

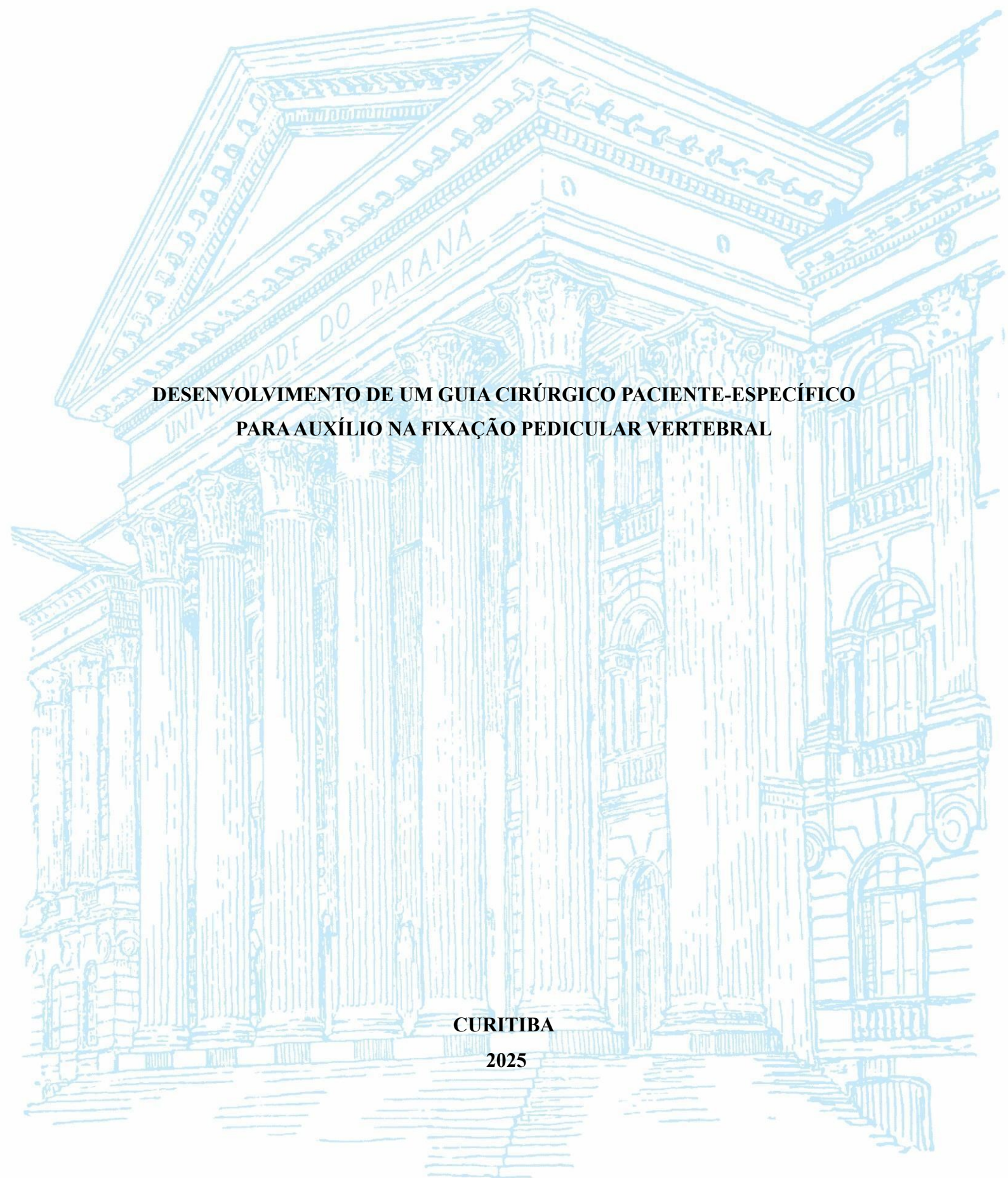
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KAYO WINICCIUS SAMUEL NEVES E SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM GUIA CIRÚRGICO PACIENTE-ESPECÍFICO
PARA AUXÍLIO NA FIXAÇÃO PEDICULAR VERTEBRAL**

CURITIBA

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KAYO WINICCIUS SAMUEL NEVES E SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM GUIA CIRÚRGICO PACIENTE-ESPECÍFICO
PARA AUXÍLIO NA FIXAÇÃO PEDICULAR VERTEBRAL**

Trabalho de curso apresentado, como requisito parcial à conclusão do Curso de Medicina, à coordenação do Curso de Medicina, Setor de Ciências da Saúde, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Reggiani Anzuategui.

CURITIBA

2025

NOTA EXPLICATIVA À COMISSÃO EXAMINADORA

O presente Trabalho de Curso adequou-se às regras de formatação preconizadas pela Revista BRASILEIRA DE ORTOPEDIA, à qual será submetido o artigo científico desenvolvido a partir deste Trabalho de Curso. As instruções específicas do periódico estão disponíveis em https://rbo.org.br/Content/images/ITA_Portugues.pdf.

Dentre as instruções, para artigos originais, destacam-se: o manuscrito deve ter Título, Resumo estruturado (Objetivo, Métodos, Resultado e Conclusão) com no máximo 250 palavras, Palavras-chave, Introdução, Materiais e Métodos, Resultados, Discussão, Conclusões e Referências (listadas no estilo AMA, usando o Index Medical journal title abbreviation).

As regras quanto à diagramação do texto que não constavam nas orientações do referido periódico foram retiradas do Edital de Trabalho de Curso 4, presente em <https://saude.ufpr.br/medicina/wp-content/uploads/sites/10/2019/04/tcc.pdf>.

Assim, este trabalho contém nesta ordem: resumo em português e em língua estrangeira (*abstract*) que visam atender às instruções do Edital de Avaliação do Trabalho de Curso de Medicina UFPR, resumo conforme as exigências da Revista e os demais tópicos elencados pela mesma.

RESUMO

Introdução: A fixação com parafusos pediculares, embora estabelecida, apresenta desafios em anatomias complexas como a da acondroplasia, o que aumenta o risco de complicações cirúrgicas. Neste cenário, guias cirúrgicos paciente-específicos, projetados a partir de imagens médicas individuais e fabricados via impressão 3D, emergem com potencial para melhorar a acurácia da inserção dos parafusos, reduzir o tempo operatório e a exposição à radiação. Contudo, apesar de evidências crescentes de sua eficácia em outros contextos, o uso de guias cirúrgicos em pacientes com acondroplasia permanece pouco explorado. Assim, este estudo objetiva desenvolver e avaliar a viabilidade e reprodutibilidade de um guia cirúrgico paciente-específico impresso em 3D para auxiliar a fixação pedicular em L4 e L5, utilizando um modelo representativo da coluna de um paciente com acondroplasia. **Materiais e métodos:** Estudo translacional utilizando imagens de tomografia computadorizada de um paciente com acondroplasia e estenose lombar. Modelos 3D virtuais foram criados para o planejamento da trajetória dos parafusos e para o design do guia. O guia foi projetado a partir de um protótipo adaptável. Foram impressos em 3D o seguimento L4-L5 e os guias cirúrgicos para L4 e para L5. A funcionalidade dos modelos impressos foi analisada quanto a estabilidade da ancoragem e ao direcionamento da trajetória planejada. **Resultados:** O modelo 3D virtual da coluna do paciente permitiu a visualização detalhada da anatomia complexa. O protótipo gerou dois guias cirúrgicos paciente-específicos e indicou uma reprodutibilidade eficiente. A avaliação do guia cirúrgico demonstrou boa ancoragem e estabilidade sobre o modelo vertebral, com alinhamento da trajetória considerado satisfatório, apesar das limitações de precisão da tecnologia de impressão utilizada. **Conclusão:** A metodologia foi viável para o desenvolvimento de guias cirúrgicos paciente-específicos lombares em pacientes com acondroplasia, facilitando o planejamento pré-operatório. Os guias cirúrgicos apresentaram bom encaixe e alinhamento correto. Contudo, por ser um estudo pré-clínico, com as limitações da precisão da impressão e avaliação restrita a um único caso restringe as conclusões sobre a acurácia intraoperatória. Estudos futuros com materiais biocompatíveis, impressão de alta precisão e validação cirúrgica comparativa são essenciais antes da aplicação clínica.

