



PHYSICAL MODEL OF CIFOSCOLIOTIC CURVE MANUFACTURED BY 3D PRINTING FOR SPINAL SURGICAL PLANNING: A CASE STUDY

MODELO FÍSICO DE CURVA CIFOESCOLIÓTICA PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D PARA PLANEJAMENTO DE CIRURGIA DA COLUNA VERTEBRAL: UM ESTUDO DE CASO

Leticia A. Queiroz¹✉

¹ Instituto Federal de Minas Gerais, Governador Valadares, Brazil

✉ letyqueiroz2020@gmail.com

Received: 06 novembro 2022 / Accepted: 06 março 2023 / Published: 10 março 2023

RESUMO: O planejamento cirúrgico é essencial para melhorar os resultados em intervenções complexas, uma vez que evita desperdício de tempo, a instalação inadequada de instrumentação e reduz o risco relacionado ao procedimento. As cirurgias da coluna vertebral são intrincadas pela proximidade a estruturas importantes do Sistema Nervoso e Circulatório. Durante as últimas décadas, várias ferramentas de diagnóstico por imagem foram desenvolvidas para auxiliar os cirurgiões na visualização pré-operatória da anatomia patológica e, atualmente, destacam-se os esforços para construir modelos 3D físicos, em escala real, proporcionando melhor planejamento e orientação acerca da cirurgia. O objetivo deste trabalho foi criar um modelo da anatomia patológica de um paciente com cifoescoliose a fim de facilitar a compreensão do procedimento cirúrgico. Foi observado que, a partir da construção e utilização do modelo anatômico fabricado por impressão 3D o cirurgião responsável pelo procedimento foi capaz de identificar as estruturas em risco, planejar a ressecção ideal e contar com uma melhor orientação intraoperatória. A utilização do modelo 3D em escala real mostrou-se uma ferramenta poderosa para planejamento cirúrgico, poupando tempo, auxiliando na compreensão adequada da anatomia e diminuindo o risco cirúrgico para o paciente, ao aumentar a precisão e a confiança da equipe cirúrgica.

Palavras-chave: Coluna Vertebral; Processamento de Imagem Assistida por Computador; Impressão Tridimensional

ABSTRACT: Surgical planning is essential to improve results in complex interventions, as it avoids wasted time, inadequate installation of instrumentation and reduces the risk related to the procedure. Spinal surgeries are intricate by proximity to important structures of the Nervous and Circulatory System. During the last decades, several diagnostic imaging tools have been developed to assist surgeons in the preoperative visualization of pathological anatomy and, currently, efforts to build 3D physical, real-scale models, providing better planning and guidance about of the surgery. The objective of this work was to create a model of the pathological anatomy of a patient with kyphoscoliosis in order to facilitate the understanding of the surgical procedure. It was observed that, from the construction and use of the anatomical model manufactured by 3D printing, the surgeon responsible for the procedure was able to identify the structures at risk, plan the ideal resection and rely on better intraoperative guidance. The use of the full-scale 3D model proved to be a powerful tool for surgical planning, saving time, helping to properly understand the anatomy and reducing the surgical risk for the patient, by increasing the accuracy and confidence of the surgical team.

Keywords: Spine; Computer Aided Image Processing; Three-dimensional Printing.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento cirúrgico, de modo especial para intervenções complexas como a correção de deformidades congênitas vertebrais, por exemplo, desempenha papel fundamental na prevenção de falhas e risco de morbidade (Mobbs et al, 2017). O recurso às tecnologias de imagem para o planejamento pré-operatório é útil ao cirurgião para melhorar os resultados dessas intervenções (Manbachi et al, 2014).

As técnicas de visualização de patologias via imagens sofreram um dramático avanço durante as últimas décadas. A evolução experimentada pela Tomografia Computadorizada e a Ressonância Magnética, em especial, tornaram o diagnóstico radiológico menos invasivo e mais informativo (Rengier et al, 2010). Não obstante seja possível a visualização tridimensional das anatomias anômalas com tais tecnologias, essa é restrita a telas bidimensionais, o que constitui uma limitação que, se sanada, poderia facilitar a execução do planejamento cirúrgico.

