do dispositivo à superfície da pele deve ser adequada, assim como sua biocompatibilidade e conforto para o paciente. Outro aspecto importante é a possibilidade de reprodução do bolus pela equipe de saúde de forma simples, segura e com materiais atóxicos, garantindo proteção tanto para o paciente quanto para os profissionais envolvidos (Park & Yea, 2016)

2.3 Bolus Personalizados

Diante dessas exigências relacionadas à adaptação, precisão e reprodutibilidade dos dispositivos, o uso de bolus personalizados tem se destacado na RT. Nesse contexto, esses dispositivos apresentam melhor adaptação à anatomia do paciente, contribuindo para uma aplicação mais precisa da radiação. Estudos que compararam bolus individualizados produzidos por impressão 3D indicaram melhora na precisão do tratamento (Li et al., 2025). Como efeito adicional, esses dispositivos podem ser armazenados em formato digital, permitindo sua reprodução de forma mais simples e padronizada, o que favorece sua aplicação na prática clínica (Chatchumnan et al., 2022)

Na prática clínica da RT, o bolus atua como um modulador da RI, promovendo o deslocamento da região de dose máxima para a superfície da pele. Para que seja efetivo, é fundamental que o material apresente propriedades semelhantes às do tecido biológico a ser mimetizado, além de ser biocompatível (Gonzalez-Perez et al., 2022). Os bolus personalizados apresentam maior reprodutibilidade em comparação aos modelos, contribuindo para maior padronização, confiabilidade no planejamento radioterápico e reduzindo os espaços de ar. Reduzir esses espaços entre a pele é fundamental, visto que esse acúmulo de ar impacta

diretamente na distribuição e homogeneidade da RI na superfície da pele, por deslocar a dose máxima para áreas mais profundas (Gugliandolo et al., 2024).

2.4 Impressão tridimensional na Produção de Bolus

Os bolus comerciais são produzidos em formatos padronizados, o que pode dificultar sua adaptação à anatomia do paciente e favorecer a formação de espaços de ar entre o dispositivo e a pele. Essa falta de adaptação pode comprometer a distribuição da dose e resultar em exposição desnecessária de RI aos tecidos adjacentes à região tumoral. (Pollmann et al., 2022). Como solução, a impressão 3D permite a construção de objetos camada por camada, utilizando materiais termoplásticos. Nesse processo, os dispositivos são projetados digitalmente a partir de imagens de tomografia computadorizada *fan beam* (TC) ou ressonância magnética, possibilitando a conversão desses dados em estruturas físicas. Como resultado, obtêm-se dispositivos com maior capacidade de adaptação às características anatômicas do paciente (Yu et al., 2025).

A melhor adaptação dos bolus personalizados aos contornos anatômicos do paciente está associada a benefícios clínicos relevantes. Estudos clínicos sobre seu uso na RT de câncer de mama pós-mastectomia demonstraram redução significativa da dose irradiada em órgãos como pulmão e coração quando o bolus permanece bem adaptado (Y. Zhang et al., 2022). A presença de pequenos espaços de ar entre o bolus e a pele representa um problema relevante, pois pode resultar em distribuição heterogênea da dose, comprometendo a previsibilidade do planejamento radioterápico. Como efeito, estudos indicam que lacunas de aproximadamente 1 cm podem reduzir em até 10% a dose na superfície em feixes de 6 MV, evidenciando o impacto clínico dessa inadequação (Pugh et al., 2017).

Diante da necessidade de produzir dispositivos personalizados com maior precisão e melhor adaptação anatômica, técnicas de manufatura aditiva têm sido cada vez mais exploradas. Nesse contexto, a *Fused Deposition Modeling* (FDM) destaca-se como uma das principais tecnologias, caracterizada pela construção do objeto final camada por camada a partir de materiais termoplásticos. Como resultado, essa técnica apresenta vantagens como a possibilidade de produzir diferentes conformações geométricas, baixo custo, rapidez de confecção e boa precisão (Jreije et al., 2023a).

A densidade adequada de preenchimento das amostras utilizadas na confecção de bolus é um fator crítico, uma vez que baixas densidades de preenchimento, especialmente em

filamentos como ABS e ácido polilático PLA, podem resultar em menor homogeneidade interna, comprometendo a segurança do uso clínico na RT (Ricotti et al., 2017). Como solução, a utilização de bolus produzidos por impressão 3D permite o controle do preenchimento das amostras, possibilitando ajustar a profundidade de deposição da dose de radiação, seja de forma mais superficial ou mais profunda, conforme a necessidade do tratamento. Nesse contexto, os valores de Unidades HU são utilizados para estimar a densidade dos materiais e auxiliar na definição de sua aplicação clínica (Ricotti et al., 2016).

2.5 Valores de Unidades Hounsfield (HU)

Para viabilizar esse controle de forma objetiva, utilizam-se os valores de Unidades Hounsfield (HU), que medem a densidade radiológica e classificam os materiais com base na absorção e atenuação dos feixes de raio-X. Por convenção, a água destilada foi estabelecida com valor de zero HU, servindo como referência para outros materiais (S. N. Khan et al., 2014). De modo ideal, o material usado para a confecção do bolus deve apresentar valores de HU próximo a 0, entretanto é aceitável valores de HU aceitáveis entre -120 e 300 (Stowe et al., 2014).

No entanto, a aplicação clínica desses valores não depende de um padrão fixo, mas da adequação ao caso específico. Não existe um valor de HU ideal na confecção dos bolus; em vez disso, há valores que atendem às necessidades de cada situação clínica. Estudos anteriores mostraram que a mesma formulação de PLA, de diferentes fabricantes, pode apresentar ampla variação nos valores de HU, oscilando entre -51 e 221 HU (Brown et al., 2022). Dessa forma, o conhecimento dessas propriedades torna-se especialmente relevante no tratamento de neoplasias em regiões sensíveis, como cabeça e pescoço, onde a precisão da RT é fundamental. Nesse cenário, a aplicação do efeito bolus se destaca por permitir melhor controle da dose na região superficial (Barajas-Lopez et al., 2024).

3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo avaliar os valores de Unidades HU de filamentos utilizados em manufatura aditiva por impressoras FDM, utilizando TC para coleta e análise dos dados, a fim de verificar sua viabilidade no tratamento RT. Os filamentos analisados são de fácil acesso no mercado nacional e apresentam potencial de aplicação em ambiente hospitalar. A análise dos valores de HU busca gerar dados objetivos e reprodutíveis, permitindo a catalogação e classificação dos materiais conforme diferentes necessidades clínicas, com o objetivo de aumentar a segurança na escolha dos filamentos e na elaboração do plano de tratamento. Além disso, essa tecnologia pode contribuir para maior precisão terapêutica, redução de custos e diminuição do tempo de trabalho manual.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivos geral

Avaliar a viabilidade de filamentos para impressoras FDM e catalogar seus respectivos valores de HU, com o objetivo de viabilizar a aplicação da impressão 3D no serviço de RT.

