

# ANÁLISE NUMÉRICA DE INSTRUMENTAÇÃO CURTA E LONGA NO TRATAMENTO DAS FRATURAS TORACOLOMBARES CONSIDERANDO PORÇÃO LIGAMENTAR

NUMERICAL ANALYSIS OF SHORT AND LONG INSTRUMENTATION IN THE TREATMENT OF THORACOLUMBAR FRACTURES CONSIDERING THE LIGAMENOUS PORTION

ANÁLISIS NUMÉRICA DE INSTRUMENTACIÓN CORTA Y LARGA EN EL TRATAMIENTO DE LAS FRACTURAS TORACOLUMBARES CONSIDERANDO LA PORCIÓN LIGAMENTARIA

ANDRÉ RAFAEL HUBNER,<sup>1</sup> DANILO MOURÃO RIBEIRO,<sup>2</sup> EDUARDO DASSOLER,<sup>3</sup> DANIEL GASPARIN,<sup>3</sup> CHARLES LEONARDO ISRAEL,<sup>3,4,5</sup> LEANDRO DE FREITAS SPINELLI<sup>3,4,5,6</sup>

1. Instituto de Ortopedia e Traumatologia, Hospital São Vicente de Paulo, Programa de Fellowship da Coluna Vertebral, Residência Médica de Ortopedia e Traumatologia, Passo Fundo, RS, Brasil.

2. Instituto de Ortopedia e Traumatologia, Hospital São Vicente de Paulo, Serviço de Cirurgia da Coluna Vertebral, Passo Fundo, RS, Brasil.

3. Universidade de Passo Fundo, Departamento de Engenharia Mecânica, Passo Fundo, RS, Brasil.

4. Universidade de Passo Fundo, Programa de Pós-Graduação de Projeto e Processos de Fabricação, Passo Fundo, RS, Brasil.

5. Universidade de Passo Fundo, Laboratório de Bioengenharia, Biomecânica e Biomateriais, Passo Fundo, RS, Brasil.

6. Irmandade da Santa Casa de Misericórdia, Serviço de Ortopedia e Traumatologia, Porto Alegre, RS, Brasil.

## RESUMO

**Objetivo:** Este trabalho tem como objetivo avaliar numericamente o tratamento cirúrgico das fraturas toracolumbares, comparando a resistências entre as fixações longas e curtas usando o pedículo da vértebra fraturada, levando-se em conta os ligamentos supra-espinhal, intertransversal e longitudinal anterior. **Métodos:** Foi realizada uma análise numérica das técnicas de fixação longa e curta de uma fratura da coluna toracolumbar, utilizando-se imagens de tomografia computadorizada que foram convertidas em modelos tridimensionais e analisados através do programa ANSYS. Os dois tipos de tratamentos foram analisados considerando-se as tensões geradas no período pós-operatório imediato, quando a fratura ainda não está consolidada. Foram adicionados os ligamentos longitudinal anterior, posterior, supra-espinhal e intertransversal, além de se considerar diferentes geometrias vertebrais. **Resultados:** Levando em consideração que a tensão máxima de ruptura do material utilizado no implante metálico, no caso o titânio, ser de 960 MPa, a maior tensão encontrada na análise da instrumentação curta foi de 346,83 MPa, atingindo apenas 36,13% da carga que o material suporta, estando, portanto, dentro de um limite de segurança. A análise realizada na coluna com instrumentação longa verificou o valor de tensão mais elevado de 229,22 MPa. **Conclusão:** Considerando os valores encontrados e a resistência do material de síntese utilizado, a utilização da fixação curta e longa podem ser consideradas no tratamento das fraturas toracolumbares apresentando similaridade e um bom coeficiente de segurança. **Nível de Evidência III; Caso-Control.**

**Descritores:** Cirurgia/Coluna Vertebral; Fraturas; Análise Elementos Finitos; Procedimentos Cirúrgicos Operatórios.

## ABSTRACT

**Objective:** This study aims to numerically evaluate the surgical treatment of thoracolumbar fractures, comparing the strengths between the long and short fixations using the pedicle of the fractured vertebra, taking into account the supraspinous, intertransverse, and anterior longitudinal ligaments. **Methods:** A numerical analysis of the techniques of long and short fixation of a thoracolumbar spine fracture was performed using computed tomography images that were converted into three-dimensional models and analyzed through the ANSYS program. The two types of treatments were analyzed considering the tensions generated in the immediate postoperative period, when the fracture has not yet been consolidated. The anterior, posterior, supraspinous and intertransverse longitudinal ligaments were added, in addition to considering different vertebral geometries. **Results:** Taking into account that the maximum tensile stress of the material used in the metal implant, in the case of titanium, was 960 MPa, the highest tension found in the analysis of the short instrumentation was 346,83 MPa, reaching only 36,13% of the load the material supports, being, therefore, within a safety limit. The analysis performed in the spine with long instrumentation showed the highest tension value of 229,22 MPa. **Conclusions:** Considering the values found and the resistance of the synthesis material used, the short and long fixation can be considered in the treatment of thoracolumbar fractures with similarity and a good safety coefficient. **Level of Evidence III; Case-Control.**

**Keywords:** Surgery/Spine; Fractures; Finite Element Analysis; Surgical Procedures, Operative.

## RESUMEN

**Objetivo:** Este trabajo tiene como objetivo evaluar numéricamente el tratamiento quirúrgico de las fracturas toracolumbares, comparando las resistencias entre las fijaciones largas y cortas usando el pedículo de la vértebra fraturada, teniendo en cuenta los ligamentos supraespinhal, intertransverso y longitudinal anterior. **Métodos:** Se realizó un análisis numérico de las técnicas de fijación larga y corta de una fractura de la columna toracolumbar, utilizando imágenes de tomografía computarizada que se convirtieron en modelos tridimensionales y fueron analizadas con el programa ANSYS. Los dos tipos de tratamiento fueron analizados considerando las tensiones generadas en el

Trabalho realizado no Laboratório de Bioengenharia, Biomecânica e Biomateriais da Universidade de Passo Fundo e Serviço de Cirurgia da Coluna do Hospital São Vicente de Paulo, RS, Brasil.