Palavras-chave: Guia Cirúrgico; Acondroplasia; Impressão 3D; Artrodese Vertebral; Fixação Pedicular; Estenose Espinhal.

ABSTRACT

Introduction: Pedicle screw fixation, although established, presents challenges in complex anatomies such as that of achondroplasia, which increases the risk of surgical complications. In this scenario, patient-specific surgical guides, designed from individual medical images and manufactured via 3D printing, emerge with the potential to improve screw insertion accuracy, reduce operative time, and decrease radiation exposure. However, despite growing evidence of their efficacy in other contexts, the use of surgical guides in patients with achondroplasia remains underexplored. Thus, this study aims to develop and evaluate the feasibility and reproducibility of a 3D-printed patient-specific surgical guide to assist pedicle fixation in L4 and L5, using a representative model of the spine of a patient with achondroplasia. **Materials and methods:** A translational study using computed tomography images from a patient with achondroplasia and lumbar stenosis. Virtual 3D models were created for planning the screw trajectories and for designing the guide. The guide was designed from an adaptable prototype. The L4-L5 segment and the surgical guides for L4 and L5 were 3D printed. The functionality of the printed models was analyzed regarding anchoring stability and guidance of the planned trajectory. **Results:** The virtual 3D model of the patient's spine allowed for detailed visualization of the complex anatomy. The prototype generated two patient-specific surgical guides and indicated efficient reproducibility. The evaluation of the surgical guide demonstrated good anchoring and stability on the vertebral model, with trajectory alignment considered satisfactory, despite the precision limitations of the printing technology used. **Conclusion:** The methodology was feasible for the development of patient-specific lumbar surgical guides for patients with achondroplasia, facilitating preoperative planning. The surgical guides showed a good fit and correct alignment. However, being a preclinical study, with limitations in printing precision and evaluation restricted to a single case, restrict conclusions about intraoperative accuracy. Future studies with biocompatible materials, high-precision printing, and comparative surgical validation are essential before clinical application.

Keywords: Surgical Guide; Achondroplasia; 3D Printing; Spinal Fusion; Pedicle Fixation; Spinal Stenosis.

RESUMO CONFORME EXIGÊNCIAS DA REVISTA BRASILEIRA DE ORTOPEDIA

Objetivo: Desenvolver e avaliar a viabilidade de um guia cirúrgico paciente-específico, fabricado por impressão 3D, para auxiliar na fixação com parafusos pediculares lombares (L4-L5) em um paciente com acondroplasia e estenose espinhal. **Métodos:** Estudo translacional utilizando imagens de tomografia computadorizada (TC) de um paciente com acondroplasia e estenose lombar. Modelos 3D virtuais foram criados para o planejamento da trajetória dos parafusos e para o design do guia. O guia foi projetado a partir de um protótipo adaptável. Foram impressos em 3D o seguimento L4-L5 e os guias cirúrgicos para L4 e para L5. A funcionalidade dos modelos impressos foi analisada quanto a estabilidade da ancoragem e ao direcionamento da trajetória planejada. **Resultados:** O modelo 3D virtual da coluna do paciente permitiu a visualização detalhada da anatomia complexa. O protótipo genérico virtual gerou dois guias cirúrgicos paciente-específicos e indicou uma reprodutibilidade eficiente. A avaliação do guia cirúrgico demonstrou boa ancoragem e estabilidade sobre o modelo vertebral, com alinhamento visual da trajetória considerado satisfatório, apesar das limitações de precisão da tecnologia de impressão utilizada. **Conclusão:** A metodologia foi viável para o desenvolvimento de guias cirúrgicos paciente-específicos lombares em pacientes com acondroplasia, facilitando o planejamento pré-operatório. Os guias cirúrgicos apresentaram bom encaixe e alinhamento correto. Contudo, por ser um estudo pré-clínico, com as limitações da precisão da impressão e avaliação restrita a um único caso restringe as conclusões sobre a acurácia intraoperatória. Estudos futuros com materiais biocompatíveis, impressão de alta precisão e validação cirúrgica comparativa são essenciais antes da aplicação clínica.

Palavras-chave: Guia Cirúrgico; Acondroplasia; Impressão 3D; Artrodese Vertebral; Fixação Pedicular; Estenose Espinhal.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
DESENHO DO ESTUDO.....	9
POPULAÇÃO.....	9
IMAGENS BIDIMENSIONAIS	9
MODELOS TRIDIMENSIONAIS VIRTUAIS	10
IMPRESSÃO 3D.....	13
ÉTICA	14
3. RESULTADOS.....	15
AUXÍLIO NO PLANEJAMENTO OPERATÓRIO COM MODELOS 3D	15
REPRODUTIBILIDADE DE GUIAS CIRÚRGICOS PACIENTE-ESPECÍFICOS A PARTIR DE PROTÓTIPOS GENÉRICOS	16
IMPRESSÃO 3D.....	16
UTILIZAÇÃO DO GUIA PACIENTE-ESPECÍFICO.....	17
4. DISCUSSÃO.....	18
6. REFERÊNCIAS	21
AGRADECIMENTOS.....	23
ANEXO 1 - DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO DO CONTEÚDO FINAL	24
ANEXO 2 - RELATÓRIO DE CONCLUSÃO DO TRABALHO DE CURSO .	25

1. INTRODUÇÃO

A fixação da coluna vertebral com parafusos pediculares é um procedimento bem estabelecido para tratar diversas condições e patologias, como deformidades, instabilidades e doenças degenerativas¹. No entanto, a inserção precisa desses parafusos pode ser desafiadora, especialmente em pacientes com anatomia vertebral complexa ou alterada². A acondroplasia, a displasia esquelética não letal mais comum, exemplifica este desafio, frequentemente cursa com alterações significativas na coluna lombar, incluindo pedículos curtos, estenose do canal vertebral e deformidades³. Estas particularidades anatômicas elevam o risco de lesões neurológicas e vasculares durante a instrumentação cirúrgica³⁻⁴, especialmente considerando que a estenose espinhal sintomática é comum nesta população, frequentemente requerendo descompressão e artrodese vertebral⁵⁻⁶.

As técnicas convencionais para inserção de parafusos pediculares, baseadas em marcos anatômicos e auxílio de fluoroscopia intraoperatória, demonstram taxas de mau posicionamento variáveis, que podem atingir até 40% em algumas séries, além de exporem o paciente e a equipe cirúrgica à radiação ionizante⁷⁻⁸. Embora sistemas avançados, como a navegação computadorizada e a robótica, possam aumentar significativamente a acurácia, seu alto custo, complexidade e necessidade de curva de aprendizado limitam sua disponibilidade e aplicabilidade universal⁷⁻¹⁰.