4.2 Objetivos específicos

- . Avaliar os valores de HU do bloco de PLA.
- . Avaliar os valores de HU do bloco de ABS.
- . Avaliar os valores de HU do bloco de PETG.
- . Definir e padronizar os parâmetros de impressão (temperatura e fluxo de extrusão) em impressora FDM, visando obter amostras com superfície homogênea para todos os filamentos analisados.

5 METODOLOGIA

Foram produzidos blocos por impressão 3D com diferentes materiais disponíveis em fácil acesso no mercado nacional, com variedades de materiais e cores como descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação dos filamentos de impressão 3D usados no trabalho com fabricantes.

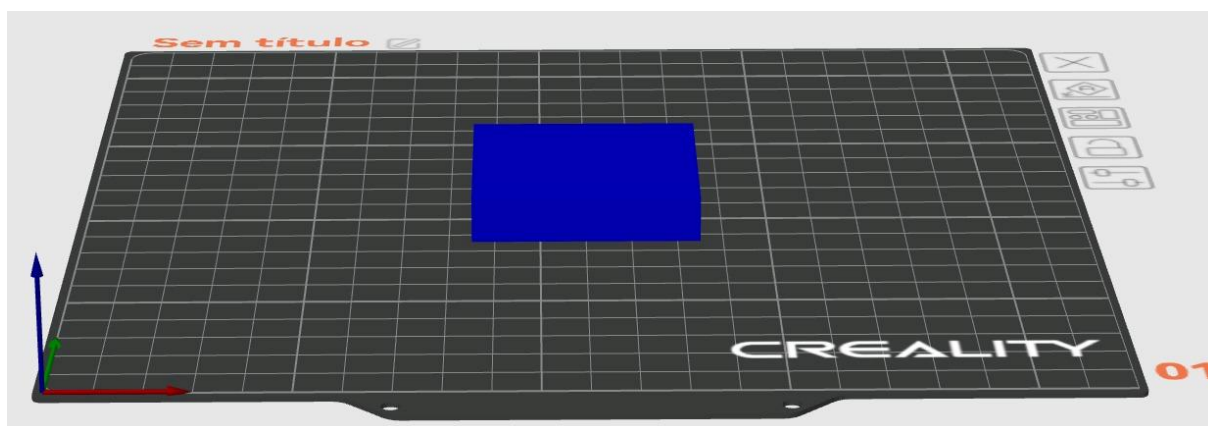
Material	Cor	Fabricante
PLA	Verde militar	3D Fila, Belo Horizonte, Brasil
	Neutro	
	Mármore	
	Branco	
	Madeira	
PLA HT	Transparente	
	Branco	
	Preto	
PETG	Azul	
	Branco	
ABS	Natural Marfin	
	Preto	
	Branco	
	Natural	
	Preto Ebony	

Fonte: elaborado pelos autores.

5.1 Confeção das amostras

Os blocos foram impressos com dimensões de $5 \times 5 \times 1$ cm, preenchimento de 100% e padrão retilinear. O planejamento digital foi realizado no *software* Autodesk Fusion 360 (Autodesk, São Rafael, Califórnia, Estados Unidos). Em seguida, os arquivos foram exportados no formato *Standard Triangle Language* (STL) e importados para o *software* de fatiamento OrcaSlicer (Softfever, Singapura, Singapura). Após a finalização do modelo digital, os blocos foram impressos em uma impressora 3D FDM (Ender 3 V2, Creality 3D Technology, Shenzhen, China).

Figura 1 – Confeção do bloco disposto no OrcaSlicer



Fonte: OrcaSlicer

5.2 Protocolo de calibração da impressora FDM

O protocolo de calibração foi dividido em duas etapas. A primeira consistiu na definição da temperatura de extrusão para a impressão dos blocos retangulares. A segunda etapa teve como objetivo a seleção e padronização do fluxo de extrusão ideal, a fim de obter amostras com superfície homogênea. Todos os materiais utilizados no estudo, apresentados na Tabela 1, foram submetidos aos mesmos testes.

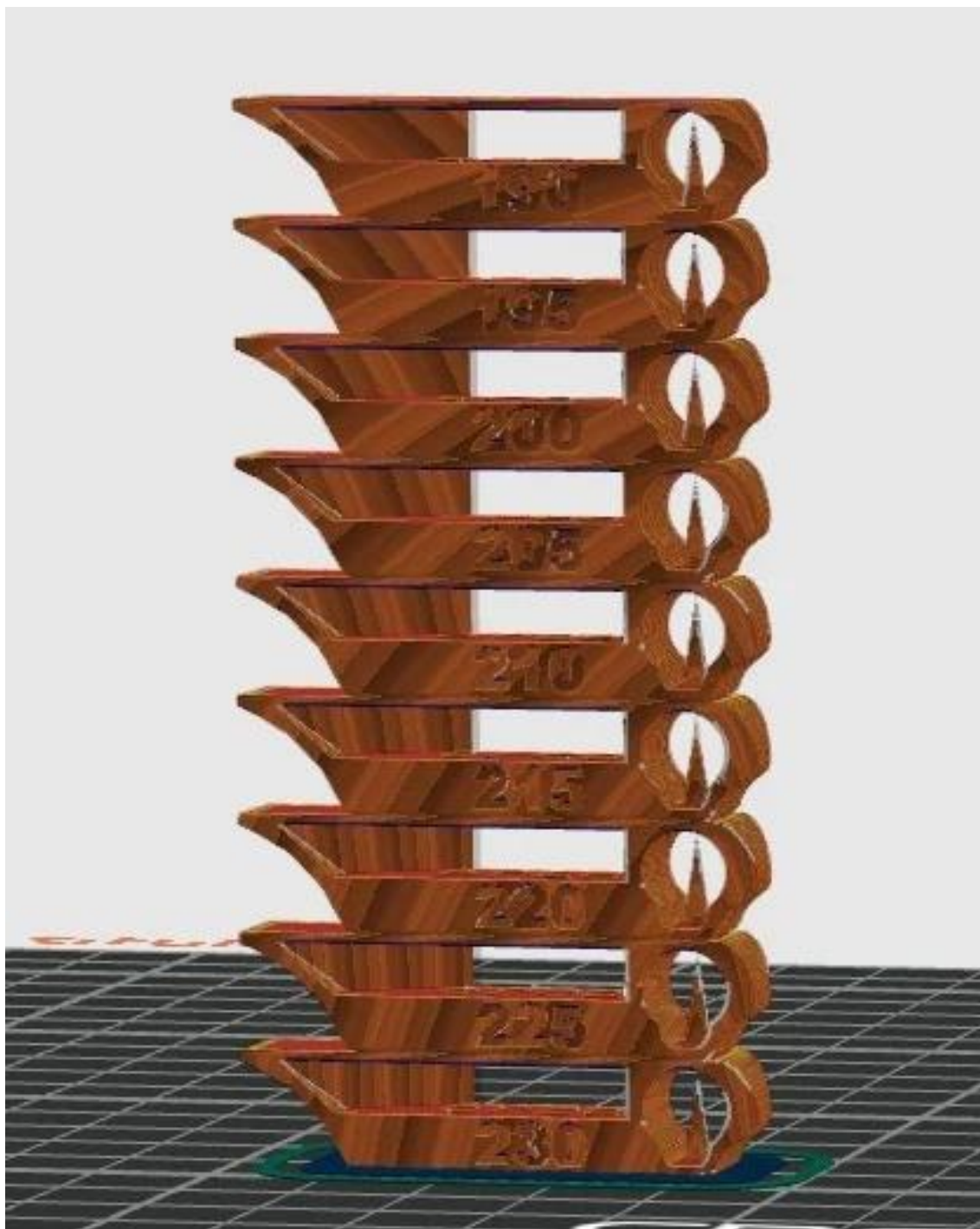
Na primeira etapa, foi realizada a calibração da temperatura de extrusão por meio da impressão de uma torre de temperatura. A faixa de temperatura que apresentou maior homogeneidade foi selecionada para cada tipo de filamento, sendo posteriormente utilizada na impressão dos blocos. Os intervalos de temperatura na torre foram de 5 °C entre cada seção. As faixas analisadas foram de 180 °C a 220 °C para o PLA, de 225 °C a 260 °C para o ABS e de 225 °C a 255 °C para o PETG.