Correspondência: André Rafael Hubner, Rua Uruguai, 2050, Passo Fundo, RS, Brasil. 99010-112. pesquisa2@hsvp.com.br

<http://dx.doi.org/10.1590/S1808-185120191802195561>



período postoperatorio inmediato, cuando la fractura aún no está consolidada. Se añadieron los ligamentos longitudinal anterior, posterior, supraespinal e intertransverso, además de considerar diferentes geometrías vertebrales. Resultados: Teniendo en cuenta que la tensión máxima de ruptura del material utilizado en el implante metálico, en el caso el titanio, fue de 960 MPa, la mayor tensión encontrada en el análisis de la instrumentación corta fue de 346,83 MPa, alcanzando apenas el 36,13% de la carga que el material soporta, estando, por lo tanto, dentro de un límite de seguridad. El análisis realizado en la columna con instrumentación larga mostró el valor de tensión más elevado de 229,22 MPa. Conclusiones: Teniendo en cuenta los valores encontrados y la resistencia del material de síntesis utilizado, la utilización de la fijación corta y larga puede ser considerada en el tratamiento de las fracturas toracolumbares presentando similitud y un buen coeficiente de seguridad. **Nivel de Evidencia III, Caso-Control.**

**Descritores:** Cirugía/Columna Vertebral; Fracturas; Análisis de Elementos Finitos; Procedimientos Quirúrgicos Operativos.

## INTRODUÇÃO

As fraturas toracolumbares tem uma distribuição variada, porém, a maior parte das lesões acometem as vértebras de T12 e L1, sendo que as lesões do tipo explosão representam até 20% destas.<sup>1</sup> Existe uma divisão bimodal em relação a idade dos indivíduos com fraturas toracolumbares, onde nos jovens, existe uma prevalência de fraturas por traumas de alta energia como acidentes automobilísticos e quedas de grandes alturas enquanto nos idosos são acometidos por traumas de baixa energia como quedas da própria altura.<sup>2-4</sup> A incidência anual dessas fraturas é cerca de 13 para cada 100,000 habitantes e é dois vezes mais prevalente em pacientes do sexo masculino em relação ao feminino.<sup>5</sup>

Não existe consenso para o tratamento das fraturas da região toracolumbar. Alguns autores defendem apenas a fixação posterior, outros apenas o acesso anterior ao seguimento lesionado, enquanto a combinação da via anterior e posterior também tem sido indicada baseada em estudos biomecânicos.<sup>6-8</sup> O método de fixação com montagens longas, fixando-se de dois a três níveis acima e abaixo da vértebra fraturada é utilizado de forma mais clássica.<sup>1,7,9,10</sup> Entretanto fixar a fratura incluindo os pedículos da vértebra fraturada e apenas um nível acima e um abaixo mostra-se uma boa alternativa economizando-se em tempo cirúrgico, lesionando menos os tecidos adjacentes e levando a um menor custo do procedimento.<sup>1</sup>

Este trabalho tem como objetivo avaliar numericamente o tratamento cirúrgico das fraturas toracolumbares, comparando a resistências entre as fixações longas e curtas usando o pedículo da vértebra fraturada, levando-se em conta o ligamento supraespinal, intertransversal e longitudinal anterior para, com isso, poder evidenciar-se que a utilização da técnica de fixação curta se faz válida e sem risco de falha de material.

## MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi aprovada pelo Comitê de Ética da Universidade de Passo Fundo. O modelo da coluna toracolumbar

foi obtido de um paciente do sexo masculino (80kg e 1,80m sem doença na coluna vertebral) através de imagens de tomografia computadorizada armazenadas como arquivos do tipo DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*). Para que o modelo geométrico se assemelhasse com a realidade, foi necessário fazer uma série de conversões e modelamentos em softwares distintos. A simulação numérica foi realizada utilizando o programa ANSYS (ANSYS, INC). Vértebras T11-L3 foram consideradas para fixação longa, e T12-L2 vértebras para fixação curta. Realizou-se a modelagem de três ligamentos da coluna vertebral em um software de modelagem tridimensional, o Pro-Engineer (PTC, Inc.) software. Os ligamentos modelados foram o ligamento supraespinal, o ligamento longitudinal anterior e posterior e os ligamentos intertransversais.

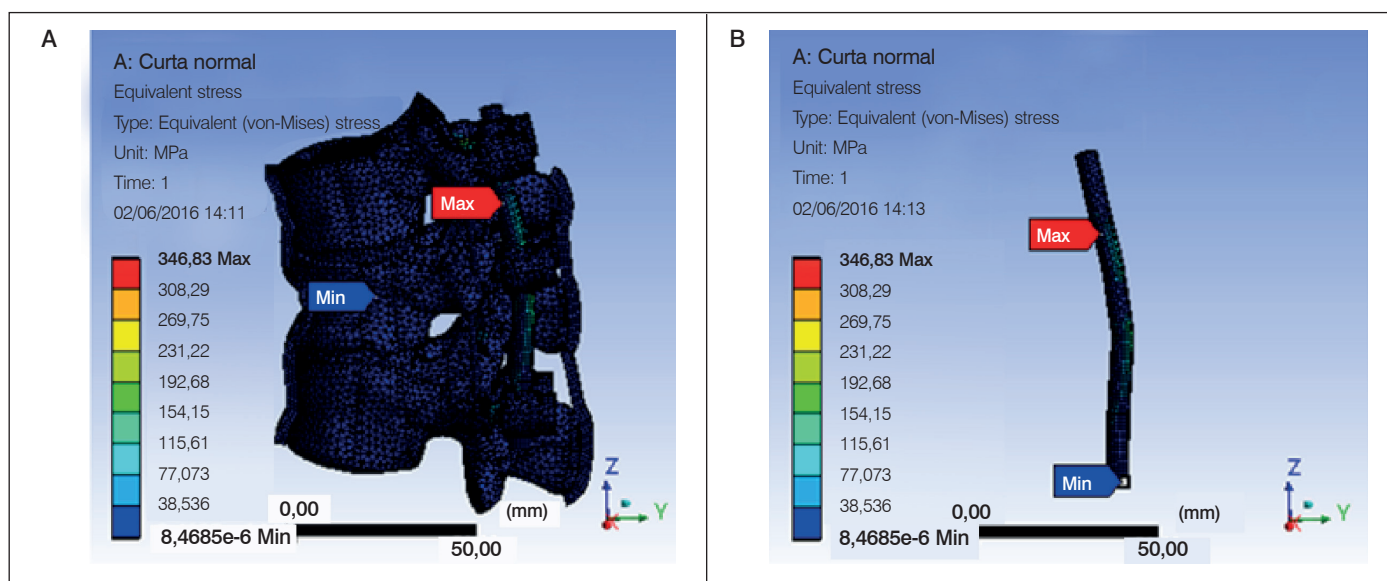
Após modelar os ligamentos nas colunas obtidas, foram utilizados alguns comandos do software PTC para gerar os novos modelos tridimensionais, com dimensões 10% e 20% maiores e 10% e 20% menores que a coluna modelada inicialmente. Os modelos tridimensionais foram importados para o software ANSYS e como condições de contorno, aplicou-se na vértebra superior de cada conjunto uma força de 1000N.