Nesse contexto, a tecnologia de impressão 3D emergiu como uma ferramenta promissora na medicina, permitindo a criação de modelos anatômicos realistas e instrumentos cirúrgicos personalizados², como guias cirúrgicos paciente-específicos. Os guias cirúrgicos, projetados a partir de imagens médicas do próprio paciente e fabricados por impressão 3D, adaptam-se unicamente à superfície óssea do paciente, direcionando a perfuração ou instrumentação conforme o planejamento pré-operatório virtual, com isso podem melhorar a acurácia da inserção de parafusos pediculares, reduzir o tempo operatório e a exposição à radiação²⁻⁸⁻⁹. Apesar de diversos estudos demonstrarem a eficácia desses guias em diferentes segmentos da coluna²⁻¹⁰, a sua aplicação específica na complexa anatomia lombar de pacientes com acondroplasia ainda é pouco explorada.

Desse modo, este estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar a viabilidade e reprodutibilidade de um guia cirúrgico paciente-específico, fabricado por impressão 3D, para auxiliar na fixação com parafusos pediculares lombares, nos níveis de L4 e L5, em

um modelo representativo da coluna de um paciente com acondroplasia e estenose espinhal.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Todas as fases do estudo contaram com a colaboração de um médico cirurgião ortopédico especialista em coluna e residentes de ortopedia do Serviço de Ortopedia e Traumatologia do Hospital de Clínicas da Universidade Federal do Paraná (CHC-UFPR), assegurando a relevância clínica do processo.

DESENHO DO ESTUDO

Trata-se de um estudo translacional para desenvolvimento e avaliação pré-clínica de um protótipo de guia cirúrgico paciente-específico.

POPULAÇÃO

A população do estudo compreende imagens de Tomografia Computadorizada (TC) da coluna vertebral, não identificadas, de um paciente adulto com acondroplasia, atendido no ambulatório de ortopedia da coluna do CHC-UFPR. O paciente apresentava quadro clínico (lombalgia, paresia e parestesia de membros inferiores) e radiológico compatível com estenose espinhal em L4 e L5, com indicação de descompressão e artrodese vertebral com fixação pedicular.

A inclusão no estudo ocorreu após consentimento informado, mediante aceitação do convite e assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

IMAGENS BIDIMENSIONAIS

Utilizou-se um exame de TC de alta resolução com cortes finos (0,1 mm) da coluna torácica, lombar e sacral do paciente. Os arquivos de dados, no formato Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) das imagens radiográficas, foram importados para o software InVesalius® 3.1.1, que através da análise e sequenciamento dos cortes tomográficos gera imagens bidimensionais e permite a escolha da densidade tecidual de interesse.

Neste software, aplicou-se um limiar de densidade (thresholding) personalizado para segmentar o tecido ósseo compacto adulto, excluindo tecidos moles e preservando

os detalhes anatômicos relevantes. O exame analisado compreendia a coluna vertebral torácica, lombar e sacral. Desse modo, resultando em uma imagem que incluía arcos costais, pelve e parte da escápula (Figura 1).

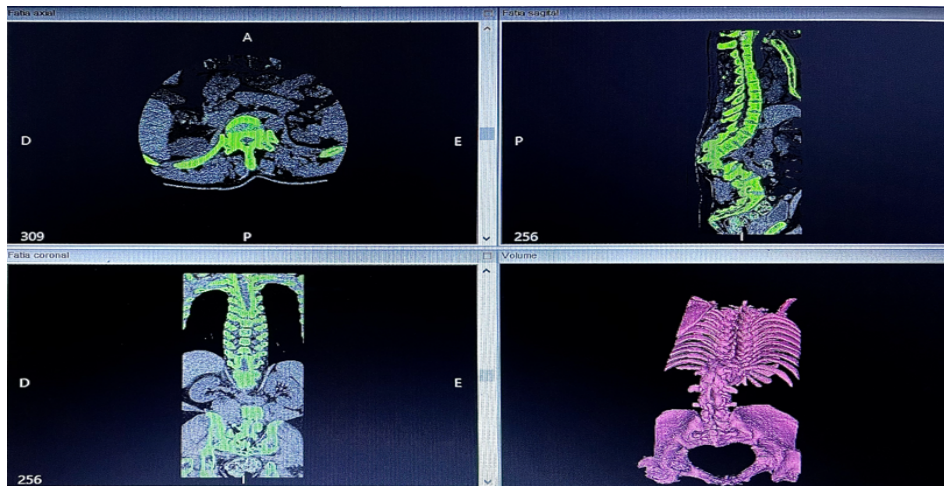


Figura 1 - Interface do programa InVesalius® demonstrando a segmentação do tecido ósseo (verde/rosa) a partir das imagens de TC nos planos axial, sagital, coronal e reconstrução volumétrica.

MODELOS TRIDIMENSIONAIS VIRTUAIS

A segmentação óssea gerada no InVesalius® foi exportada como um arquivo no formato STL StereoLithography (STL), representando a superfície óssea como uma malha de triângulos. Essa malha inicial frequentemente apresenta artefatos e descontinuidades que necessitam de refinamento para permitir a impressão 3D.

A manipulação de arquivos STL é feita com programas CAD (Computer Aided Design) capazes de alterar a malha triangular. Assim, o programa Shapr3D (Siemens Parasolid®, ZRT) foi usado para refinar a malha, selecionar a região de interesse e projetar o guia cirúrgico. Shapr3D é um programa tipo CAD, capaz de gerar novos sólidos (modelos tridimensionais). Por isso, foi escolhido também para o desenvolvimento virtual tridimensional do guia cirúrgico.

Inicialmente foram desenvolvidos 2 modelos virtuais básicos: o seguimento vertebral (Figura 2) e um guia cirúrgico genérico (Figura 3).

O seguimento selecionado estende-se da vértebra T11-S5, por englobar características únicas e específicas do paciente, que tornam o caso desafiador em termos de técnica e resultado cirúrgicos adequados.

O design do guia genérico seguiu um padrão de médio contato e referenciado em estruturas anatômicas posteriores estáveis, de fácil exposição cirúrgica e que proporcionassem uma reprodutibilidade facilitada². O guia genérico foi projetado como um protótipo do guia paciente-específico, para se adaptar de maneira estável sobre as vértebras, com limitação para translação ou rotação e evitando recobrir estruturas importantes. Sendo composto por três partes principais: um corpo central para manuseio e dois braços laterais que contêm os canais para guiar a perfuração pedicular. Como os seus componentes não possuem conexões intrínsecas, são possíveis ajustes para se adequar a diferentes níveis lombares.