Tabela 2 - Relação dos filamentos de impressão 3D usados no trabalho com sua escala de temperatura.

Material	Temperatura °C
PLA	180 - 220
PETG	225 - 260
ABS	225 - 255

Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 2 – Torre de Temperatura: primeira etapa.



Fonte: OrcaSlicer

Na segunda etapa, o fluxo de extrusão foi definido em duas fases. Inicialmente, utilizou-se o fluxo padrão estabelecido pelo *software* Orca Slicer para cada filamento. Com esse valor, foram impressas placas, sendo selecionada por inspeção visual, a amostra mais

homogênea. Em seguida, o valor de fluxo correspondente a essa amostra foi inserido na fórmula descrita a seguir, permitindo o ajuste e a definição final do fluxo de extrusão.

Figura 3 - Relação da primeira etapa da escolha do fluxo de extrusão

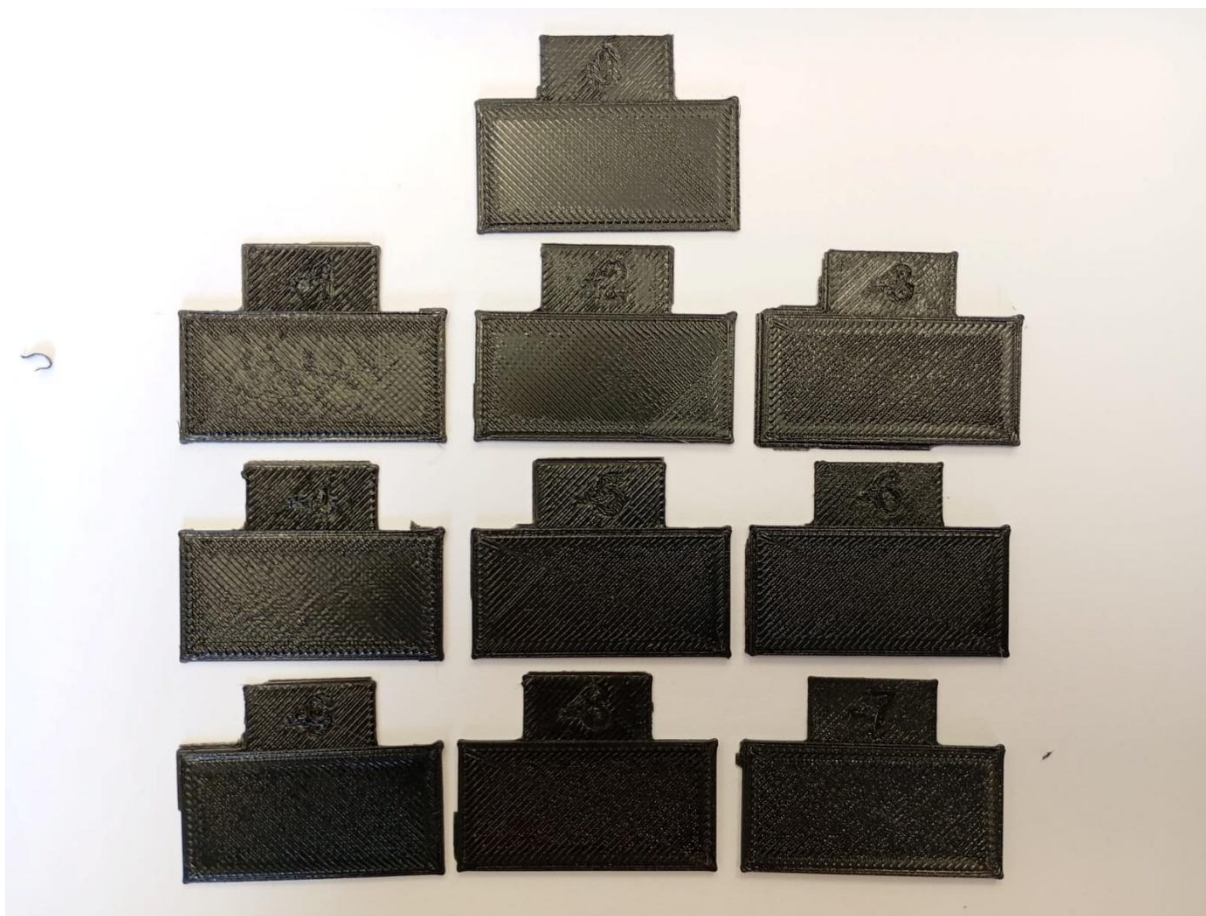


Fonte: elaborado pelos autores.

Para a definição final do fluxo de extrusão, o valor inicial obtido na primeira etapa foi aplicado na fórmula apresentada a seguir. A partir do valor resultante, definiu-se uma faixa de extrusão, e novas placas foram impressas, devidamente numeradas, com os valores de fluxo ajustados. A seleção do fluxo final foi realizada com base na placa que apresentou maior homogeneidade. O valor correspondente foi então adotado para a impressão dos blocos de cada material.

$$Fluxo = \left(\frac{100 + \text{modificador}}{100} \right) \times \text{fluxo antigo}$$

Figura 4 - Relação da segunda etapa da escolha do fluxo de extrusão



Fonte: elaborado pelos autores.