Como ferramenta possível para confecção de modelos físicos tridimensionais das anatomias-objeto de intervenção cirúrgica, a prototipagem rápida apresenta-se como solução tecnicamente viável por meio da impressão 3D (Eltorai et al., 2015; Wilcox et al., 2017). Mobbs e colaboradores (2017) consideram que a aplicação da impressão 3D na medicina e na cirurgia pode oferecer diversos benefícios, incluindo customização de produtos médicos e implantes, melhora do planejamento pré-operatório, redução do tempo de operação e complexidade cirúrgica, além de posicionamento acurado de próteses e implantes e aprimoramento da produtividade. Lin e colaboradores (2018) veem a possibilidade de produção de modelos anatômicos por impressão 3D utilizando dados de imagens tomográficas como um recurso com impacto positivo na avaliação pré-operatória, planejamento cirúrgico e orientação intraoperativa. Ayoub e colaboradores (2013) reiteram a utilidade desse recurso, afirmando ser desejo de longo tempo para cirurgiões bucomaxilofaciais conduzir um planejamento preventivo para cirurgia ortognática, de posse de um modelo físico que replique com precisão o crânio, ossos mandibulares e dentição. O uso de modelos anatômicos prototipados em impressoras 3D de estruturas craniais e faciais a partir de dados tomográficos, segundo o autor, pode constituir a chave para previsões na cirurgia ortognática.

No entanto, mesmo com o reconhecimento da comunidade científica das vantagens do uso do modelo físico 3D no planejamento cirúrgico, a sua utilização continua sendo, muitas vezes, negligenciada, seja por falta de recursos ou de tempo, por se tratar de uma técnica de alta personalização condicionada a cada caso e infraestrutura do local onde a cirurgia será realizada (Martelli et al., 2016).

Deste modo o objetivo do presente trabalho é criar um modelo físico tridimensional, por impressão 3D, da anatomia patológica da coluna vertebral de um paciente com severa cifoescoliose decorrente de neurofibromatose, a partir de arquivos de tomografia computadorizada, para auxiliar no planejamento cirúrgico e orientação intraoperatória.

Trata-se de uma pesquisa pioneira no Brasil por tratar do emprego de modelo físico 3D, em tamanho real, da coluna.

Uma vez que as cirurgias da coluna vertebral apresentam elevado risco cirúrgico, pela proximidade com estruturas nervosas e vasculares, a impressão 3D de modelos anatômicos tem se revelado recurso facilitador do processo de planejamento cirúrgico, resultando em diminuição dos riscos envolvidos em intervenções dessa natureza e otimização de uso dos recursos demandados pela intervenção cirúrgica. Fazem-se necessários novos estudos que analisem e quantifiquem seus benefícios nessas cirurgias para ambos, médicos e pacientes.

2 MÉTODO

2.1 AMOSTRA

Este estudo consta de um Relato de Caso de um adolescente de 15 anos de idade, sexo masculino, com severa cifoescoliose, decorrente da Doença de Von Recklinghausen (neurofibromatose), evoluindo com sinais neurológicos de paresia e espasticidade em membros inferiores e limitações funcionais, com iminência de paraplegia.