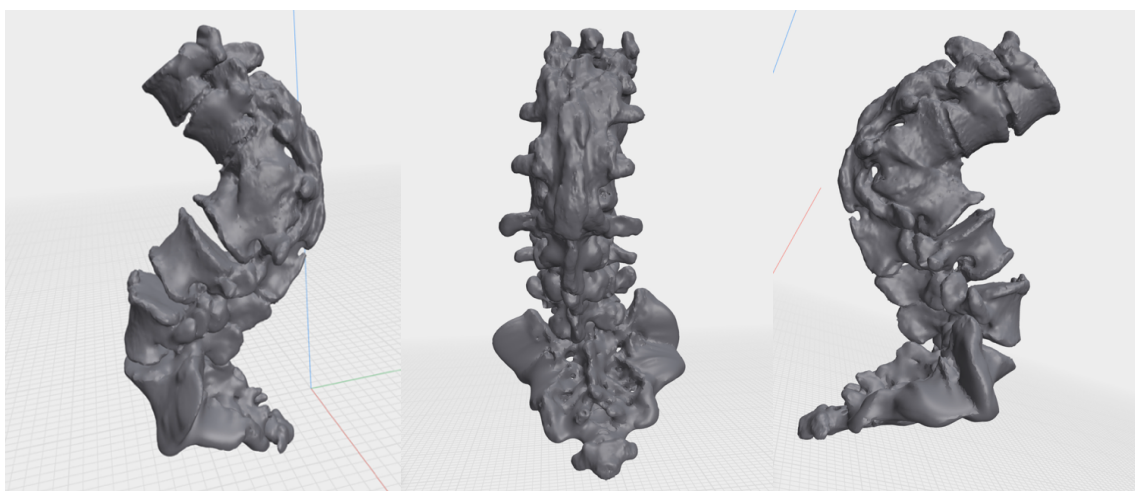


Figura 2 – Seguimento vertebral T11-S5 do paciente, após refinamento da malha no software Shapr3D®.

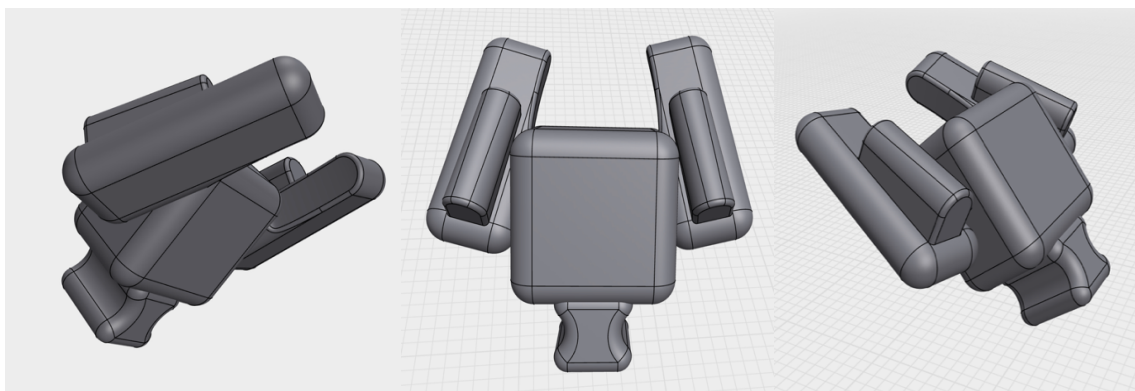


Figura 3 – Modelo tridimensional virtual do guia cirúrgico genérico projetado no software Shapr3D®.

Posteriormente, o seguimento vertebral L4-L5 foi isolado virtualmente para o planejamento preciso da trajetória dos parafusos pediculares. Cilindros virtuais

representando a trajetória foram posicionados bilateralmente em L4 e L5 (Figura 4), seguindo os princípios de segurança para evitar violação das corticais pediculares, canal medular ou de estruturas neurovasculares adjacentes, caracterizado como classificação Grau A de Gertzbein-Robbins⁷⁻¹¹⁻¹². Os mesmos cilindros de planejamento foram usados no seguimento vertebral L4-L5, nos braços do guia cirúrgico paciente-específico e no seguimento vertebral T11-S5.

O guia paciente-específico foi criado interpolando o modelo de guia genérico com a anatomia posterior de cada vértebra (L4 e L5) do seguimento T11-S5 do paciente, visando uma melhor aproximação virtual do uso do guia in vivo. Assim, garantindo contato em múltiplos pontos de referência: processo espinhoso da vértebra alvo, processo espinhoso da vértebra adjacente (quando aplicável), lâminas e processos articulares inferiores e superiores. Resultando em dois modelos virtuais de guias cirúrgicos paciente-específicos, um para L4 e um para L5 (Figura 5).

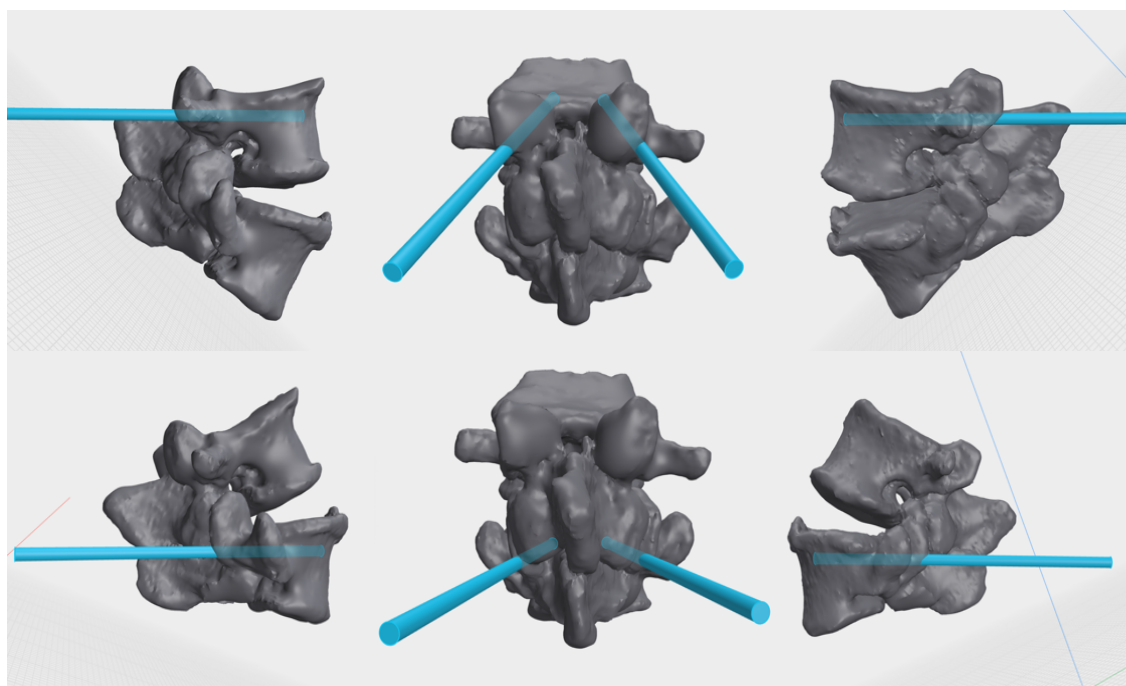


Figura 4 – Planejamento virtual da trajetória dos parafusos pediculares (cilindros azuis). Demonstrando a vértebra L4 (parte superior da imagem) e a vértebra L5 (parte inferior da imagem).