## RESULTADOS

A análise realizada na coluna com artrodese curta e tamanho normal apresentou o valor de tensão mais elevado pela Teoria de Von Mises, 346,83 Mpa, conforme pode ser visto na Figura 1.

Na coluna com artrodese curta e modelo tridimensional ampliado em 10% do tamanho normal, verificou-se que o valor de tensão mais elevado pela Teoria de Von Mises foi de 333,96 MPa, conforme pode ser visto na Figura 2.

Nos testes feitos na coluna com instrumentação curta e modelo tridimensional reduzido em 10%, verificou-se que o valor de tensão mais elevado pela Teoria de Von Mises foi de 346,44 Mpa, conforme Figura 3.



**Figura 1.** Modelo de instrumentação curta analisado e ponto de máxima tensão.

No modelo com instrumentação curta ampliado em 20% do tamanho normal, verificou-se que o valor de tensão mais elevado pela Teoria de *Von Mises* foi de 263 MPa, conforme pode ser visto na Figura 4.

No modelo tridimensional reduzido em 20% do tamanho normal, com técnica de fixação curta, verificou-se que o valor de tensão mais elevado pela Teoria de *Von Mises* foi de 334,77 MPa, conforme pode ser visto na Figura 5.

No modelo da coluna com artrodese longa e tamanho normal, verificou-se que o valor de tensão mais elevado pela Teoria de *Von Mises* foi de 210,28 MPa, conforme visto na Figura 6.

Na análise realizada na coluna com instrumentação longa e modelo tridimensional ampliado em 10%, apresentando o maior valor de tensão pela Teoria de *Von Mises* de 220,2 MPa, conforme pode ser visto na Figura 7.

A análise realizada na coluna com instrumentação longa e modelo reduzido em 10%, verificou que o valor de tensão mais elevado pela Teoria de *Von Mises* foi de 229,22 MPa, conforme Figura 8.

Na coluna com instrumentação longa e modelo tridimensional ampliado em 20%, o valor de tensão mais elevado pela Teoria de *Von Mises* foi de 180,96 MPa, conforme pode ser visto na Figura 9.

A última análise foi realizada na coluna com instrumentação longa e modelo tridimensional reduzido em 20%, o valor de tensão

mais elevado pela Teoria de *Von Mises* foi de 181,29 MPa, conforme pode ser visto na Figura 10.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores máximos de tensões encontrados, sua localização e relação da tensão encontrada com a limite do material.

## DISCUSSÃO

Neste estudo, o tratamento cirúrgico de fraturas toracolombares foi avaliado numericamente pela teoria de *Von Mises*, comparando-se a fixação longa e curta, a qual usa-se o pedículo da vértebra fraturada. Vários autores têm apresentado análises numéricas de técnicas cirúrgicas para fixação das fraturas toracolombares, porém nenhum estudou diretamente os tipos de tratamentos abordados neste estudo.

Hubner et al<sup>1</sup> realizaram um estudo onde os dois tipos de tratamento cirúrgico (fixação curta e longa) foram avaliados clinicamente e radiograficamente e os autores concluíram que não houve diferença significativa entre as técnicas utilizadas. Estudos biomecânicos sugerem que realizar fixação envolvendo os pedículos da vértebra fraturada aumentam a estabilidade biomecânica.<sup>11-14</sup>

Para doenças degenerativas, alguns estudos considerando modelos de tratamentos por via anterior e posterior foram considerados.<sup>15,16</sup>

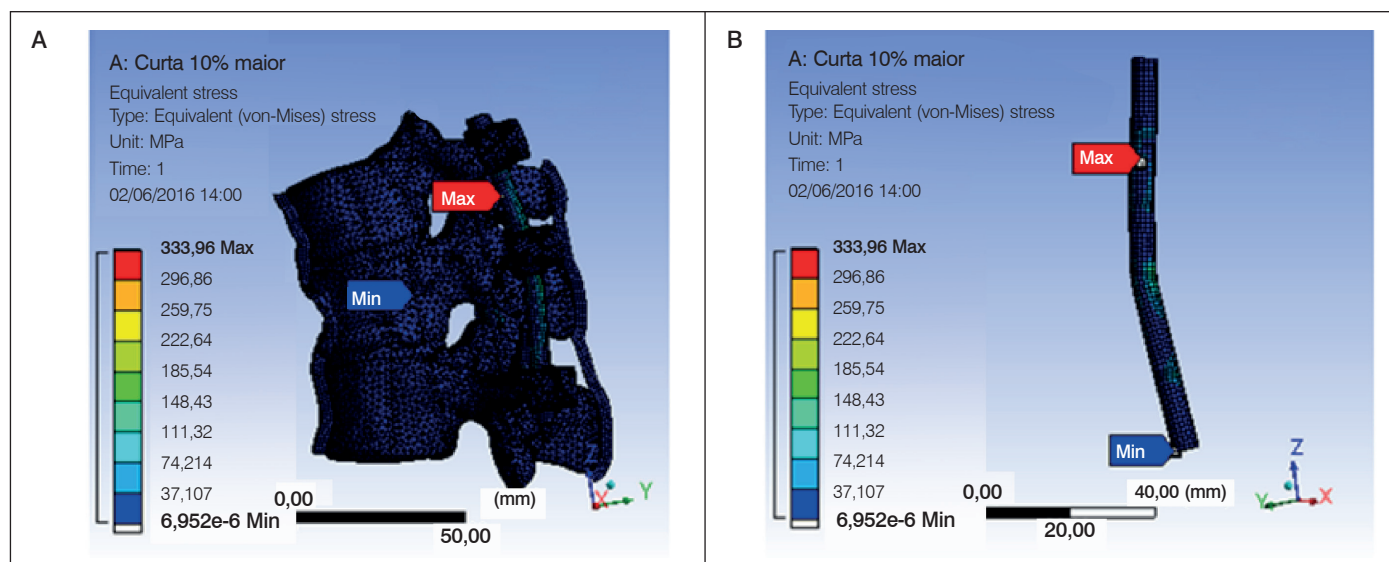


Figura 2. Modelo com instrumentação curta a 10% maior analisado e ponto de máxima tensão.