A doença de Von Recklinghausen é uma doença genética caracterizada por tumores no sistema nervoso central e deformidades esqueléticas graves e raras (Oliveira et al, 2012;

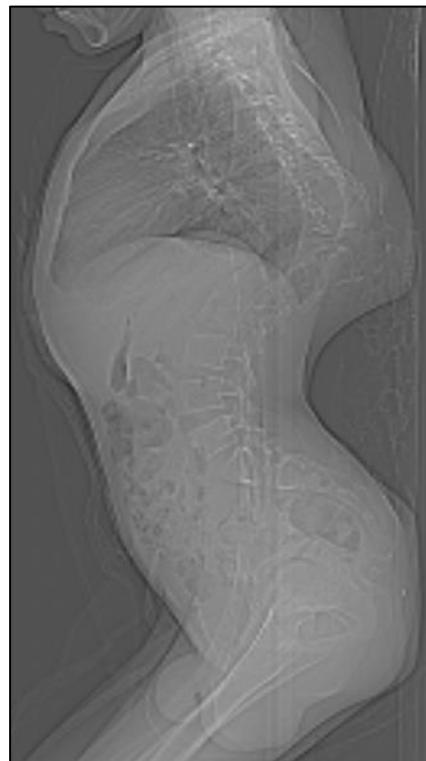
Bergler-Czop *et al*, 2016). No caso aqui tratado, a deformidade consistiu em uma cifoescoliose com desalinhamento biomecânico concentrado na décima primeira vértebra torácica (Figura 1). As demais deformidades são dessa consequência e constituem uma busca do corpo por compensação (Figura 2). Havia, por conta da deformação, estiramento agudo da medula. A escoliose é classificada como de ângulo curto, envolvendo cinco vértebras e resultando numa deformidade pontiaguda severa local. Na neurofibromatose, a angulação aguda e de segmento curto é comum. Essas correspondem às escolioses realmente perigosas para a segurança neurológica do paciente, oferecendo risco de paraplegia, o qual se dá em virtude do estiramento da medula, consequente da agudeza da deformação (Muniz *et al*, 2006; Li *et al.*, 2017).

FIGURA 1 - MODELO TRIDIMENSIONAL TOMOGRÁFICO DA COLUNA DO PACIENTE:



FONTE: AUTORES (2023)

FIGURA 2 - VISTA LATERAL, EM RAIO X, DO TRONCO DO PACIENTE:



FONTE: AUTORES (2023)

O paciente já havia sido examinado por diversos cirurgiões, havendo consenso sobre a necessidade da intervenção cirúrgica; contudo, em decorrência do risco e da dificuldade de visualização da anatomia da deformidade apenas pelos exames de imagem disponíveis, além de fatores como longa internação, demanda por recursos custosos (múltipla cirurgia e tração transcraniana, por exemplo) e dificuldade em encontrar uma equipe com experiência em ressecção vertebral para correção de deformidades.

Os sinais de comprometimento neurológico foram agravando-se rapidamente, repercutindo no parecer cirúrgico. Contudo, a complexidade e severidade da deformidade levaram a equipe médica responsável pelo procedimento executado objeto do presente trabalho a buscar por mais recursos de planejamento cirúrgico, em especial, o modelo físico 3D, em escala real.

2.2 PROCEDIMENTO CIRÚRGICO

Como intervenção cirúrgica, optou-se por uma vertebrectomia estadiada, cujo objetivo foi corrigir parcialmente e estabilizar a evolução dos problemas ocasionados pela doença, vez que a reversão é impossibilitada pelas deformidades que se estruturaram a posteriori e que já se encontravam estáveis para a idade do paciente, com crescimento já em final de processo. Durante a intervenção cirúrgica, a eliminação da curvatura aguda foi prioritária e intervenções corretivas de maior magnitude foram evitadas com vistas a diminuir o risco cirúrgico. Procedeu-se a uma ressecção da 11^a vértebra, vértice da deformidade, com consequente alívio de tensão na medula, cuja monitorização foi realizada durante todo o procedimento por um neurologista, por meio do estímulo do cérebro e membros inferiores. Mais vértebras eram passíveis de remoção, visando maior correção do desalinhamento biomecânico da coluna. O risco ao sistema nervoso e ao sistema circulatório adjacentes, contudo, tornou tal procedimento não compensatório, optando-se, assim, pela priorização do alívio do estiramento da medula. O estadiamento estendeu-se por dois dias, separados por um intervalo de 15 dias, para realização de tração com halo craniano. O primeiro dia correspondeu à etapa de planejamento cirúrgico e dimensionamento da instrumentação, para o qual o modelo impresso foi sobremodo útil, tanto no posicionamento dos parafusos pediculares quanto na visualização da ressecção executada no segundo estágio. O segundo dia foi dedicado à vertebrectomia em si. Durante a tração, o paciente apresentou melhora do quadro neurológico em virtude da diminuição da estrição de seção da medula. Hastes e conectores destinados às manobras de correção do desalinhamento biomecânico precisaram ser adaptados devido à raridade da deformidade.