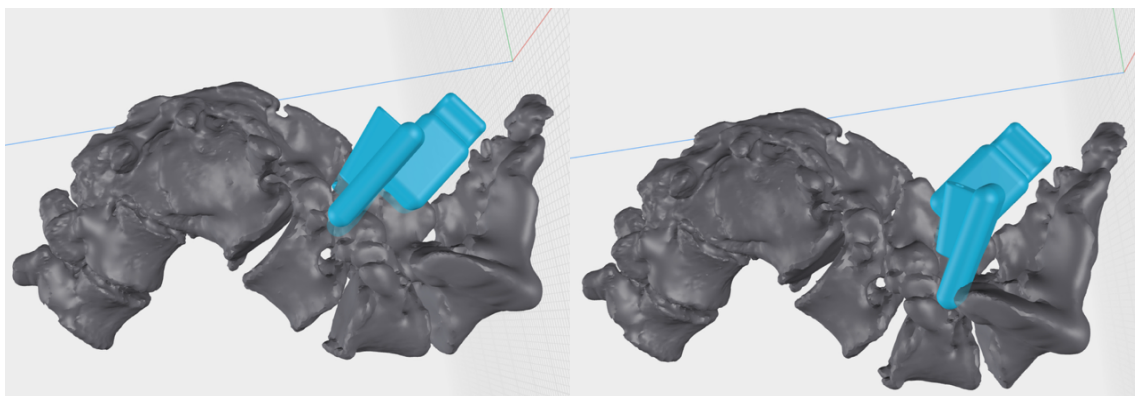


Figura 5 – Modelo virtual do guia cirúrgico paciente-específico (azul), posicionado sobre o segmento vertebral T11-S5 (cinza) no software Shapr3D®, demonstrando a interpolação e o alinhamento com a trajetória planejada. Demonstrando o guia cirúrgico para L4 (à esquerda da imagem) e o guia cirúrgico para L5 (à direita da imagem).

IMPRESSÃO 3D

Os modelos virtuais finalizados (segmento vertebral L4-L5, guia cirúrgico para L4 e guia cirúrgico para L5) foram exportados para o software de fatiamento PrusaSlicer® 2.7.1 (© Prusa Research a.s.) (Figura 6), que prepara o modelo para ser impresso, gerando as camadas e estruturas de suporte necessárias. A impressão foi realizada utilizando a tecnologia de modelagem por deposição de material fundido (FDM), com filamento de ácido polilático (PLA), pela impressora 3D Creality Ender-3 S1 Pro. Ambos, material e impressora, foram cedidos pelo Laboratório de Impressão 3D, situado no Centro de Simulação Prof^a. Leide Parolin Marinoni.

Foram impressos os modelos anatômicos: seguimento vertebral L4-L5, guia cirúrgico para L4 e guia cirúrgico para L5 (Figura 7). Sendo utilizados, ao todo, 26.01 metros de material no seguimento vertebral e 18.67 metros nos guias cirúrgicos.

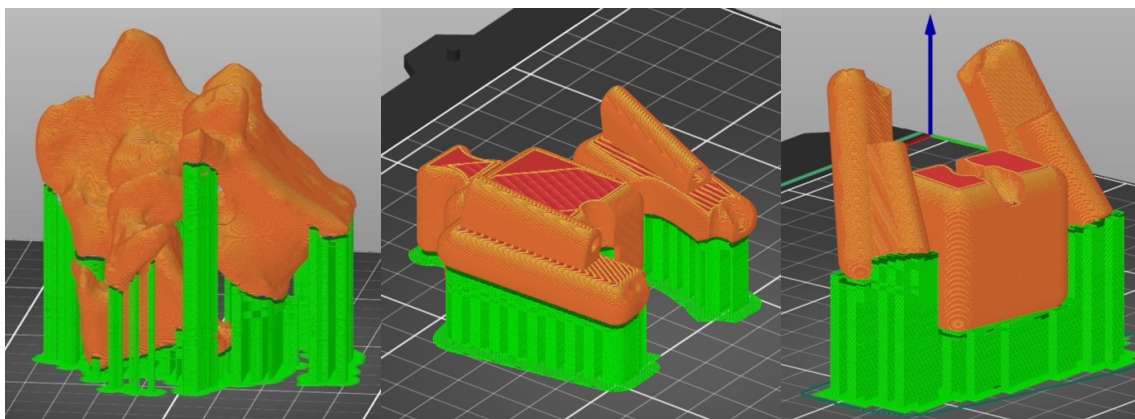


Figura 6 – Interface do software PrusaSlicer® mostrando o planejamento da impressão 3D (laranja) com as estruturas de suporte (verde). Demonstrando o segmento vertebral L4-L5 (à esquerda da imagem), o guia cirúrgico para L4 (no centro da imagem) e o guia cirúrgico para L5 (à direita da imagem).

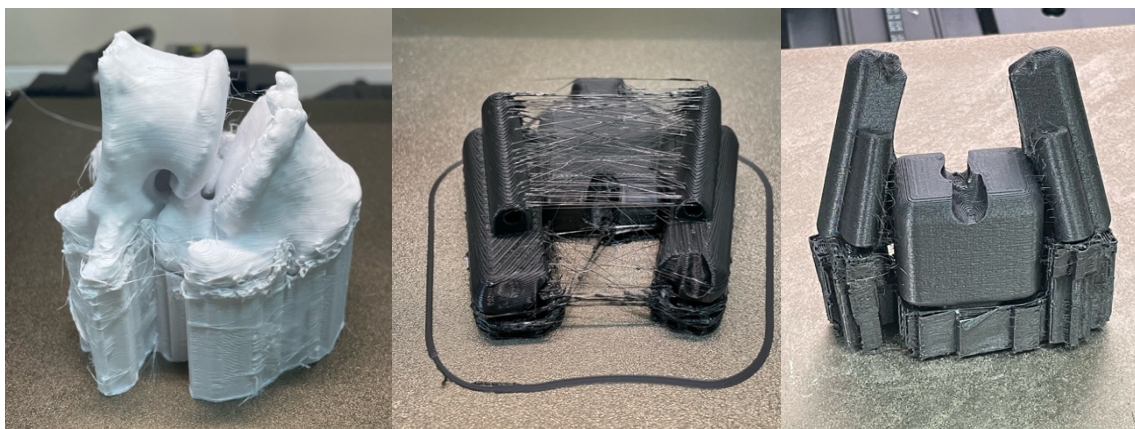


Figura 7 – Modelos durante o processo de impressão 3D. Demonstrando o Seguimento vertebral L4-L5 (branco) e os Guias cirúrgicos paciente-específicos (preto), para L4 (no centro da imagem) e para L5 (à direita da imagem).

ÉTICA

O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética do CHC-UFPR (CAAE: 79209924.8.0000.0096), e todos os participantes assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido concordando em ceder os dados clínicos e os exames de imagem usados na pesquisa.

A confidencialidade das informações foi mantida sob a guarda dos pesquisadores a fim de manter o sigilo dos dados dos participantes da pesquisa.

Todos os cuidados foram tomados para que os dados se mantivessem sigilosos, estando apenas sob a guarda dos pesquisadores responsáveis.

3. RESULTADOS

AUXÍLIO NO PLANEJAMENTO OPERATÓRIO COM MODELOS 3D

A reconstrução 3D virtual do segmento T11-S5 a partir da TC do paciente facilitou significativamente a compreensão da anatomia vertebral única desse paciente com acondroplasia. Foi possível visualizar claramente a extensão da fusão vertebral de T12 a L3 (resultado de artrodeses prévias), a presença de hiperlordose lombar e cifoescoliose, além das alterações morfológicas vertebrais intrínsecas à condição (Figura 8). Essa visualização tridimensional detalhada permitiu um planejamento mais informado da trajetória dos parafusos em L4 e L5, considerando as dificuldades impostas pela anatomia alterada.