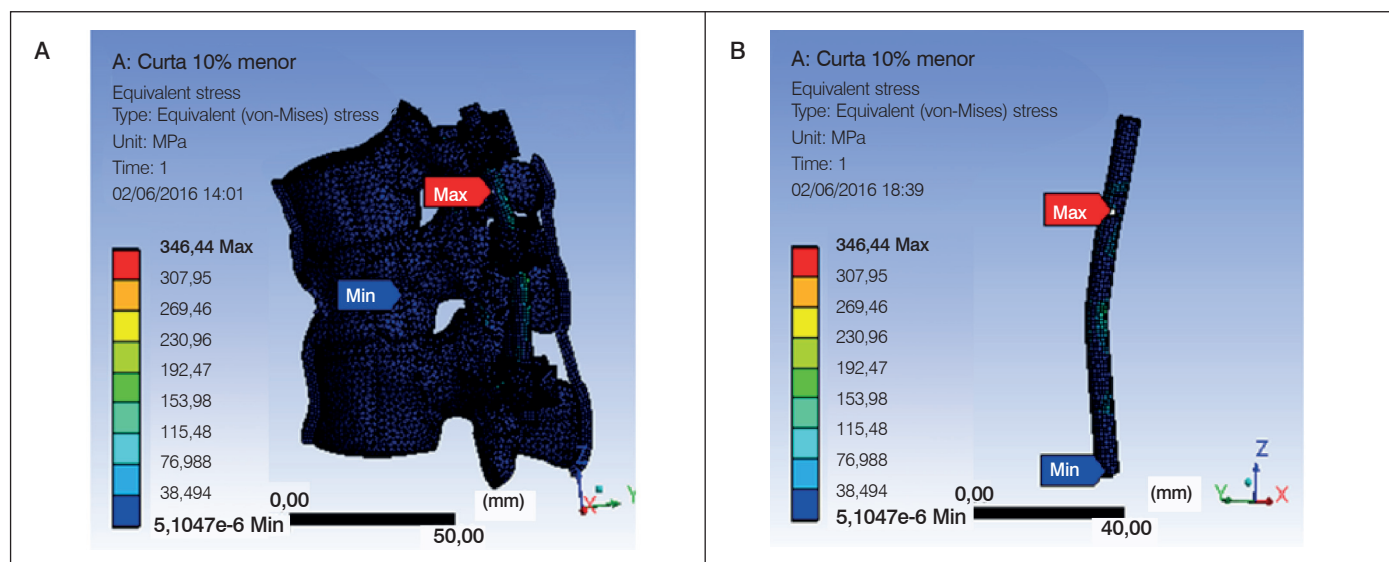


Figura 3. Modelo com instrumentação curta a 10% menor analisado e ponto de máxima tensão.

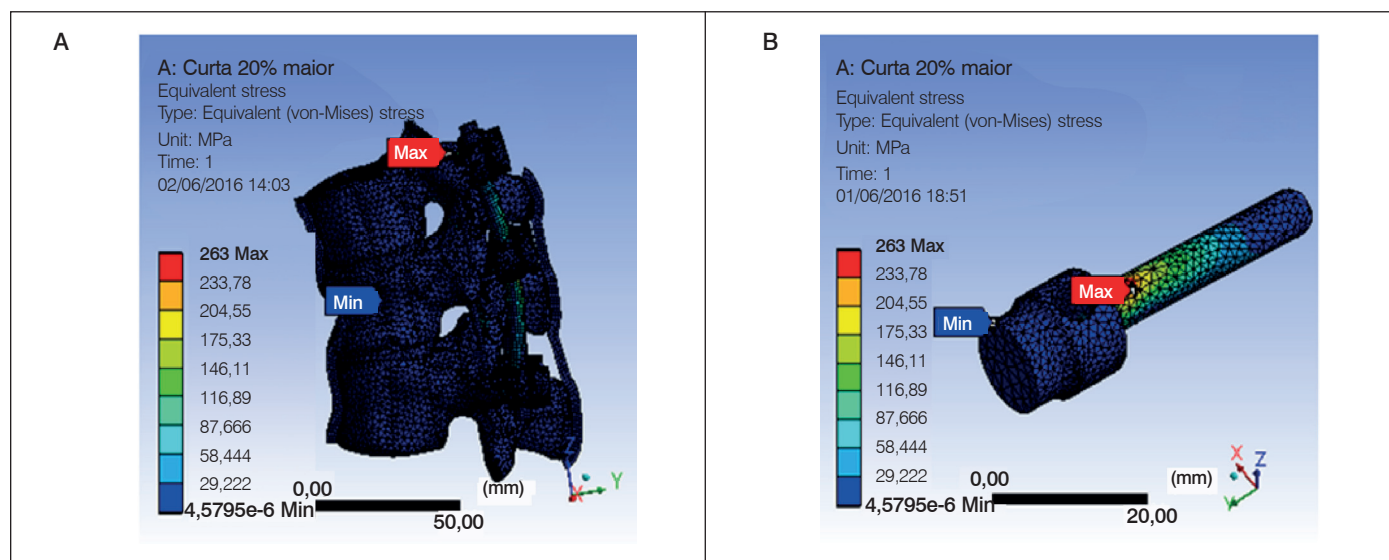


Figura 4. Modelo com instrumentação curta a 20% maior analisado e ponto de máxima tensão.