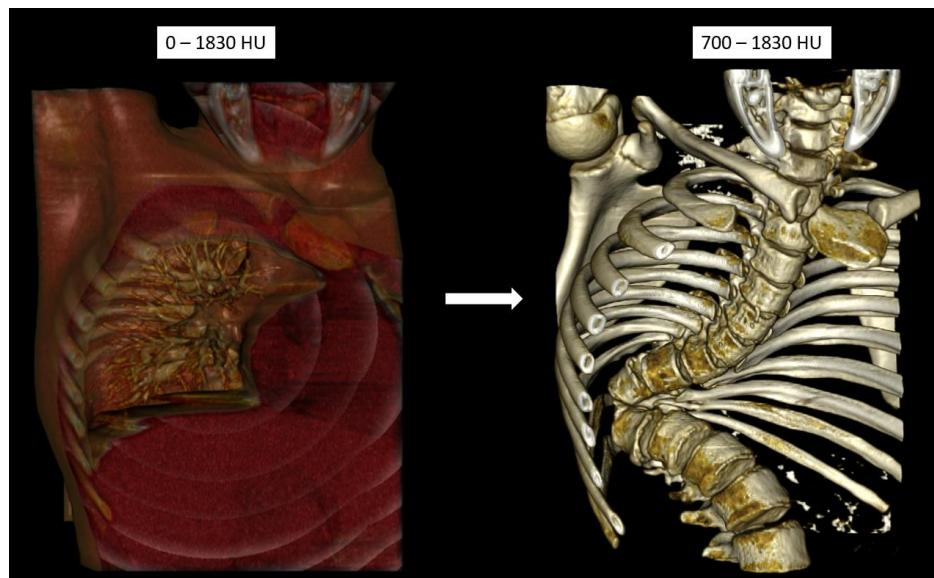
2.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

A confecção de modelos anatômicos tridimensionais a partir de tecnologias de diagnóstico por imagem fundamenta-se, geralmente, na reprodução de uma região de interesse a partir de um conjunto de imagens geradas por radiação X. Diferentemente do processo de aquisição de imagens por radiologia tradicional, que projeta a imagem em um

só plano, a Tomografia Computadorizada (TC) evidencia as relações estruturais em profundidade, apresentando a seção anatômica em coordenadas tridimensionais.

Para a confecção do modelo de estudo deste trabalho utilizou-se 1041 imagens radiográficas, armazenadas em matrizes de 512x512 pixels, com espaçamento padrão de 0,5 mm de espessura entre as seções de reconstrução. O isolamento da região óssea de interesse se deu a partir da definição de visualização do modelo no intervalo de 500 a 1830 em escala de unidade Hounsfield (HU), conforme Figura 3.

FIGURA 3 – DEFINIÇÃO DA REGIÃO DE INTERESSE DO MODELO DE ESTUDO



FONTE: AUTORES (2023)

Após a confecção do modelo tridimensional virtual, a próxima etapa fundamentou-se no pós-processamento do objeto de estudo. Tal etapa foi realizada pelo software MeshMixer, da estadunidense Autodesk, e consistiu da eliminação de ruídos e conversão do modelo para o formato STL (*Stereolithography*), compatível com a máquina de Prototipagem Rápida.