5.3 Valores de HU

Posteriormente, os blocos foram submetidos à tomografia computadorizada utilizando um tomógrafo *fan beam*, Aquilion Lightning 16 (Canon, Tóquio, Japão) localizado no centro de diagnóstico do Hospital Infantil Joana de Gusmão em Florianópolis. Para assegurar a acurácia dos valores de HU, o tomógrafo foi calibrado previamente às análises. A partir de um arquivo *Digital Imaging and Communications in Medicine* (DICOM) foi definida uma região de interesse em um ponto central dos blocos, de modo padronizado com o fim de medir a HU média e seu desvio padrão, de acordo com a equação:

$$HU = \left(\frac{\mu_{material} - \mu_{água}}{\mu_{água}} \right) \times 1000$$

Neste contexto, HU corresponde ao valor de atenuação radiológica do material, enquanto μ denota o coeficiente linear de atenuação do material. Após a aquisição da área de

interesse, os resultados foram tabulados e um gráfico expressando o valor de HU em termos de porcentagem de preenchimento da amostra foi traçado.

Durante a aquisição das imagens, todos os blocos foram posicionados de forma padronizada no centro do campo de visão do equipamento, evitando inclinações ou deslocamentos que pudessem interferir na leitura dos dados. Além disso, buscou-se manter as condições de aquisição para todas as amostras, garantindo a comparabilidade entre os diferentes filamentos analisados. Os resultados foram tabulados e organizados para análise comparativa entre os diferentes grupos de filamentos. A análise realizada possui caráter descritivo-analítico, sem aplicação de métodos estatísticos, tendo como objetivo comparar os materiais e identificar aqueles cujos valores de HU se adequam à faixa de uso para a confecção de bolus.

6 RESULTADOS

Foram analisados 16 filamentos de impressoras 3D. Para garantir que os blocos impressos fossem impressos de maneira satisfatória, adotamos protocolos específicos para determinar a temperatura e o fluxo adequado para cada material. Esse protocolo estabelecido foi replicado nos blocos impressos, visando obter os valores de HU precisos. A Tabela 1 apresenta a temperatura escolhida para cada filamento, os fluxos em cada etapa de calibração e o fluxo final utilizado na impressão de cada bloco a analisado.

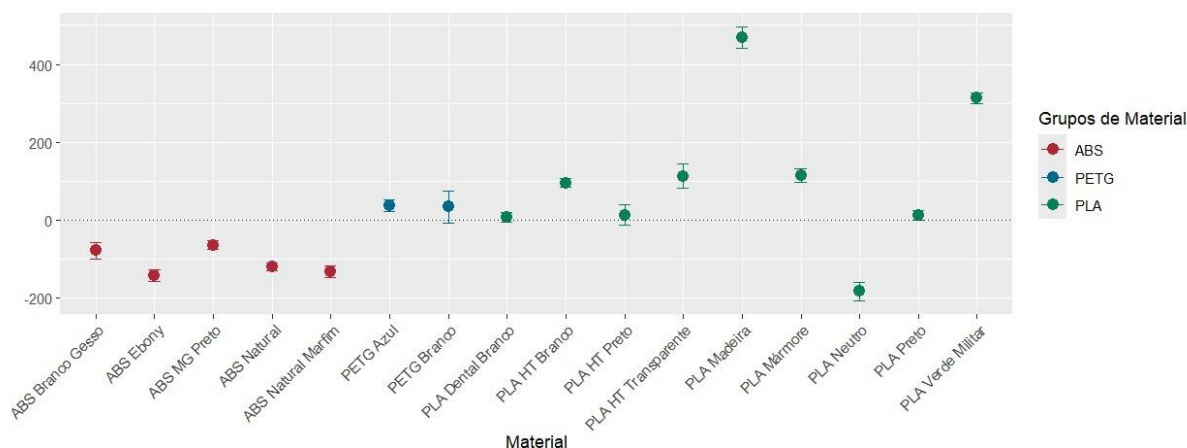
Tabela 3 - Relação dos filamentos de impressão 3D usados no trabalho com sua calibração.

Material	Temperatura °C	Fluxo inicial	Fluxo: etapa 1	Fluxo: etapa 2
PLA Verde Militar	180	0,98	0,98	0,9506
PLA Neutro	185	0,98	0,931	0,931
PLA Mármore	190	0,98	0,98	0,8379
PLA Branco Dental	190	0,98	0,882	0,8379
PLA Madeira	180	0,98	0,98	0,9604
PLA HT Transparente	190	0,98	1,07	1,07
PLA HT Branco	190	0,98	1,07	1,07
PLA HT Preto	190	0,98	1,07	1,07
PETG Azul	235	0,95	0,95	0,9025
PETG Branco	235	0,95	0,9025	0,8905
ABS Natural Marfim	230	0,926	0,926	0,926
ABS Preto	230	0,926	0,926	0,9074
ABS Branco	230	0,926	0,926	0,926
ABS Natural	230	0,926	0,926	0,926
ABS Preto Ebony	240	0,926	0,926	0,926

Fonte: elaborado pelos autores.

A figura 1, descrito a seguir, descreve os valores médios de HU dos materiais impressos por impressão 3D, agrupados em três categorias principais: ABS, PETG e PLA. Os materiais em ABS, representados em vermelho, apresentam valores médios de HU negativos, sugerindo interação com a RI semelhante à dos tecidos biológicos menos densos. Já os materiais em PETG, destacados em azul, apresentam valores médios de HU entre 33,5 e 37. Quanto aos materiais em PLA, destacados em verde, exibem maior variação, com o PLA madeira atingindo HU de 469, enquanto os materiais PLA Dental Branco e PLA HT Preto apresentaram valores médios de HU de 8.5. Esses resultados indicam que há uma grande diversidade na interação dos diferentes filamentos disponíveis no mercado quando expostos à RI.

Figura 5 - Relação dos filamentos com seus respectivos valores de HU



Fonte: elaborado pelos autores.

A análise dos valores de HU sugeriu diferenças significativas entre os filamentos estudados, consequentemente diferentes comportamentos frente a RI. Na tabela 2, descrita a seguir, os filamentos de ABS analisados apresentaram valores de HU negativos, variando entre -63,8 e -142 HU. Em contrapartida, os filamentos de PETG, nas cores branco e azul, apresentaram valores médios de HU entre 33.5 e 37, com o branco apresentando maior amplitude. Os filamentos de PLA apresentaram HU entre -183 (PLA Neutro), a 469 (PLA Madeira). Esses dados destacam a versatilidade dos filamentos de PLA, sendo vantajoso o uso em ambientes hospitalares, na qual uma ampla gama de valor de HU é necessário.

Tabela 4 – Relação dos filamentos com seus valores de HU, bem como sua variação de amplitude

Material	HU
PETG Azul	37 ± 14.8
PETG Branco	33.5 ± 39.9
ABS Branco	-78.4 ± 21.49
ABS Natural Marfim	-132 ± 14.2
ABS MG Preto	-63.8 ± 10.4
ABS Natural	-120 ± 9.97
ABS Ebony	-142 ± 15.6
PLA HT Branco	95.3 ± 11
PLA HT Preto	12.5 ± 26.2
PLA HT Transparente	113 ± 31
PLA Dental Branco	8.5 ± 12.5
PLA Mármore	114 ± 17.3

PLA Verde Militar	313 ± 13.2
PLA Madeira	469 ± 27.3
PLA Neutro	-183 ± 24.5
PLA Preto	13.2 ± 12.5

Fonte: elaborado pelos autores.

