

# INFLUÊNCIA DO PREPARO DO ORIFÍCIO PILOTO NA ANCORAGEM DOS PARAFUSOS PEDICULARES

EFFECT OF THE PILOT HOLE PREPARATION ON THE ANCHORAGE OF PEDICLE SCREWS

GUSTAVO SILVA ABRAHÃO, RODRIGO CÉSAR ROSA, RODRIGO OKUBO, ANTÔNIO CARLOS SHIMANO

## RESUMO

**Objetivo:** Avaliamos a influência do diâmetro e do modo de preparação do orifício piloto na resistência ao arrancamento e no torque de inserção dos parafusos pediculares com diâmetro interno cônico. **Métodos:** Ensaios mecânicos foram realizados com parafusos pediculares com alma cônica e diâmetro de 4,2mm e 5,2mm inseridos nos pedículos vertebrais lombares de suínos. O orifício piloto foi confeccionado com de broca e sondas (pontiaguda e cortante) com diferentes diâmetros. **Resultados:** Testando o parafuso de 4,2mm a perfuração com orifício igual ou inferior ao menor diâmetro interno do parafuso, aumentou o torque e a resistência ao arrancamento. Perfurações com diferentes instrumentos apresentaram comportamento semelhante. Perfurações com sondas permitiram que orifícios confeccionados com dimensões superiores ao menor diâmetro interno do parafuso apresentassem resistência semelhante a das perfurações com dimensões iguais ao menor diâmetro interno do implante, realizadas com sondas e brocas. **Conclusões:** Nos de 4,2 mm o diâmetro e o modo de preparação do orifício influenciam o torque e a resistência, nos de 5,2 mm apenas o torque de inserção. Não há correlação entre força de arrancamento e torque de inserção. **Nível de evidência II, Estudos terapêuticos - Investigação dos Resultados do Tratamento.**

**Descritores:** Coluna vertebral. Parafusos ósseos. Biomecânica. Dispositivos de fixação ortopédica. Vértebras lombares.

## ABSTRACT

**Objective:** We evaluated the influence of the diameter and the preparation of the pilot hole on the resistance to the pulling out and the strength when inserting pedicle screws with conical internal diameter. **Methods:** Mechanical experiments were performed with pedicle conical screws of 4.2 mm and 5.2 mm diameter. They were inserted in the vertebral pedicles of swine. The hole was manufactured with a drill and probes with different diameters. **Results:** While testing the 4.2 mm screw, the perforation of holes with measure equal or inferior to the lesser internal diameter of the screw increased the torque and the resistance to pulling out. Perforations with different instruments have presented similar results. Perforations with probes allowed the holes manufactured with dimensions superior to the lesser internal diameter of the screw to show similar resistance to that of the perforations with dimensions equal to the lesser internal diameter of the implant, made with probes and drills. **Conclusions:** For 4.2 mm screws, the diameter and the preparation of the hole influence the torque and the resistance. For 5.2 mm screws, there is only influence on the insertion torque. There is no correlation between pulling out strength and insertion torque. **Level of Evidence II, Therapeutic Studies – Investigating the Results of Treatment.**

**Keywords:** Spine. Bone screws. Biomechanics. Orthopedic fixation devices. Lumbar vertebrae.

**Citação:** Abrahão GS, Rosa RC, Okubo R, Shimano AC. Influência do preparo do orifício piloto na ancoragem dos parafusos pediculares. Acta Ortop Bras. [online]. 2012;20(5): 274-9. Disponível em URL: <http://www.scielo.br/aob>.

**Citation:** Abrahão GS, Rosa RC, Okubo R, Shimano AC. Effect of the pilot hole preparation on the anchorage of pedicle screws. Acta Ortop Bras. [online]. 2012;20(5): 274-9. Available from URL: <http://www.scielo.br/aob>.