2.4 IMPRESSÃO 3D DO MODELO FÍSICO DA COLUNA VERTEBRAL

Após a estruturação tridimensional da coluna virtual, o pós-processamento e a conversão do objeto para o formato STL, o modelo foi importado para a máquina de Prototipagem Rápida. O processo utilizado para a manufatura do modelo físico da coluna foi a Sinterização Seletiva à Laser (Selective Laser Sintering - SLS), que se fundamenta na construção de modelos físicos, camada por camada, a partir da sinterização de partículas de pó. Nessa técnica, um laser é utilizado para fundir partículas de polímeros, metais ou cerâmicas em uma determinada camada pré-definida do objeto. O conjunto das camadas sinterizadas forma o objeto físico final (Mazzoli, 2012). Para a confecção do modelo físico da coluna utilizou-se a máquina de prototipagem rápida ProX500, do fabricante estadunidense 3D System. O material utilizado para a fabricação consistiu de uma combinação de nylon 12 e polipropileno. Durante o processo de fabricação, a configuração de espaçamento entre as camadas para a sinterização foi de 0,15mm, totalizando 2.000 camadas de construto para o objeto final.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A questão fundamental subjacente ao objetivo deste trabalho é se a disponibilização de um modelo tridimensional impresso da anatomia patológica pode ajudar a equipe cirúrgica a melhor planejar e executar o procedimento operatório. O retorno recebido pelo cirurgião responsável por conduzir toda a intervenção indicou que, com o protótipo disponível, pôde-se executar um planejamento mais eficiente e, além, durante a operação, em transmissão remota, contar com um membro da equipe cirúrgica manipulando-o já com os marcos anatômicos estabelecidos, o que contribuiu para um melhor fechamento da malha de controle mental da equipe, evitando erros na tomada de decisão e tornando as intervenções mais acuradas. A disponibilidade do modelo impresso permitiu, também, a escolha e dimensionamento apropriados do instrumental para a execução da cirurgia: pontos de entrada, quais, quantos e em que direção os componentes deveriam ser implantados para uma correção eficaz, o que evitou a necessidade de tomar esse tipo de decisão durante o ato cirúrgico. Houve substancial aumento de assertividade por parte da equipe cirúrgica.

O cirurgião responsável pela intervenção relatou que se pôde prescindir da construção de um modelo mental da coluna a partir de imagens bidimensionais em virtude da presença do modelo impresso tridimensional (Figura 3), o que resultou em maior segurança dos cirurgiões durante as etapas da intervenção. Sugimoto e colaboradores (2012) corrobora as vantagens de poder avaliar a anatomia do paciente sem a necessidade da construção de um modelo mental, reportando que a utilidade de modelos impressos aumenta com um maior nível de complexidade da anatomia da patologia. Um modelo do trecho em torno da décima primeira vértebra foi também impresso em escala 2:1 e mostrou-se fundamental para visualização de estruturas menores, contribuindo, assim, para a identificação de deformidades cuja anatomia distancia-se notavelmente da anatomia usual da coluna saudável. Uma compreensão estereoscópica da patologia, afirma Wilcox (Wilcox *et al*, 2017), permite planejamento e simulação mais detalhados do processo.

FIGURA 3 – PROTÓTIPO DA COLUNA DO PACIENTE IMPRESSO EM SLS



FONTE: AUTORES (2023)

O cirurgião responsável frisou que ter à disposição apenas chapas tomográficas bidimensionais não seria suficiente para diferenciar apropriadamente cortes tomográficos de

realidade anatômica. A continuidade geométrica propiciada pelo modelo impresso foi essencial para o entendimento das deformidades. Ademais, para além da parte óssea, há ligamentos que não são representados adequadamente pela tomografia em virtude de calcificação e que puderam ser mais facilmente diferenciados pela presença do protótipo. D'Urso (D'Urso *et al*, 1999) endossa o uso de modelos anatômicos impressos como recurso capaz de superar diversas limitações associadas com as tecnologias de imagem tradicionais, destacando a carência de representação anatômica realística.