Os filamentos de ABS apresentaram valores médios de HU negativos já o PETG, com valores positivos de HU. Os filamentos de PLA, por sua vez, apresentaram uma ampla gama de valores de HU, com maior valor o PLA Madeira de menor valor de HU PLA Neutro.

Em relação aos custos, o grupo de filamentos mais acessível foi o ABS, variando entre R\$59 (o Natural Marfim) a R\$ 73,51(MG Preto e Branco). O PETG apresentou custo intermediário, os valores variando entre R\$ 85.40 (Azul) a R\$ 107 (Branco). Já o PLA, apresentou valores variados, entre R\$ 94 (PLA Preto) a R\$ 125 (Verde Militar).

Tabela 5- Valores dos filamentos utilizados

Filamentos	Valor por kg
PLA HT Transparente	R\$ 109,48
PLA HT Branco	R\$ 110,31
PLA HT Preto	R\$ 110,31
PLA Madeira	R\$ 118,68
PLA Mármore	R\$ 116,00
PLA Neutro	R\$ 94,90
PLA Branco Dental	R\$ 119,00
PLA Preto	R\$ 94,90
PLA Verde Militar	R\$ 125,36
PETG Branco	R\$ 107,00
PETG Azul	R\$ 85.40
ABS Natural Marfim	R\$ 59,00
ABS Preto Ebony	R\$ 59,71
ABS Branco Gesso	R\$ 59,71
ABS MG Natural	R\$ 73,51
ABS MG Preto	R\$ 73,51

Fonte: elaborado pelos autores.

7 DISCUSSÃO

No tratamento radioterápico de neoplasias superficiais, é fundamental proteger os tecidos saudáveis mais profundos. Nesse contexto, a análise de diferentes materiais para a confecção de bolus é importante para fornecer dados que auxiliem na escolha do material mais adequado (Kong et al., 2024). No presente estudo, foram avaliados 16 filamentos termoplásticos por meio dos valores de HU, com o objetivo de investigar a viabilidade de sua utilização na confecção de bolus personalizados. Os resultados indicaram potencial promissor dessa tecnologia, com destaque para os filamentos PLA Dental Branco, PLA HT Preto e PLA Preto.

Os tecidos biológicos e os filamentos de impressão tridimensional (3D) podem ser classificados de acordo com seus valores de HU. Com base nesses valores, o autor Bento et al., (2024) separou os tecidos biológicos em pulmão, tecido adiposo, coração, massa cinzenta, tecido muscular e tecido cortical, com valores aproximados de HU de -800, -100, 50, 50, 100 e 1100, respectivamente (Bento et al., 2024). De modo semelhante, o presente trabalho, buscou classificar os 16 filamentos analisados com base em seus valores de HU, com o objetivo de gerar dados concretos que contribuam para a viabilização do uso de filamentos de impressão 3D no tratamento RT.

Estudos clínicos indicam que bolus confeccionados em PLA são eficazes na melhoria da distribuição da dose e apresentam maior facilidade de confecção em comparação aos métodos tradicionais (Basaula et al., 2024). O PLA Dental Branco, analisado presente estudo, destacou-se por apresentar valor próximo de 0 HU e baixa variação, sugerindo maior confiabilidade. Os filamentos PLA Verde Militar e PLA Madeira apresentaram valores médios de HU elevados, essa disparidade pode estar relacionada à presença de aditivos, como corantes, que podem interferir na interação com a RI. O PLA Neutro foi o único com valor de HU negativo, podendo também ser uma consequência da ausência de corantes. De modo geral, a ampla variação dos valores de HU entre os filamentos de PLA amplia suas possibilidades de aplicação clínica (Wang et al., 2021).

O acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) apresenta características que favorecem seu uso na confecção de bolus radioterápicos, como ser atóxico e biologicamente inerte (Łukowiak et al., 2017). No presente estudo, foram analisados cinco filamentos de ABS: Branco, Natural Marfim, MG Preto, Natural e Ebony. Os filamentos de ABS indicam valores de HU negativos, semelhante a outro estudo na qual todas as amostras analisadas de ABS também apresentaram

valores de HU negativo, podendo indicar a estabilidade desse polímero quando exposto a RI (Ciobanu et al., 2024a).

O estudo, desenvolvido por Jreije et al. (2023), indicou que o tereftalato de polietileno glicol (PET-G) apresenta estabilidade quando exposto RI, avaliando a possibilidade de usar o filamento como blindagem radioativa quando associado a metais como chumbo (Jreije et al., 2023b). No presente estudo, os filamentos PETG Azul e PETG Branco, apresentando valores médios de HU ligeiramente positivos, sendo que o filamento branco apontou uma maior amplitude de desvio padrão. Além disso, estudos comparativos entre ABS, PLA e PETG apontam que o PLA e o PETG são mais indicados para a confecção de bolus radioterápico (Ciobanu et al., 2024b). Entretanto, como somente dois filamentos de PET-G foram analisados no estudo, seria conveniente, no futuro, refazer o estudo e aumentar o número de amostras analisadas.

A principal limitação do estudo foi o baixo número de amostras analisadas, totalizando 16 filamentos, em função de restrições de custo e da disponibilidade no mercado brasileiro. O grupo de PETG foi o mais limitado, com apenas duas amostras com valores de HU próximo à 0. Para o ABS, foram analisados cinco filamentos, todos apresentaram valores de HU negativos. Já o PLA, com nove amostras, apresentou ampla variação nos valores de HU. Outro fator limitante do estudo é a composição química dos filamentos, que muitas vezes é considerada segredo comercial. Esses aditivos, como corantes, podem afetar diretamente os valores de HU (Fonseca et al., 2023).

Os filamentos PLA Preto, ABS MG Preto, ABS Natural, PLA HT Branco e PLA Dental Branco apresentaram baixos desvios padrão, o que pode indicar maior estabilidade dos resultados e potencial segurança para uso clínico. No entanto, essa hipótese ainda requer validação por meio de estudos adicionais, tanto em relação aos valores de HU quanto à interação com a RI. Além disso, a utilização dessa tecnologia pode facilitar a confecção de bolus, simplificar o trabalho da equipe médica, melhorar o planejamento da distribuição da dose e contribuir para a preservação de tecidos saudáveis adjacentes à lesão (Fonseca et al., 2023).

Em termos de custo, os filamentos de ABS apresentaram os menores valores, com destaque para o ABS Branco Gesso como o mais econômico. Os filamentos de PETG apresentaram custo intermediário, enquanto os de PLA tiveram os valores mais elevados, especialmente o PLA Madeira e o PLA Verde Militar. Apesar do investimento necessário em infraestrutura, a confecção de bolus personalizados por impressão 3D é mais econômica,

consome menos tempo da equipe e apresenta menor variação na confecção, em comparação com o processo manual de produção de bolus em cera (C. Albantow et al., 2020).