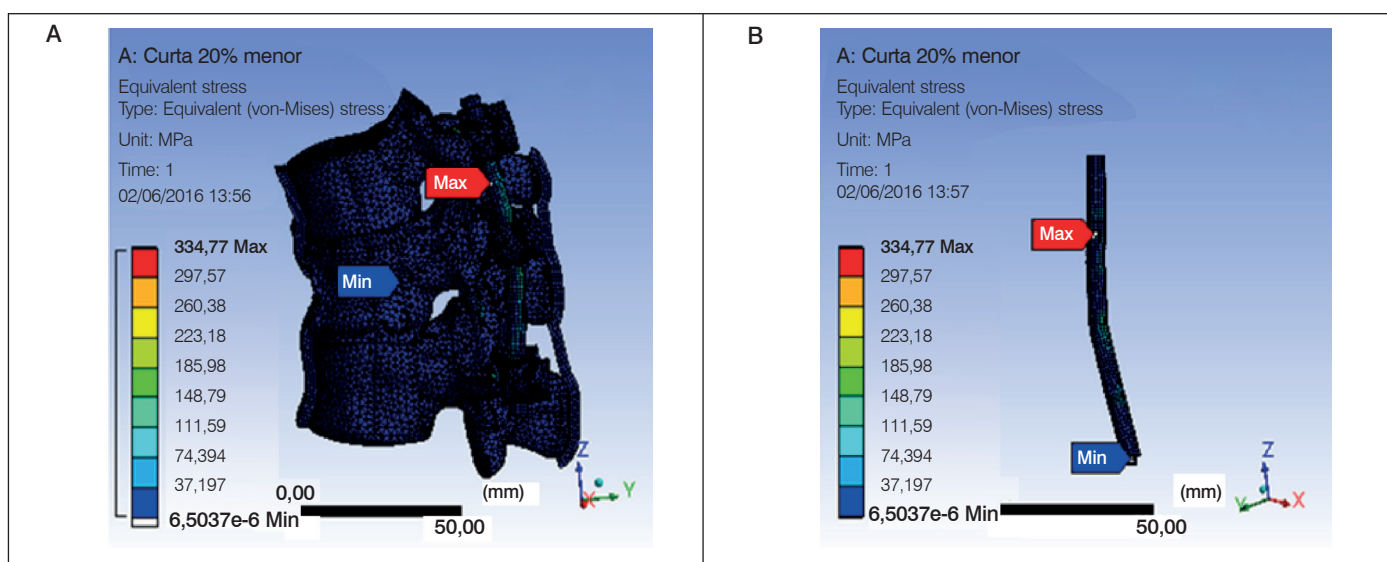


Figura 5. Modelo com instrumentação curta a 20% menor analisado e ponto de máxima tensão.

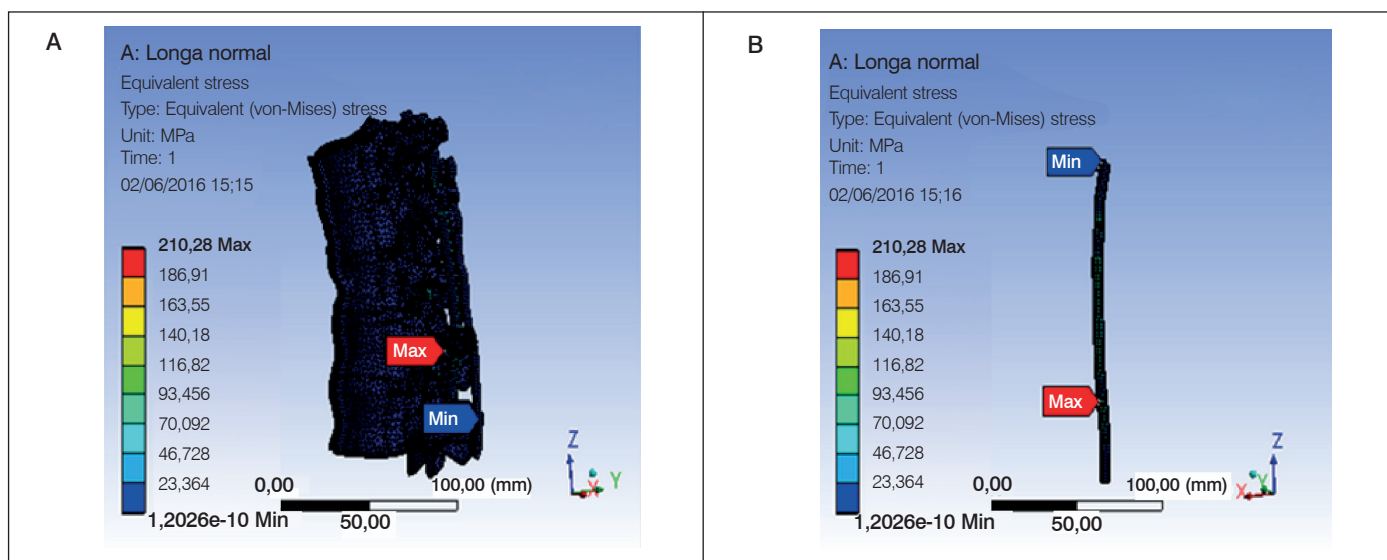


Figura 6. Modelo com instrumentação longa analisado e ponto de máxima tensão.

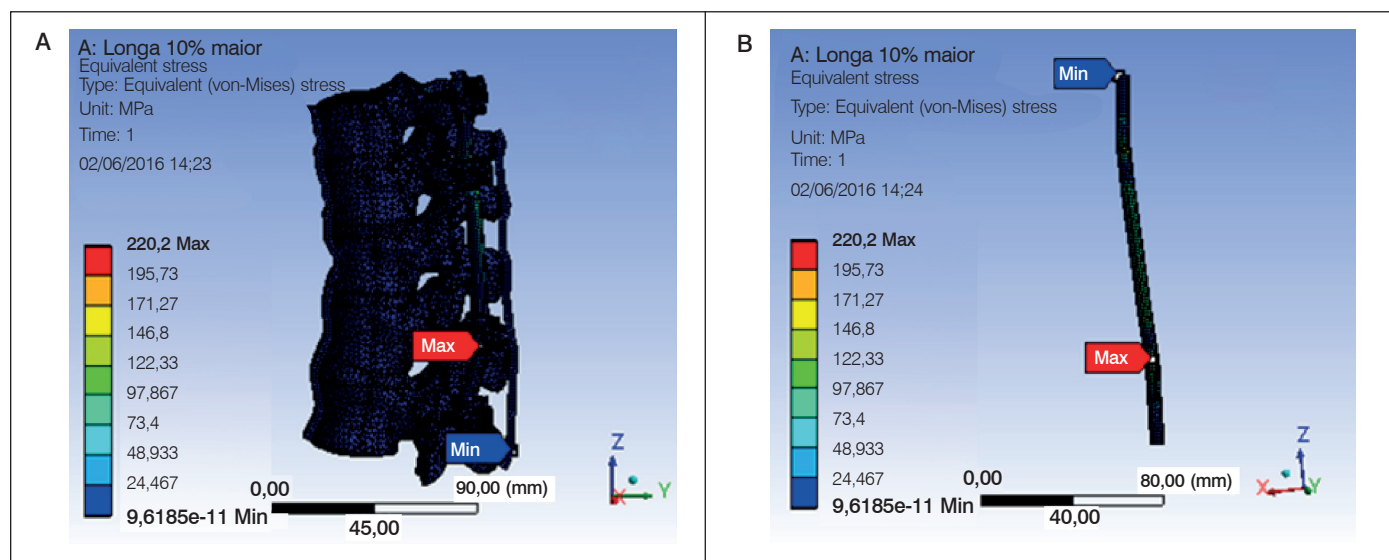


Figura 7. Modelo com instrumentação longa a 10% maior analisado e ponto de máxima tensão.