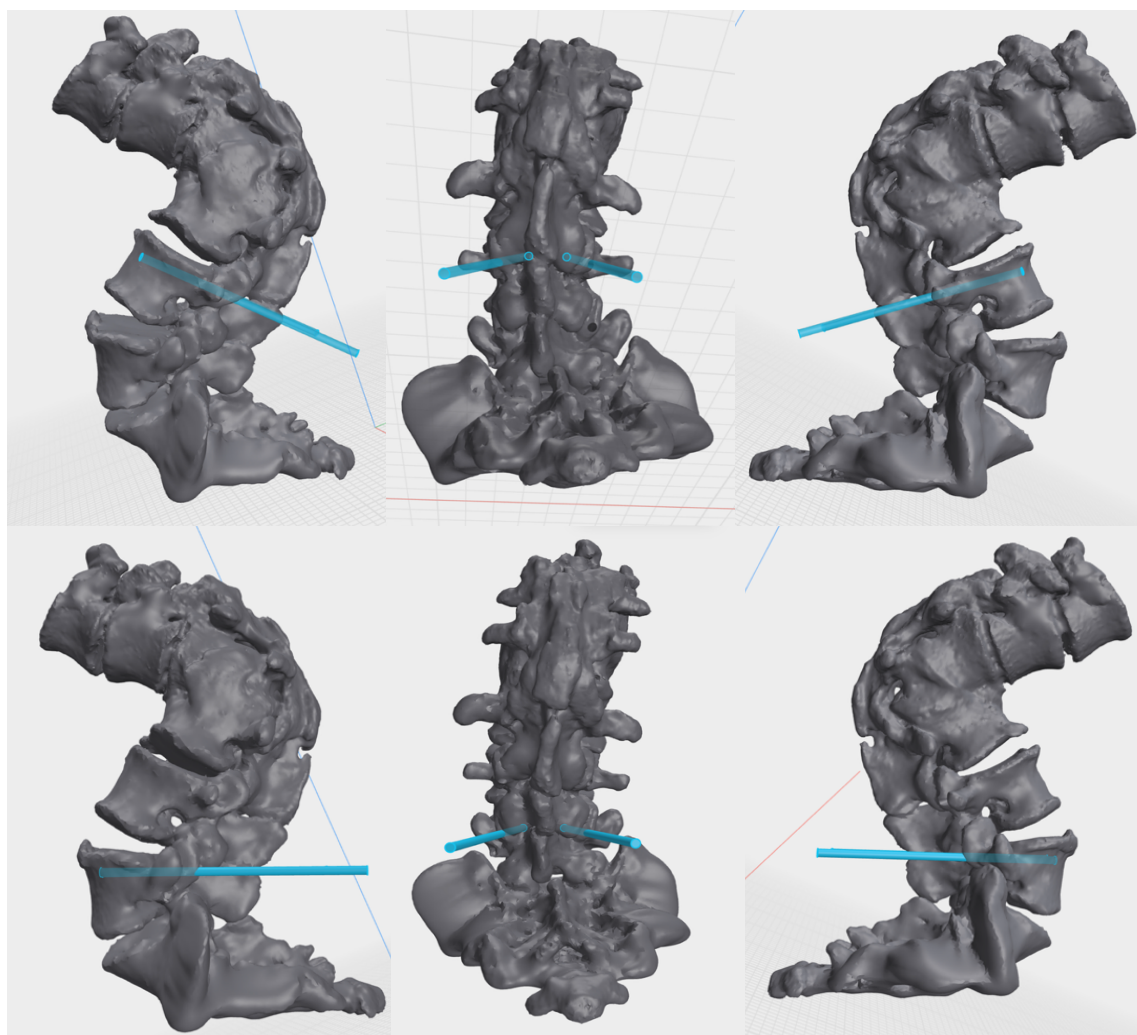


Figura 8 – Modelo virtual do segmento vertebral T11-S5 com as trajetórias planejadas para os parafusos pediculares de L4 (parte superior da imagem) e L5 (parte inferior da imagem) indicadas pelos cilindros azuis.

REPRODUTIBILIDADE DE GUIAS CIRÚRGICOS PACIENTE-ESPECÍFICOS A PARTIR DE PROTÓTIPOS GENÉRICOS

O guia cirúrgico genérico (protótipo) resultou em dois modelos virtuais de guias cirúrgicos paciente-específicos (Figura 9), sem que fossem necessárias mudanças significativas em seu design. Assim, sutis ajustes nas angulações dos braços e na interpolação com a superfície de contato, foram suficientes para o adequado posicionamento do guia cirúrgico sobre a vértebra. Sendo possível reproduzir dois guias cirúrgicos diferentes a partir de um único modelo genérico.

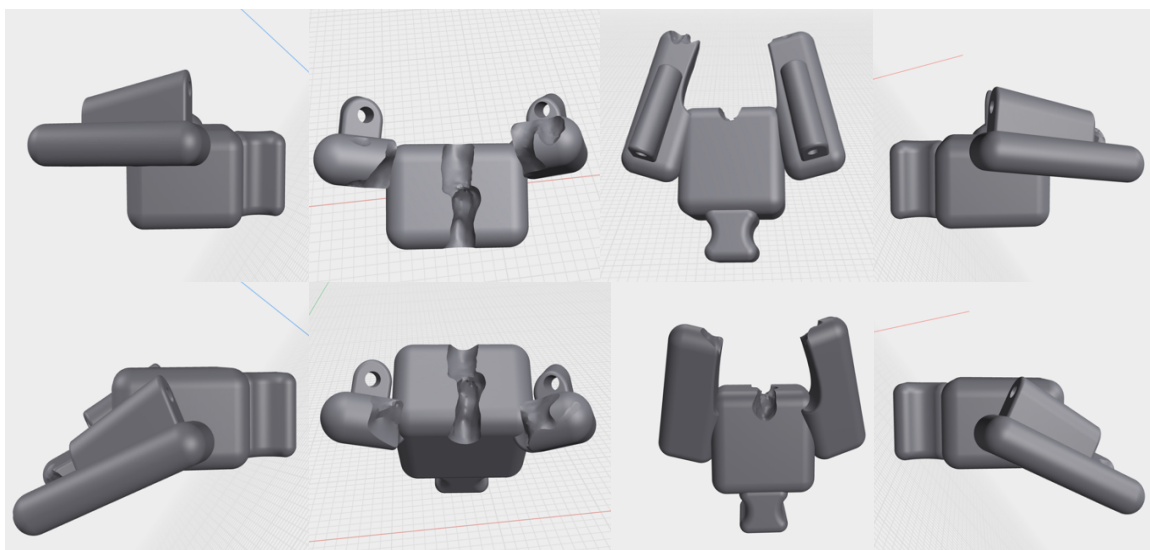


Figura 9 – Comparação entre os guias cirúrgicos-específicos: para L4 (parte superior da imagem) e para L5 (parte inferior da imagem).

IMPRESSÃO 3D

A manufatura aditiva do segmento vertebral L4-L5 e dos guias cirúrgicos paciente-específicos para L4 e L5, em material PLA pela técnica FDM, foi concluída com sucesso (Figura 10). Os modelos impressos reproduziram a geometria dos modelos virtuais, permitindo a avaliação física do protótipo.



Figura 10 – Modelos impressos em 3D: segmento vertebral L4-L5 (branco) e guias cirúrgicos paciente-específicos (preto): guia para L4 (linha central da imagem) e guia para L5 (parte inferior da imagem).