Sugere-se a realização de novos estudos com ampliação do número de amostras, a fim de gerar dados mais robustos sobre os filamentos disponíveis no mercado brasileiro para a confecção de bolus radioterápicos, considerando que a falta de padronização e a ausência de clareza por parte das empresas fabricantes influenciam significativamente seu uso para tais fins. Além disso, a repetição desta metodologia com uma amostra maior pode contribuir para uma análise mais consistente dos valores de HU e do desvio padrão, permitindo melhor avaliação da segurança desses materiais no uso clínico. Também é fundamental investigar a estabilidade dos filamentos quando expostos à RI, consolidando evidências para sua aplicação na prática da RT.

Em relação ao desvio padrão, não foram encontrados estudos que descrevam essa variável para filamentos utilizados em manufatura aditiva. No presente estudo, os maiores valores de variação de HU foram observados nos filamentos PETG Branco, PLA HT Preto, PLA Madeira e PLA HT Transparente, sugerindo menor consistência dos dados. Por outro lado, PLA Preto, ABS MG Preto, ABS Natural, PLA HT Branco e PLA Dental Branco apresentaram menores desvios padrão, indicando maior estabilidade dos resultados e maior segurança para uso clínico. Embora já existam estudos clínicos com bolus personalizados de ABS e PLA demonstrando eficiência na RT, entretanto são necessários mais dados sobre a estabilidade desses materiais quando expostos à RI. (C. E. Albantow & Brown, 2022).

8 CONCLUSÃO

Os materiais avaliados apresentaram homogeneidade e valores de HU próximos à água e aos tecidos moles, indicando sua possibilidade para uso terapêutico como bolus em tratamentos radioterápicos que necessitam de superficialização da dose. Os resultados indicaram potencial promissor dessa tecnologia, com destaque para os filamentos PLA Dental Branco, PLA HT Preto e PLA Preto, que se mostraram aptos para essa aplicação. Ainda, o baixo custo de confecção demonstra uma ótima alternativa para uso nos Sistema Único de Saúde.

REFERÊNCIAS

- Albantow, C. E., & Brown, S. J. (2022). Three-dimensional printer use in the Australian and New Zealand radiation therapy setting. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 69(4), 492–501. <https://doi.org/10.1002/jmrs.613>
- Albantow, C., Hargrave, C., Brown, A., & Halsall, C. (2020). Comparison of 3D printed nose bolus to traditional wax bolus for cost-effectiveness, volumetric accuracy and dosimetric effect. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 67(1), 54–63. <https://doi.org/10.1002/jmrs.378>
- Barajas-Lopez, D. A., Castellanos-Jerez, C. C., Diaz-Merchan, J. A., & Martinez-Ovalle, S. A. (2024). Bolus Effect Caused by Use of Thermoplastic Masks in Head and Neck Radiotherapy Treatments. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(16). <https://doi.org/10.3390/ijms25169133>
- Basaula, D., Hay, B., Wright, M., Hall, L., Easdon, A., McWiggan, P., Yeo, A., Ungureanu, E., & Kron, T. (2024). Additive manufacturing of patient specific bolus for radiotherapy: large scale production and quality assurance. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 47(2), 551–561. <https://doi.org/10.1007/s13246-024-01385-1>
- Bento, M., Cook, H., Anaya, V. M., Bär, E., Nisbet, A., Lourenço, A., Hussein, M., & Veiga, C. (2024). Characterisation of 3D-printable thermoplastics to be used as tissue-equivalent materials in photon and proton beam radiotherapy end-to-end quality assurance devices. *Biomedical Physics and Engineering Express*, 10(6). <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ad6f95>
- Boman, E., Ojala, J., Rossi, M., & Kapanen, M. (2018). Monte Carlo investigation on the effect of air gap under bolus in post-mastectomy radiotherapy. *Physica Medica*, 55, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.10.023>
- Brown, K., Kupfer, T., Harris, B., Penso, S., Khor, R., & Moseshvili, E. (2022). Not all 3D-printed bolus is created equal: Variation between 3D-printed polylactic acid (PLA) bolus samples sourced from external manufacturers. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 69(3), 348–356. <https://doi.org/10.1002/jmrs.591>
- Burleson, S., Baker, J., Hsia, A. T., & Xu, Z. (2015). Use of 3D printers to create a patient-specific 3D bolus for external beam therapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 16(3), 166–178. <https://doi.org/10.1120/jacmp.v16i3.5247>
- Canters, R. A., Lips, I. M., Wendling, M., Kusters, M., van Zeeland, M., Gerritsen, R. M., Poortmans, P., & Verhoef, C. G. (2016). Clinical implementation of 3D printing in the construction of patient specific bolus for electron beam radiotherapy for non-melanoma skin cancer. *Radiotherapy and Oncology*, 121(1), 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2016.07.011>
- Chatchumnan, N., Kingkaew, S., Aumnate, C., & Sanghangthum, T. (2022). Development and dosimetric verification of 3D customized bolus in head and neck

radiotherapy. *Journal of Radiation Research*, 63(3), 428–434.
<https://doi.org/10.1093/jrr/rrac013>

Ciobanu, A. C., Petcu, L. C., Járαι-Szabó, F., & Bálint, Z. (2024a). Exploring the impact of filament density on the responsiveness of 3D-Printed bolus materials for high-energy photon radiotherapy. *Physica Medica*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.104849>

Ciobanu, A. C., Petcu, L. C., Járαι-Szabó, F., & Bálint, Z. (2024b). Exploring the impact of filament density on the responsiveness of 3D-Printed bolus materials for high-energy photon radiotherapy. *Physica Medica*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.104849>

Daguenet, E., Louati, S., Wozny, A. S., Vial, N., Gras, M., Guy, J. B., Vallard, A., Rodriguez-Lafrasse, C., & Magné, N. (2020). Radiation-induced bystander and abscopal effects: important lessons from preclinical models. In *British Journal of Cancer* (Vol. 123, Number 3, pp. 339–348). Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s41416-020-0942-3>

Dilalla, V., Chaput, G., Williams, T., & Sultanem, K. (2020). Radiotherapy side effects: Integrating a survivorship clinical lens to better serve patients. *Current Oncology*, 27(2), 107–112. <https://doi.org/10.3747/co.27.6233>

Dipasquale, G., Poirier, A., Sprunger, Y., Uiterwijk, J. W. E., & Miralbell, R. (2018). Improving 3D-printing of megavoltage X-rays radiotherapy bolus with surface-scanner. *Radiation Oncology*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13014-018-1148-1>

Fonseca, G. P., Rezaeifar, B., Lackner, N., Haanen, B., Reniers, B., & Verhaegen, F. (2023). Dual-energy CT evaluation of 3D printed materials for radiotherapy applications. *Physics in Medicine and Biology*, 68(3). <https://doi.org/10.1088/1361-6560/acaf4a>