## INTRODUÇÃO

A falha na ancoragem dos implantes é um problema clínico frequentemente encontrado nas cirurgias da coluna vertebral.<sup>1</sup> O desempenho mecânico dos implantes é altamente dependente da integridade da interface osso-implante e das características biomecânica dos seus componentes.<sup>2-5</sup> Os parafusos têm sido empregados como elemento de ancoragem na vértebra por apresentar a capacidade de

resistir às forças de cisalhamento, encurvamento e arrancamento. A perda da estabilidade do sistema de fixação vertebral pode ser afetada pela soltura ou quebra do parafuso de ancoragem do sistema.<sup>6-9</sup> A ancoragem do parafuso na vértebra depende de um conjunto de fatores relacionados com o osso sobre o qual o material é implantado (densidade mineral óssea), implantes utilizados (desenho do parafuso, diâmetro externo, tamanho e profundidade da rosca)

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

Departamento de Biomecânica, Medicina e Reabilitação do Aparelho Locomotor da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da USP – Ribeirão Preto, SP, Brasil.

Trabalho realizado no Departamento de Biomecânica, Medicina e Reabilitação do Aparelho Locomotor (Laboratório de Bioengenharia) da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.  
Correspondência: Av. Terezinha Campos Waack, 275. Jardim Alexandre Campos Uberaba – MG, Brasil. CEP: 38020-040. Email: [gustavo\\_abrahao@yahoo.com.br](mailto:gustavo_abrahao@yahoo.com.br)

Artigo recebido em 09/11/2010, aprovado em 23/11/2010.

e técnica de preparo do orifício piloto (diâmetro, machreamento, tipo de perfuração).<sup>10-12</sup>

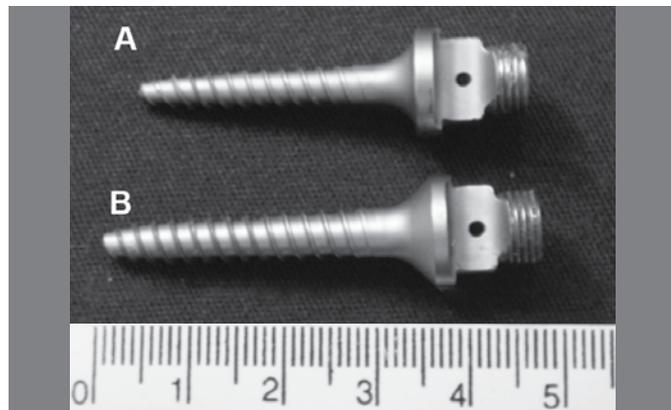
A realização do orifício piloto é de fundamental importância para a colocação dos parafusos no interior do osso, pois estabelece as relações mecânicas entre o implante e o tecido ósseo.<sup>13</sup> A confecção do orifício piloto tem sido realizada por meio de diferentes métodos, destacando-se a utilização das brocas e sondas. Teoricamente a utilização de broca remove o tecido ósseo enquanto que a utilização de sonda promove a compactação do osso na parede do orifício piloto. Essa compactação do osso nas paredes do orifício piloto poderia melhorar a qualidade da fixação do implante. O diâmetro do orifício piloto em relação ao diâmetro interno do parafuso não tem sido valorizado nessa etapa do procedimento, embora a sua influência tenha sido observada em ensaios mecânicos.<sup>14,15</sup> O objetivo do estudo foi avaliar a possível influência do diâmetro e do modo de preparação do orifício piloto no torque de inserção e na resistência ao arrancamento dos parafusos pediculares com diâmetro interno cônico, utilizando vértebras de suínos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados no estudo 280 pedículos de vértebras lombares (L1-L6) de suínos da raça *Landrace*, com idade média de 90 dias e massa aproximada de 80kg.