Para além dos ganhos em visualização anatômica, a presença do modelo impresso impactou o planejamento quando da seleção e instalação dos parafusos pediculares. Usualmente, a passagem de parafusos é feita à mão livre: marcos anatômicos visualizados nas radiografias e tomografias são estabelecidos e, então, com a incisão já feita no paciente, decide-se, após apalpação, sobre o direcionamento, angulação e comprimento dos implantes, visto que, depois de finalizado o acesso cirúrgico, só se torna acessível ao cirurgião a superfície dos elementos ósseos que não estão em contato com outros tecidos. Wu e colaboradores (Wu *et al*, 2011) reiteram o impacto de um modelo impresso na acurácia do posicionamento de parafusos pediculares, comparando-a com a obtida a partir do planejamento cirúrgico através de fluoroscopia. O estudo concluiu que o uso do modelo impresso implicou em menor tempo de operação e maior taxa de correção das escolioses em virtude de uma maior acurácia no posicionamento dos parafusos pediculares.

Wilcox (Wilcox *et al*, 2017), salienta que cirurgias na coluna vertebral são inherentemente arriscadas em virtude da natureza delicada da anatomia circunjacente. O grande risco para o caso de implantação de parafusos reside no seu direcionamento, pois, para se ter segurança em relação às estruturas neurológicas e vasculares que cruzam seus trajetos, estes devem manter-se, em toda a sua extensão, internamente a estruturas ósseas denominadas pedículos. Pacientes sujeitos a cirurgias dessa complexidade, com deformidades anatômicas difíceis, experimentam uma possibilidade crescente de falha dos implantes, de modo especial se um alto grau de customização é demandado. Daí ser potencialmente indesejável o método de inserção dos implantes a partir de marcos anatômicos estabelecidos em imagens bidimensionais, vez que sua acurácia e eficácia

dependem fortemente da experiência do cirurgião (Wilcox *et al*, 2017). Liu e colaboradores (Liu *et al*, 2016) reafirmam a superação de limitações de ferramentas correntes para suporte à passagem dos implantes, como a Cirurgia Assistida por Computador, pelo uso de prototipagem rápida. Essas limitações incluem o excessivo custo, mão-de-obra adicional durante a operação, aumento do tempo de cirurgia, além de uma curva de aprendizado mais lenta. Ademais, os custos cirúrgicos adicionados pelo modelo impresso são absorvidos por uma maior eficiência no planejamento e intraoperatória (Izatt *et al*, 2007; Wang *et al*, 2016).

A visualização, no modelo, da superfície da coluna ocultada por músculos e outros tecidos no paciente também contribuiu para uma melhor tomada de decisão durante a intervenção cirúrgica. Pela espessura e geometria do osso visível, pôde-se saber antecipadamente quão próximo ou longe se estava da face não visível durante a apalpação. A maior segurança e acurácia evitou interrupções do procedimento para realização de radiografias, o que é reiteradamente reportado na literatura como indesejável, em virtude da exposição de paciente e equipe cirúrgica à radiação (Guo *et al*, 2017; Lu *et al*, 2011; Chen *et al*, 2016). O aumento de previsibilidade do processo refletiu na confiança e tranquilidade da equipe cirúrgica.

5 CONCLUSÃO

O cirurgião responsável enxergou o uso do modelo impresso como recurso facilitador do planejamento pré-operatório e orientação intraoperatória para o procedimento cirúrgico executado, para cirurgias de mesmo nível de complexidade e, além, para planejamento de cirurgias de menor nível de complexidade, mas em anatomias de geometria intrincada, como, por exemplo, o osso da pelve. A utilização do modelo 3D em escala real mostrou-se uma ferramenta poderosa para planejamento cirúrgico, poupando tempo, auxiliando na compreensão adequada da anatomia e diminuindo o risco cirúrgico para o paciente, ao aumentar a precisão e confiança da equipe cirúrgica durante a operação. O modelo foi visto como um ganho substancial para quaisquer cirurgias ortopédicas em que a anatomia patológica a sofrer a intervenção seja peculiar, ou seja, distancie-se significativamente da anatomia ordinária esperada pelo cirurgião.