Gonzalez-Perez, V., Rembielak, A., Guinot, J. L., Jaberī, R., Lancellotta, V., Walter, R., Zuchora, A., Budrukkar, A., Kovács, G., Jürgenliemk-Schulz, I., Siebert, F. A., & Tagliaferri, L. (2022). H&N and Skin (HNS) GEC-ESTRO Working Group critical review of recommendations regarding prescription depth, bolus thickness and maximum dose in skin superficial brachytherapy with flaps and customized moulds. In *Radiotherapy and Oncology* (Vol. 175, pp. 122–132). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2022.08.022>

Gugliandolo, S. G., Pillai, S. P., Rajendran, S., Vincini, M. G., Pepa, M., Pansini, F., Zaffaroni, M., Marvaso, G., Alterio, D., Vavassori, A., Durante, S., Volpe, S., Cattani, F., Jereczek-Fossa, B. A., Moscatelli, D., & Colosimo, B. M. (2024). 3D-printed boluses for radiotherapy: influence of geometrical and printing parameters on dosimetric characterization and air gap evaluation. *Radiological Physics and Technology*, 17(2), 347–359. <https://doi.org/10.1007/s12194-024-00782-1>

Hounsfield, G. N. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. In *British Journal of Radiology* (Vol. 46).

Huang, C. Y., Yang, B., Lam, W. W., Tang, K. K., Li, T. C., Law, W. K., Cheung, K. Y., & Yu, S. K. (2021). Effects on skin dose from unwanted air gaps under bolus in an MR-

guided linear accelerator (MR-linac) system. *Physics in Medicine and Biology*, 66(6).
<https://doi.org/10.1088/1361-6560/abe837>

Jreije, A., Mutyala, S. K., Urbonavičius, B. G., Šablinskaitė, A., Keršienė, N., Puišo, J., Rutkūnienė, Ž., & Adlienė, D. (2023a). Modification of 3D Printable Polymer Filaments for Radiation Shielding Applications. *Polymers*, 15(7).
<https://doi.org/10.3390/polym15071700>

Jreije, A., Mutyala, S. K., Urbonavičius, B. G., Šablinskaitė, A., Keršienė, N., Puišo, J., Rutkūnienė, Ž., & Adlienė, D. (2023b). Modification of 3D Printable Polymer Filaments for Radiation Shielding Applications. *Polymers*, 15(7).
<https://doi.org/10.3390/polym15071700>

Kaur, R., Bhardwaj, A., & Gupta, S. (2023). Cancer treatment therapies: traditional to modern approaches to combat cancers. In *Molecular Biology Reports* (Vol. 50, Number 11, pp. 9663–9676). Springer Science and Business Media B.V.
<https://doi.org/10.1007/s11033-023-08809-3>

Keiper, T. D., Kisling, K., Hua, P., & Manger, R. P. (2023). Comparing brass mesh to tissue equivalent bolus materials for volumetric modulated arc therapy chest wall irradiation. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 24(9).
<https://doi.org/10.1002/acm2.14054>

Khan, S. N., Warkhedkar, R. M., & Shyam, A. K. (2014). Analysis of Hounsfield Unit of Human Bones for Strength Evaluation. *Procedia Materials Science*, 6, 512–519.
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.065>

Khan, Y., Villarreal-Barajas, J. E., Udowicz, M., Sinha, R., Muhammad, W., Abbasi, A. N., & Hussain, A. (2013). Clinical and Dosimetric Implications of Air Gaps between Bolus and Skin Surface during Radiation Therapy. *Journal of Cancer Therapy*, 04(07), 1251–1255. <https://doi.org/10.4236/jct.2013.47147>

Kharfi, F., Benkahila, K., Boulkhessaim, F., Betka, A., Meziri, A., Khelfa, S., & Ghediri, N. (2024). Implementation of 3D Printing and Modeling Technologies for the Fabrication of Dose Boluses for External Radiotherapy at the CLCC of Sétif, Algeria. *Technology in Cancer Research and Treatment*, 23.
<https://doi.org/10.1177/15330338241266479>

Kong, D., Wu, J., Kong, X., Huang, J., Zhao, Y., Yang, B., Zhao, Q., & Gu, K. (2024). Effect of bolus materials on dose deposition in deep tissues during electron beam radiotherapy. *Journal of Radiation Research*, 65(2), 215–222.
<https://doi.org/10.1093/jrr/rrae001>

Li, F., Hu, W., Li, H., Li, B., & Wang, Y. (2025). Bolus Use in Postmastectomy Radiation Therapy for Breast Cancer: A Systematic Literature Review. In *Technology in Cancer Research and Treatment* (Vol. 24). SAGE Publications Inc.
<https://doi.org/10.1177/15330338251344521>

- Liu, Q., Chen, X., Hu, Z., Hou, L., Zhang, Y., Zhang, T., & Yao, S. (2025). Clinical application of 3D-printed bolus in postmastectomy radiotherapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 26(12). <https://doi.org/10.1002/acm2.70393>
- Lu, Y., Song, J., Yao, X., An, M., Shi, Q., & Huang, X. (2021). 3D Printing Polymer-based Bolus Used for Radiotherapy. *International Journal of Bioprinting*, 7(4), 1–16. <https://doi.org/10.18063/ijb.v7i4.414>
- Łukowiak, M., Jezierska, K., Boehlke, M., Wiecko, M., Łukowiak, A., Podraza, W., Lewocki, M., Masojć, B., & Falco, M. (2017). Utilization of a 3D printer to fabricate boluses used for electron therapy of skin lesions of the eye canthi. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 18(1), 76–81. <https://doi.org/10.1002/acm2.12013>
- Luu, A., Doerwald-Munoz, L., & Ostapiak, O. (2015). An Evaluation of Two Approaches to Skin Bolus Design for Patients Receiving Radiotherapy for Head and Neck Cancers. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 46(3), S37–S42. <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2014.08.001>
- Olivares-Urbano, M. A., Griñán-Lisón, C., Marchal, J. A., & Núñez, M. I. (2020). Csc radioresistance: a therapeutic challenge to improve radiotherapy effectiveness in cancer. In *Cells* (Vol. 9, Number 7, pp. 1–36). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/cells9071651>
- Park, J. W., & Yea, J. W. (2016). Three-dimensional customized bolus for intensity-modulated radiotherapy in a patient with Kimura's disease involving the auricle. *Cancer/Radiotherapie*, 20(3), 205–209. <https://doi.org/10.1016/j.canrad.2015.11.003>
- Pollmann, S., Toussaint, A., Flentje, M., Wegener, S., & Lewitzki, V. (2022). Dosimetric Evaluation of Commercially Available Flat vs. Self-Produced 3D-Conformal Silicone Boluses for the Head and Neck Region. *Frontiers in Oncology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.881439>
- Prasanna, P. G. S., Stone, H. B., Wong, R. S., Capala, J., Bernhard, E. J., Vikram, B., & Coleman, C. N. (2012). Normal tissue protection for improving radiotherapy: Where are the Gaps? In *Transl Cancer Res* (Vol. 1, Number 1).
- Pugh, R., Lloyd, K., Collins, M., & Duxbury, A. (2017). The use of 3D printing within radiation therapy to improve bolus conformity: A literature review. In *Journal of Radiotherapy in Practice* (Vol. 16, Number 3, pp. 319–325). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S1460396917000115>
- Ricotti, R., Ciardo, D., Pansini, F., Bazani, A., Comi, S., Spoto, R., Noris, S., Cattani, F., Baroni, G., Orecchia, R., Vavassori, A., & Alicja Jereczek-Fossa, B. (2017). Dosimetric characterization of 3D printed bolus at different infill percentage for external photon beam radiotherapy. *Physica Medica*, 39, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.06.004>
- Ricotti, R., Vavassori, A., Bazani, A., Ciardo, D., Pansini, F., Spoto, R., Sammarco, V., Cattani, F., Baroni, G., Orecchia, R., & Jereczek-Fossa, B. A. (2016). 3D-printed

applicators for high dose rate brachytherapy: Dosimetric assessment at different infill percentage. *Physica Medica*, 32(12), 1698–1706.