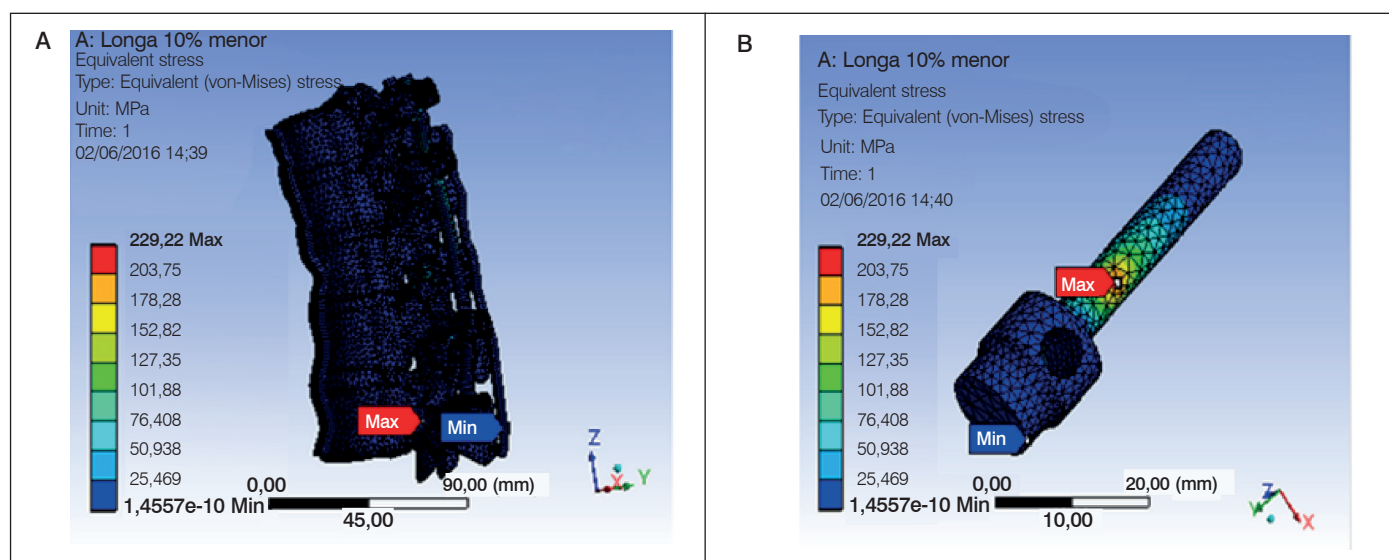


Figura 8. Modelo com instrumentação longa a 10% menor analisado e ponto de máxima tensão.

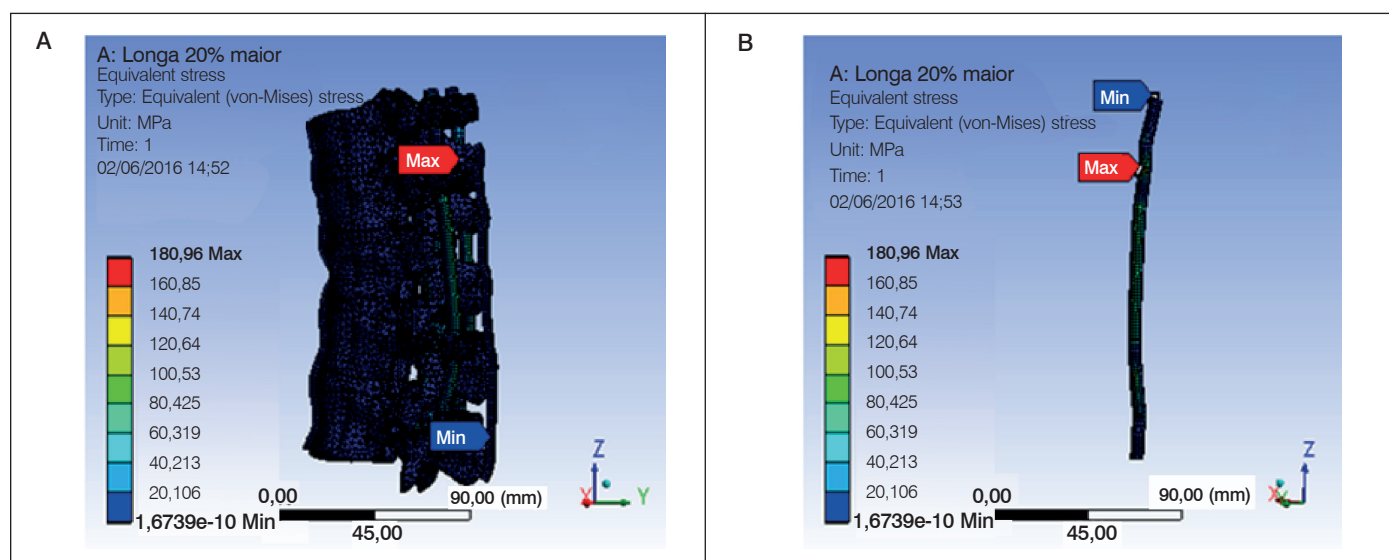


Figura 9. Modelo com instrumentação longa a 20% maior analisado e ponto de máxima tensão.