REFERÊNCIAS

- Arnoff, E. (2017). **A LITERATURE REVIEW ON** by, 3(8), 14–22.
- Ayoub, A. F., Rehab, M., O’Neil, M., Khambay, B., Ju, X., Barbenel, J., & Naudi, K. (2014). A novel approach for planning orthognathic surgery: The integration of dental casts into three-dimensional printed mandibular models. **International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery**, 43(4), 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2013.08.016>.
- Lin, H. H., Lonic, D., & Lo, L. J. (2018). 3D printing in orthognathic surgery – A literature review. **Journal of the Formosan Medical Association**, 117(7), 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.jfma.2018.01.008>.
- Mobbs, R. J., Coughlan, M., Thompson, R., Sutterlin, C. E., & Phan, K. (2017). The utility of 3D printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: case report. **Journal of Neurosurgery: Spine**, 26(4), 513–518. <https://doi.org/10.3171/2016.9.SPINE16371>.
- Prajogo, D. I. (2004). Inside Continuous Improvement - a Literature Review. **Jurnal Teknik Industri**, 2(2), 65–71.
- Ronald Moen. (2009). **Foundation and History of the PDSA Cycle. Associates in Process Improvement-Detroit (USA)**, 2–10. Retrieved from https://www.deming.org/sites/default/files/pdf/2015/PDSA_History_Ron_Moen.pdf.
- Tam, M. D., Laycock, S. D., Bell, D. G., & Chojnowski, A. (2012). 3-D printout of a DICOM file to aid surgical planning in a 6 year old patient with a large scapular osteochondroma complicating congenital diaphyseal aclasia. **Journal of Radiology Case Reports**, 6(1), 31–37. <https://doi.org/10.3941/jrcr.v6i1.889>.
- Van Assche, N., Van Steenberghe, D., Guerrero, M. E., Hirsch, E., Schutyser, F., Quirynen, M., & Jacobs, R. (2007). Accuracy of implant placement based on pre-surgical planning of three-dimensional cone-beam images: A pilot study. **Journal of Clinical Periodontology**, 34(9), 816–821. <https://doi.org/10.1111/j.1600-051X.2007.0111>.
- Bergler-Czop B, Miziołek B, Brzezińska-Wcisło L. **Von recklinghausen disease: one patient–various problems.** **Balkan Journal of Medical Genetics.** 2016 Jun 1;19(1):95-102.
- Li Y, Luo M, Wang W, Shen M, Xu G, Gao J, Xia L. **A Computed Tomography-Based Comparison of Abnormal Vertebrae Pedicles Between Dystrophic and Nondystrophic Scoliosis in Neurofibromatosis Type 1.** **World neurosurgery.** 2017 Oct 1;106:898-904.
- Wilcox B, Mobbs RJ, Wu AM, Phan K. Systematic review of 3D printing in spinal surgery: the current state of play. **Journal of Spine Surgery.** 2017 Sep;3(3):433.

Eltorai AE, Nguyen E, Daniels AH. **Three-dimensional printing in orthopedic surgery.** *Orthopedics*. 2015 Nov 11;38(11):684-7.

Martelli N, Serrano C, van den Brink H, Pineau J, Prognon P, Borget I, El Batti S. **Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: a systematic review.** *Surgery*. 2016 Jun 1;159(6):1485-500.

Provaggi E, Leong JJ, Kalaskar DM. Applications of 3D printing in the management of severe spinal conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: **Journal of Engineering in Medicine**. 2017 Jun;231(6):471-86.