UTILIZAÇÃO DO GUIA PACIENTE-ESPECÍFICO

A adaptação e funcionalidade dos modelos impressos foram verificadas manualmente (Figura 11). O encaixe do guia cirúrgico, para L4 e L5, sobre o seguimento vertebral L4-L5, demonstrou ancoragem e estabilidade satisfatórias, sem folgas significativas que comprometessem o seu posicionamento. A funcionalidade do guia foi testada inserindo hastes cilíndricas (simulando a broca) através dos canais nos braços do

guia. Observou-se um alinhamento visualmente satisfatório com a trajetória demarcada na vértebra L4 impressa.

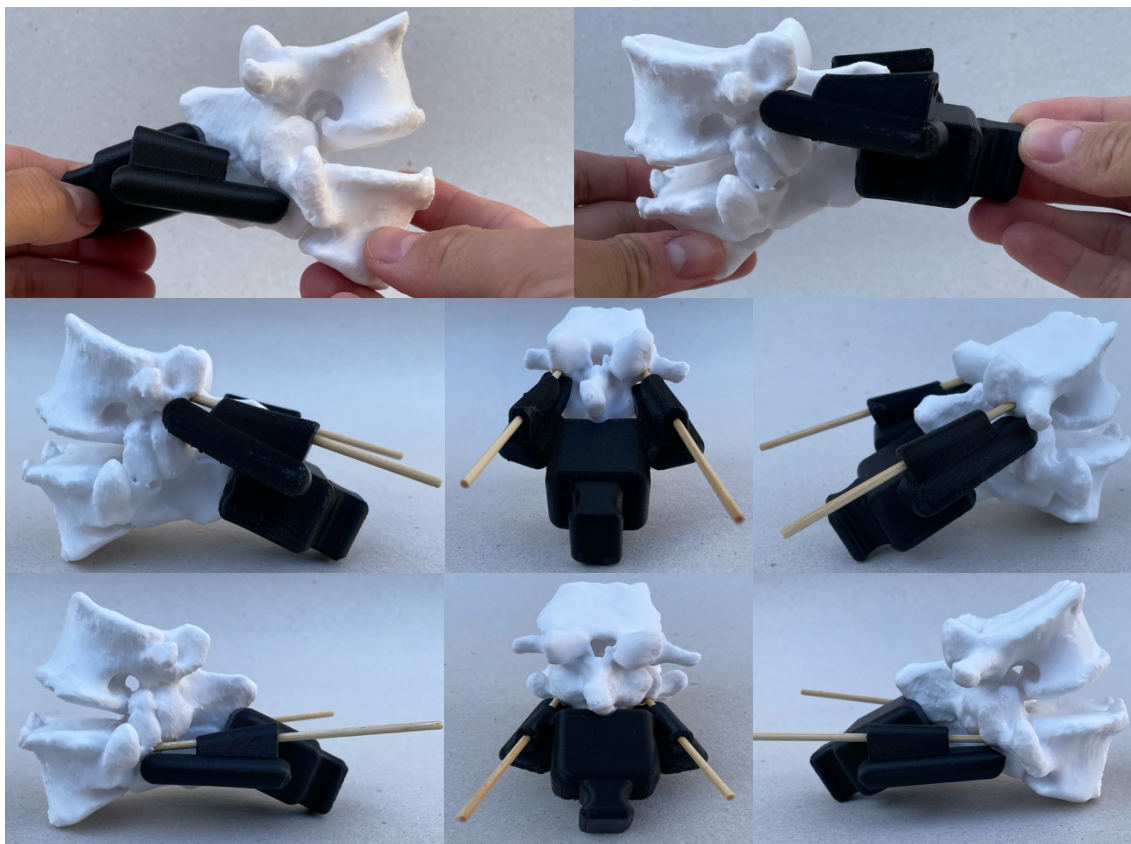


Figura 11 – Avaliação do encaixe, manuseio e alinhamento dos guias cirúrgicos impressos (preto) sobre o segmento vertebral impresso (branco). Na imagem: o manuseio do guia para L5 (parte superior à esquerda) e do guia para L4 (parte superior à direita), a trajetória do guia para L4 (linha central) e do guia para L5 (parte inferior).

4. DISCUSSÃO

A instrumentação da coluna vertebral em pacientes com acondroplasia apresenta desafios únicos devido às alterações anatômicas congênicas e frequentemente adquiridas, como a estenose do canal³. Por isso, a possibilidade de pré-definir a trajetória ideal e transferi-la confiavelmente para o campo cirúrgico pode ser particularmente vantajosa para cirurgiões menos experientes ou em casos de anatomia distorcida². A visualização tridimensional proporcionada pelos modelos virtuais gerados a partir da TC foi fundamental neste estudo para compreender a morfologia específica do paciente, incluindo a fusão prévia e as deformidades associadas, auxiliando no planejamento seguro

das trajetórias dos parafusos pediculares em L4 e L5. Este achado corrobora a literatura que aponta o valor dos modelos 3D no planejamento pré-operatório de cirurgias complexas da coluna, especialmente em casos de deformidade²⁻⁷⁻¹¹.

O desenvolvimento do guia cirúrgico paciente-específico a partir de um protótipo genérico modular e adaptável mostrou-se eficiente, pois a reprodutibilidade do processo de personalização do guia necessitou apenas de modificações menores para se conformar à anatomia individual de L4 e L5. O design de médio contato, utilizando múltiplos pontos de referência vertebrais posteriores (processos espinhosos, lâminas e processos articulares), parece oferecer um bom equilíbrio entre estabilidade e facilidade de posicionamento intraoperatório, minimizando a necessidade de extensa dissecação de tecidos moles⁷.

A impressão 3D pela técnica FDM com material PLA foi utilizada devido à sua acessibilidade e baixo custo, sendo adequada para a prototipagem e avaliação pré-clínica iniciais. No entanto, é reconhecido que a FDM possui limitações inerentes quanto à precisão dimensional e acabamento superficial em comparação com outras técnicas de impressão 3D, como a estereolitografia (SLA) ou a sinterização seletiva a laser (SLS)². Apesar disso, a avaliação manual do encaixe e do alinhamento do guia impresso sobre o modelo vertebral foi considerada satisfatória para esta fase do estudo, pois o guia cumpriu a sua função de direcionar a trajetória planejada dentro de uma margem aceitável para uma prototipagem inicial. Para uso clínico, materiais biocompatíveis e esterilizáveis (como poliamida, PEEK ou titânio) e técnicas de impressão com maior precisão seriam necessários².

Dentre as limitações presentes neste estudo, algumas são inerentes à tecnologia de impressão 3D utilizada (FDM-PLA), cujas restrições de precisão dimensional e capacidade de reproduzir detalhes finos podem ter afetado o ajuste final do protótipo. Adicionalmente, as dimensões da impressora e a técnica FDM impediram a impressão do segmento vertebral completo (T11-S5), limitando a avaliação do guia a um contexto anatômico restrito (L4-L5). Outra limitação significativa é a ausência de avaliação intraoperatória ou comparação direta com técnicas convencionais, uma vez que a análise se restringiu à avaliação manual do encaixe e alinhamento em um modelo impresso de um único caso. Assim, futuros estudos devem incluir um número maior de pacientes, utilizar materiais biocompatíveis e técnicas de impressão de alta precisão, e validar a acurácia e os resultados clínicos do guia em ambiente cirúrgico, comparando-o com métodos tradicionais.