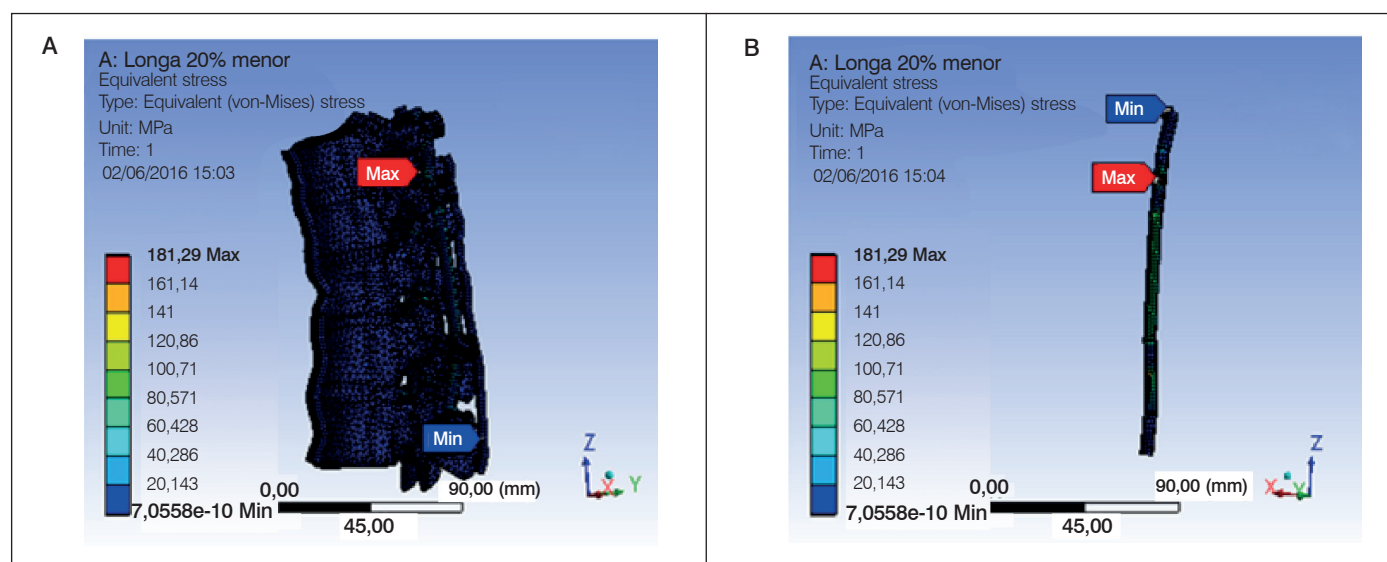


Figura 10. Modelo com instrumentação longa a 20% menor analisado e ponto de máxima tensão.

Table 1. Tensões máximas encontradas nas análises, local e porcentagem da força em relação a resistência do titânio.

| Análise         | Tensão Máxima (MPa) | Local onde foi encontrado a máxima tensão | Porcentagem da força analisada em relação a resistência do titânio |
|-----------------|---------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Curta Normal    | 346,83              | Haste                                     | 36,13%                                                             |
| Curta 10% Maior | 333,96              | Haste                                     | 34,79%                                                             |
| Curta 10% Menor | 346,44              | Haste                                     | 36,09%                                                             |
| Curta 20% Maior | 263                 | Parafuso                                  | 27,40%                                                             |
| Curta 20% Menor | 334,77              | Haste                                     | 34,87%                                                             |
| Longa Normal    | 210,28              | Haste                                     | 21,90%                                                             |
| Longa 10% Maior | 220,2               | Haste                                     | 22,94%                                                             |
| Longa 10% Menor | 229,22              | Parafuso                                  | 23,88%                                                             |
| Longa 20% Maior | 180,96              | Haste                                     | 18,85%                                                             |
| Longa 20% Menor | 181,29              | Haste                                     | 18,88%                                                             |

Liet *et al.*, utilizaram métodos numéricos para avaliar a fixação curta com e sem utilização dos pedículos bilateralmente da vértebra fratura e concluíram que a inclusão dos pedículos bilateralmente aumentava a resistência a estresses e diminuía a tensão nos sistemas de fixação, além de otimizar a fixação interna, diminuindo a incidência de falha de síntese.<sup>17,18</sup> Sun *et al.*, avaliaram o tratamento cirúrgico de fraturas toracolumbares com fixação curta incluindo parafusos pediculares bilaterais e unilaterais nas vértebras fraturadas e observaram resultados clínicos e radiográficos semelhantes nos dois grupos.<sup>19</sup> Quellet *et al.*, fizeram estudo biomecânico comparando a resistência da instrumentação com parafusos divergente ou parafusos paralelos através de 1- partículas finitas, 2- modelo sintético e 3- cadáver humano não evidenciando maior resistência na montagem com parafusos divergentes.<sup>20</sup> Outros autores fizeram estudos biomecânicos utilizando análise numérica de elementos finitos com diferentes tipos de técnicas, porém nenhum fez estudo específico comparando a fixação longa e curta incluindo os pedículos da vértebra fraturada.<sup>21-23</sup>

Hübner *et al.*,<sup>7</sup> mostraram a análise da força submetida ao metal em implantes de instrumentação espinhal, para o tratamento de fraturas toracolumbares, analisando as técnicas de fixação curta e longa, não observando diferença considerável no estresse sofrido pela síntese nas duas técnicas, porém no estudo não foi considerado variação de tamanho dos pacientes e nem partes moles como os ligamentos que fazem parte das estruturas que estabilizam a coluna.

Nesta pesquisa, nota-se que quatro das cinco análises feitas na instrumentação curta a maior tensão está localizada na parte superior da haste. Apenas a análise com o modelo tridimensional ampliado em 20% teve a maior tensão no parafuso. Também é visto que, independentemente do tamanho do modelo tridimensional analisado as maiores tensões localizaram-se na parte superior do

implante metálico. Porém, dependendo da geometria, o local da tensão máxima pode mudar. O valor médio das tensões máximas encontradas nas análises curtas foi de 325 MPa.

Por outro lado, as análises da artrodese longa se comportaram de maneira diferente. Em duas análises realizadas, a tensão máxima foi encontrada na parte inferior da haste. Em outra análise, a tensão máxima foi encontrada em um parafuso na parte inferior e nas outras duas análises a tensão máxima foi encontrada na parte superior da haste. No caso da artrodese longa, se alterarmos o tamanho do modelo tridimensional, os pontos de maior tensão alteram com mais facilidade do que nos modelos curtos. Isto demonstra que a instrumentação curta pode ser mais estável do que a longa, apesar de apresentar valores maiores de tensões. O valor médio das tensões máximas encontradas nas análises com instrumentações longas foi de 204,39 MPa.

Levando em consideração a tensão máxima de ruptura do material utilizado no implante metálico, no caso do titânio, de 960 MPa, a maior tensão encontrada na análise curta normal foi 346,83 MPa, atingindo apenas 36,13% do que o material suporta e, portanto, apresentando um bom coeficiente de segurança.

Neste trabalho foi utilizado um modelo tridimensional da coluna considerando tamanhos diferentes e alguns ligamentos responsáveis pela estabilidade da coluna, porém a musculatura não foi levada em consideração e nem algumas variações anatômicas inerentes a alguns pacientes. O modelo utilizado foi de uma vértebra normal sem nenhuma patologia de base como osteoporose de modo que talvez um estudo levando isso em conta possa ser necessário para concluir se esta técnica pode ser utilizada com segurança em indivíduos idosos e com osteoporose. A maior tensão no material de síntese ainda não alcançou nem 50% da resistência do material, portanto variações como osso com doença osteoporótica ou aumento de força por variações anatômicas podem não ser suficientes para alcançar o limite do material de síntese. Ainda existe espaço para novos estudos mais aprofundados que abordem o tema de forma mais detalhada.

## CONCLUSÃO

Após a implementação dos ligamentos longitudinal anterior, posterior, supraspinhal e intertransversais e adicionado uma análise considerando variações no tamanho do modelo estudado, não foi observada uma mudança considerável entre as tensões na síntese feita com a técnica curta e longa. Observou-se ser possível utilizar a fixação longa e curta com segurança no tratamento das fraturas toracolumbares.