<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2016.08.016>

Robar, J. L., Moran, K., Allan, J., Clancey, J., Joseph, T., Chytyk-Praznik, K., MacDonald, R. L., Lincoln, J., Sadeghi, P., & Rutledge, R. (2018). Inpatient study comparing 3D printed bolus versus standard vinyl gel sheet bolus for postmastectomy chest wall radiation therapy. *Practical Radiation Oncology*, 8(4), 221–229.

<https://doi.org/10.1016/j.prro.2017.12.008>

Rooney, M. K., Rosenberg, D. M., Braunstein, S., Cunha, A., Damato, A. L., Ehler, E., Pawlicki, T., Robar, J., Tatebe, K., & Golden, D. W. (2020). Three-dimensional printing in radiation oncology: A systematic review of the literature. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 21(8), 15–26. <https://doi.org/10.1002/acm2.12907>

Saito, Y., Kanehira, T., Yuki, T., & Myojin, M. (2025). Evaluation of the glottic surface dose in three-dimensional conformal radiotherapy for early-stage glottic cancer using a treatment planning system. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 26(5).

<https://doi.org/10.1002/acm2.70011>

Sasaki, D. K., McGeachy, P., Alpuche Aviles, J. E., McCurdy, B., Koul, R., & Dubey, A. (2019). A modern mold room: Meshing 3D surface scanning, digital design, and 3D printing with bolus fabrication. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 20(9), 78–85. <https://doi.org/10.1002/acm2.12703>

Stephens, B., Azimi, P., El Orch, Z., & Ramos, T. (2013). Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmospheric Environment*, 79, 334–339.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.050>

Stowe, M., Yeager, C., Zhou, F., & Hand, C. (2014). SU-E-T-09: A Dosimetric Analysis of Various Clinically Used Bolus Materials. *Medical Physics*, 41(6Part11), 223–223.

<https://doi.org/10.1118/1.4888339>

Verma, T. R., Painuly, N. K., Tyagi, M., Johny, D., Gupta, R., & Bhatt, M. L. B. (2019). Validation of the gel & wax boluses and comparison of their dosimetric performance with virtual bolus. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 9(6), 629–636.

<https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.1177>

Wang, X., Wang, X., Xiang, Z., Zeng, Y., Liu, F., Shao, B., He, T., Ma, J., Yu, S., & Liu, L. (2021). The Clinical Application of 3D-Printed Boluses in Superficial Tumor Radiotherapy. In *Frontiers in Oncology* (Vol. 11). Frontiers Media S.A.

<https://doi.org/10.3389/fonc.2021.698773>

Yu, H.-B., Han, B.-J., Hu, J.-Q., Luo, Y., Liu, H.-Y., Zhang, X.-Y., Li, Y., Liu, R., & Hua, B.-J. (2025). Worldwide research on 3D printing for cancer: a dual-method analysis of bibliometrics and stratified focused thematic. *International Journal of Surgery*.

<https://doi.org/10.1097/js9.0000000000003340>

Zhang, C., Lewin, W., Cullen, A., Thommen, D., & Hill, R. (2023). Evaluation of 3D-printed bolus for radiotherapy using megavoltage X-ray beams. *Radiological Physics and Technology*, 16(3), 414–421. <https://doi.org/10.1007/s12194-023-00727-0>

Zhang, Y., Huang, Y., Ding, S., Liang, J., Kuang, J., Mao, Q., Ying, W., Shu, Y., Li, J., & Jiang, C. (2022). A clinical trial to compare a 3D-printed bolus with a conventional bolus with the aim of reducing cardiopulmonary exposure in postmastectomy patients with volumetric modulated arc therapy. *Cancer Medicine*, 11(4), 1037–1047. <https://doi.org/10.1002/cam4.4496>

Zhao, Y., Moran, K., Yewondwossen, M., Allan, J., Clarke, S., Rajaraman, M., Wilke, D., Joseph, P., & Robar, J. L. (2017). Clinical applications of 3-dimensional printing in radiation therapy. *Medical Dosimetry*, 42(2), 150–155. <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2017.03.001>

ANEXO A – ATA DE APRESENTAÇÃO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
CURSO DE ODONTOLOGIA
DISCIPLINA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ODONTOLOGIA

ATA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 06 dias do mês de maio de 2026 às 14 horas, em sessão pública de modo remoto, na presença da Banca Examinadora presidida pelo Professor Dr. Ricardo Armini Caldas e pelos examinadores:

- 1 - Prof. Dr. Maurício Malheiros Badaró,
 - 2 - Profª. Dra. Lauren de Oliveira Bohner,
- a aluna Tatiana Jesse Fontes de Oliveira

apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação intitulado:

ANÁLISE DOS FILAMENTOS PARA IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL (3D):

AVALIAÇÃO DAS UNIDADES HOUNSFIELD como requisito curricular indispensável à aprovação na Disciplina de Defesa do TCC e a integralização do Curso de Graduação em Odontologia. A Banca Examinadora, após reunião em sessão reservada, deliberou e decidiu pela APROVAÇÃO do referido Trabalho de Conclusão do Curso, divulgando o resultado formalmente ao aluno e aos demais presentes, e eu, na qualidade de presidente da Banca, lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos demais componentes da Banca Examinadora e pelo aluno orientando.

Prof. Dr. Ricardo Armini Caldas



Documento assinado digitalmente
Ricardo Armini Caldas
Data: 06/05/2026 15:31:15-0300
CPF: ***.708.117-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Maurício Malheiros Badaró



Documento assinado digitalmente
Mauricio Malheiros Badaró
Data: 06/05/2026 16:27:52-0300
CPF: ***.640.692-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Lauren de Oliveira Bohner



Documento assinado digitalmente
LAUREN OLIVEIRA LIMA BOHNER
Data: 06/05/2026 13:35:11-0300
CPF: ***.770.489-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Tatiana Jesse Fontes de Oliveira



Documento assinado digitalmente
TATIANA JESSÉ FONTES DE OLIVEIRA
Data: 06/05/2026 10:50:23-0300
CPF: ***.645.051-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>