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um guia cirúrgico paciente-específico para fixação pedicular, em um paciente com acondroplasia, mostrou-se um processo viável. O modelo 3D virtual foi uma ferramenta valiosa para o planejamento pré-operatório em anatomia complexa. O design do guia, baseado em um modelo genérico adaptável com múltiplos pontos de contato, permitiu um ajuste estável e um alinhamento de trajetória satisfatório, apesar das limitações da técnica de impressão utilizada.

Embora sejam necessários estudos adicionais com materiais biocompatíveis, impressão de maior precisão e validação clínica, esta abordagem representa uma ferramenta promissora e com potencial para oferecer benefícios, como aumentar a segurança e a precisão da instrumentação vertebral, especialmente na desafiadora anatomia da acondroplasia.

6. REFERÊNCIAS

1. Sciubba DM, Yurter A, Smith JS, Kelly MP, Scheer JK, Goodwin CR, Lafage V, Hart RA, Bess S, Kebaish K, Schwab F, Shaffrey CI, Ames CP, International Spine Study Group (ISSG). A comprehensive review of complication rates after surgery for adult deformity: a reference for informed consent. *Spine Deform* 3(6):575–594. (2015). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jspd.2015.04.005>.

2. Kabra A, Garg B, Mehta N. 3D printing in spine care: A review of current applications. [Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma] 35(24):102044. October 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcot.2022.102044>.

3. Krakow D, Rimoin DL. The skeletal dysplasias. *Genet Med*. 2010;12(6):327-341. doi:10.1097/GIM.0b013e3181daae9b. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/GIM.0b013e3181daae9b>.

4. Huet, T., Cohen-Solal, M., Laredo, JD. *et al.* Lumbar spinal stenosis and disc alterations affect the upper lumbar spine in adults with achondroplasia. *Sci Rep* 10, 4699 (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61704-w>.

5. Savarirayan, R., Ireland, P., Irving, M. *et al.* International Consensus Statement on the diagnosis, multidisciplinary management and lifelong care of individuals with achondroplasia. *Nat Rev Endocrinol* 18, 173–189 (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41574-021-00595-x>.

6. Abu Al-Rub Z, Lineham B, Hashim Z, Stephenson J, Arnold L, Campbell J, Loughenbury P, Khan A. Surgical treatment of spinal stenosis in achondroplasia: Literature review comparing results in adults and paediatrics. *J Clin Orthop Trauma*. 2021 Oct 30;23:101672. doi: 10.1016/j.jcot.2021.101672. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8577449/>.

7. Ribera-Navarro, A; Shenoy, R; Cunningham, G; Vakharia, V; Gibson, A; Moazen, M; Kalaskar, DM. Patient-specific 3D-printed surgical guides for pedicle screw insertion: comparison of different guide design approaches. *Journal of 3D Printing in Medicine*.(2021) Disponível em: <https://doi.org/10.2217/3dp-2021-0002> .

8. Cecchinato, R., Berjano, P., Zerbi, A. *et al.* Pedicle screw insertion with patient-specific 3D-printed guides based on low-dose CT scan is more accurate than free-hand technique in spine deformity patients: a prospective, randomized clinical trial. **Eur Spine J** 28, 1712–1723 (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00586-019-05978-3>.

9. Chen H, Wu D, Yang H, Guo K. Clinical Use of 3D Printing Guide Plate in Posterior Lumbar Pedicle Screw Fixation. *Med Sci Monit*. 2015;21:3948-3954. Published 2015 Dec 18. doi:10.12659/msm.895597. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26681388/>.

10. Nanni FN, Vialle EN, Foggiatto JA, Silva KWSNE, Mello Neto HO. Development of a Patient-specific Guide for High Cervical Spine Fixation. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo)*. 2019 Feb;54(1):20-25. doi: 10.1016/j.rbo.2017.09.011. Epub 2019 Mar 1. PMID: 31363238; PMCID: PMC6424808. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rbo.2017.09.011>.

11. Pan A, Ding H, Hai Y, et al. The value of three-dimensional printing spine model in severe spine deformity correction surgery. *Global Spine J*. Published online. May 2021;11, 21925682211008830. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/21925682211008830>.

12. Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1990;15(1):11-14. doi:10.1097/00007632-199001000-00004. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2326693/>.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este Trabalho de Curso, expresso minha mais profunda gratidão a aqueles que tornaram esta jornada possível.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Dr. Pedro Reggiani Anzuategui. Sua orientação precisa, paciência, disponibilidade e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento e execução deste estudo. Agradeço pela confiança depositada ao aceitar me guiar pelos melhores caminhos para superar os desafios deste projeto.

Ao Dr. Edmar Filho, meus sinceros agradecimentos por disponibilizar o acesso aos equipamentos e materiais do Laboratório de Impressão 3D do Centro de Simulação Prof. Leide Parolin Marinoni. A sua valiosa contribuição, ensinamentos e apoio técnico-científico foram cruciais para a prototipagem dos modelos impressos, sendo uma etapa indispensável para a viabilidade deste estudo.

Um agradecimento especial ao paciente voluntário, que generosamente consentiu com a utilização de seus exames de imagem. Sua colaboração foi o ponto de partida desta pesquisa, permitindo o desenvolvimento de uma ferramenta com potencial para auxiliar muitos outros.

Por fim, dedico esta conquista à minha família, meu alicerce e minha maior motivação. À minha mãe, por todo o amor, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida e formação. À minha companheira, pela paciência infinita, compreensão nos momentos de ausência e por ser o suporte diário que me deu forças para seguir em frente. E ao Atlas, que será para sempre o meu filho querido, obrigado por toda a alegria.

ANEXO 1 - DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO DO CONTEÚDO FINAL

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
COORDENAÇÃO DO CURSO DE MEDICINA

DECLARAÇÃO

Eu, Prof. Dr. Pedro Reggiani Anzuategui, declaro conhecer e aprovar o conteúdo do trabalho intitulado “DESENVOLVIMENTO DE UM GUIA CIRÚRGICO PACIENTE-ESPECÍFICO PARA AUXÍLIO NA FIXAÇÃO PEDICULAR VERTEBRAL” de autoria do estudante Kayo Winiccius Samuel Neves e Silva, GRR 20201417, liberando-o para ser apresentado.

Estou também ciente da necessidade de minha participação na banca examinadora por ocasião da defesa do trabalho.

Curitiba, 15 de novembro de 2025



Documento assinado digitalmente

PEDRO REGGIANI ANZUATEGUI

Data: 15/11/2025 08:48:10-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura digital

ANEXO 2 - RELATÓRIO DE CONCLUSÃO DO TRABALHO DE CURSO

COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA EM SERES HUMANOS DO
COMPLEXO HOSPITAL DE CLÍNICAS DA UFPR

CAEE	79209924.8.0000.0096
TÍTULO DA PESQUISA	DESENVOLVIMENTO DE UM GUIA CIRÚRGICO PACIENTE ESPECÍFICO PARA AUXÍLIO NA FIXAÇÃO PEDICULAR VERTEBRAL
PESQUISADOR PRINCIPAL	PEDRO REGGIANI ANZUATÉGUI
EQUIPE DE PESQUISA	KAYO WINICCIUS SAMUEL NEVES E SILVA

Declaramos para os devidos fins que a pesquisa supracitada, encontra-se com os documentos e relatórios obrigatórios atualizados e incluídos na Plataforma Brasil.

Curitiba, 14 de novembro de 2025.

Danielle Elias da Silva
Matrícula 3003425
Secretária do Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos do CHC/UFPR-Ebserh