Todos os autores declaram não haver nenhum potencial conflito de interesses referente a este artigo.

**CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES:** Cada autor contribuiu individual e significativamente para o desenvolvimento do manuscrito. DMR (0000-0003-2301-7924)\* foi o principal contribuinte na redação do manuscrito. ARH (0000-0002-3374-5864)\*, ED (0000-0001-6843-0988)\*, DG (0000-0002-7224-8676)\*, CLI (0000-0001-9422-2824)\*, LFS (0000-0001-8125-7104)\* avaliaram toda a análise numérica das fraturas torcicolombares. DMR, ARH, LFS realizaram a pesquisa bibliográfica, a revisão do manuscrito e contribuíram com o conceito intelectual do estudo. DMR, DG, ED avaliaram os estudos numéricos do diagnóstico por imagens das tomografias. \*ORCID (*Open Researcher and Contributor ID*).

## REFERÊNCIAS

- Hübner AR, Azevedo VG, Martins M, Suarez ADH, Carneiro MF, Ribeiro M, et al. Comparative analysis of techniques for fixing fractures of the thoracolumbar spine. *Coluna/Columna*. 2011;10(4):275-8.
- Kanis JA, Johnell O, Oden A, Sembo I, Redlund-Johnell I, Dawson A, et al. Long term risk of osteoporotic fracture in Malmö. *Osteoporos Int*. 2000;11(8):669-74.
- Kannus P, Niemi S, Parkkari J. (2000) Continuously increasing number and incidence of all-induced, fracture-associated, spinal cord injuries in elderly persons. *Arch Intern Med*. 2000;160(14):2145-9.
- Robertsson A, Branfoot T, Barlow F, Giannoudis P. Spinal injury pattern resulting from car and motorcycle accidents. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2002;27(24):2825-30.
- Jansson KA, Blomqvist P, Svedmark P, Granath F, Buskens E, Larsson M, et al. Thoracolumbar vertebral fractures in Sweden: an analysis of 13,496 patients admitted to hospital. *Eur J Epidemiol*. 2010;25(6):431-7.
- Verlaan JJ, Diekerhof CH, Buskens E, van der Tweel I, Verbout AJ, Dhert WJA, et al. Surgical Treatment of Traumatic Fractures of the Thoracic and Lumbar Spine: A Systematic Review of the Literature on Techniques, Complications, and Outcome. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2004;29(7):803-14.
- Hübner AR, Gasparin D, de Meira Junior AD, Israel CL, Dambrós JM, Ribeiro M, et al. Numerical analysis of multi-level versus short instrumentation for the treatment of thoracolumbar fractures. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2015;25(Suppl 1):S213-7.
- Daubs MD, Bess RS. (2011). Surgical Treatment of Thoracolumbar and Lumbar Fractures. In: Bridwell KH, DeWald RL (eds). The text book of spinal surgery. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2011. p. 1424-38.
- Seth K. Williams (2011). Thoracic and Lumbar Spinal Injuries. In: Rothman-Simeone. The Spine 6th ed. New York: Elsevier; 2011. p. 1363-88.
- Denis F, Armstrong GW, Searls K, Matta L. Acute thoracolumbar burst fractures in the absence of neurologic deficit: a comparison between operative and nonoperative treatment. *Clin Orthop Relat Res*. 1984;189:142-9.
- Mahar A, Kim C, Wedemeyer M, Mitsunaga L, Odell T, Johnson B, et al. Short segment fixation of lumbar burst fractures using pedicle fixation at the level of the fracture. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007;32(14):1503-7.
- Anekstein Y, Brosh T, Mirovsky Y. Intermediate screws in short segment pedicular fixation for thoracic and lumbar fractures: a biomechanical study. *J Spinal Disord Tech*. 2007;20(1):72-7.
- Baaj AA, Reyes PM, Yaqoobi AS, Uribe JS, Vale FL. Biomechanical advantage of the index-level pedicle screw in unstable thoracolumbar junction fractures. *J Neurosurg Spine*. 2011;14(2):192-7.
- Wang H, Li C, Liu T, Zhao WD, Zhou Y. Biomechanical efficacy of monoaxial or polyaxial pedicle screw and additional screw insertion at the level of fracture, in lumbar burst fracture: an experimental study. *Indian J Orthop*. 2012;46(4):395-401.
- Tang S, Rebholz BJ. Does anterior lumbar interbody fusion promote adjacent degeneration in degenerative disc disease? A finite element study. *J Orthop Sci*. 2011;16(2):221-8.
- Gong Z, Chen Z, Feng Z, Cao Y, Jiang C, Jiang X. Finite element analysis of 3 posterior fixation techniques in the lumbar spine. *Orthopedics*. 2014;37(5):e441-8.
- Li C, Zhou Y, Wang H, Liu J, Xiang L. Treatment of unstable thoracolumbar fractures through short segment pedicle screw fixation techniques using pedicle fixation at the level of the fracture: a finite element analysis. *PLoS One*. 2014;9(6):e99156.
- Li QL, Li XZ, Liu Y, Zhang HS, Shang P, Chu ZM, et al. Treatment of thoracolumbar fracture with pedicle screws at injury level: a biomechanical study based on three-dimensional finite element analysis. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2013;23(7):775-80.
- Sun C, Liu X, Tian J, Guan G, Zhang H. Comparison of unilateral versus bilateral pedicle screw fixation at the level of fracture using posterior short-segment pedicle instrumentation in the treatment of severe thoracolumbar burst fractures. *Int J Surg*. 2017;41:50-5.
- Ouellet JA, Richards C, Sardar ZM, Giannitsios D, Noiseux N, Strydom WS, et al. Finite element analysis and biomechanical comparison of short posterior spinal instrumentation with divergent bridge construct versus parallel tension band construct for thoracolumbar spine fractures. *Glob Spine J*. 2013;3(2):85-94.
- Xu G, Fu X, Du C, Ma J, Li Z, Tian P, et al. Biomechanical comparison of mono-segment transpedicular fixation with short-segment fixation for treatment of thoracolumbar fractures: a finite element analysis. *Proc Inst Mech Eng H*. 2014;228(10):1005-13.
- Park WM, Park YS, Kim K, Kim YH. Biomechanical comparison of instrumentation techniques in treatment of thoracolumbar burst fractures: a finite element analysis. *J Orthop Sci*. 2009;14:443-9.
- Alizadeh M, Kadir MR, Fadhli MM, Fallahiazaroodar A, Azmi B, Murali MR, et al. The use of X-shaped cross-link in posterior spinal constructs improves stability in thoracolumbar burst fracture: a finite element analysis. *J Orthop Res*. 2013;31(9):1447-54.