As vértebras foram armazenadas à temperatura de -20°C. Precedendo a realização dos ensaios às vértebras foram retiradas do freezer e mantidas por 12 horas à temperatura de 5°C no refrigerador, e, subsequentemente por duas horas à temperatura ambiente para se atingir o equilíbrio térmico e não alterar as propriedades físicas do osso. A densidade mineral óssea das vértebras foi avaliada por meio de *dua-energy* x-ray absorptiometry (DEXA®), usando o QDR system com software versão 11 – 2:5 (Hologic 4500 W®, Waltham, MA, EUA), tendo sido observada a média de  $16,33 \pm 1,90$  g/cm<sup>3</sup>. Foram utilizados parafusos pediculares com diâmetro interno cônico, apresentando diâmetro externo de 4,2mm e 5,2mm, pertencentes ao sistema USSII (Univesal Spine System-Synthes®) de fixação vertebral. O primeiro com 30mm de comprimento de rosca e diâmetro interno cônico, com o maior diâmetro interno de 3,8mm e o menor de 2,2mm. E o segundo com 35mm de comprimento de rosca e diâmetro interno cônico, com maior diâmetro interno de 4,2mm e o menor de 2,5mm. (Figura 1)

O orifício para colocação do implante foi confeccionado por meio de broca, sonda cortante e sonda pontiaguda de aço, com diâmetros de 1,6mm, 2,2mm, 2,5mm, 2,8mm, 3,4mm, 3,8mm e 4,2mm; utilizados de acordo com o grupo experimental. (Figura 2)



**Figura 1.** Parafusos utilizados no estudo. (A) Parafuso de 4,2mm x 30mm. (B) Parafuso de 5,2mm x 35mm.



**Figura 2.** Instrumentos utilizados para confecção do orifício piloto. Broca (A); Sonda pontiaguda (B) e Sonda cortante (C).

A profundidade de perfuração do orifício piloto foi definida com base no comprimento de rosca do parafuso. As perfurações com as sondas foram realizadas manualmente enquanto que as perfurações com as brocas foram realizadas com perfuratriz de bancada a uma velocidade de 455 rpm.

Os parafusos foram inseridos nos pedículos vertebrais a partir da porção posterior do arco vertebral utilizando referências anatômicas da face articular superior e processo transversal. O torque de inserção do parafuso foi mensurado com torquímetro digital Mackena®, modelo MK-201 com capacidade de 10 N.m e precisão de 0,01 N.m Os ensaios mecânicos foram realizados utilizando máquina universal de ensaios EMIC® (modelo DL 10.000) Software Tesc 3.13 para análise dos resultados, célula de carga com capacidade de 2000 N e velocidade de aplicação de força de 2mm/min. Em todos os ensaios mecânicos foi utilizada a pré-carga de 50N e tempo de acomodação de 10 segundos. A propriedade avaliada nos ensaios mecânicos foi à força máxima de arrancamento.

A comparação dos valores obtidos nos diferentes grupos experimentais foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA) multifatorial e quando necessário método *post hoc* de *Bonferroni*, com nível de significância  $p \leq 0,05$ . Para estudar a correlação matemática entre as variáveis foi utilizado o cálculo do *coeficiente de correlação de Pearson*.

## RESULTADOS

### Torque de Inserção

Na análise do torque de inserção dos parafusos com 4,2 mm de diâmetro externo foi observada influência do modo de preparo do orifício piloto no diâmetro de 3,4mm, onde a broca apresentou maiores valores que a sonda pontiaguda ( $p < 0,05$ ). Não foi observada diferença estatística nas demais comparações. Nos parafusos de 5,2mm não foi observada influência do meio de preparo do orifício piloto. (Figura 3)

No estudo dos parafusos com 4,2mm de diâmetro externo, o aumento do diâmetro de perfuração promoveu redução do torque de inserção do implante nos diferentes meios de preparo do orifício piloto. Esta redução não ocorreu de forma semelhante nos diferentes modos de preparo do orifício piloto. Na sonda cortante esta redução ocorreu de forma gradual, diferente de outros modos de preparo do orifício piloto onde a maior redução foi observada nas comparações com o diâmetro de 3,4mm. (Figura 4)

Nos parafusos de 5,2mm foi verificado que o aumento do diâmetro de perfuração promoveu redução do torque de inserção

do implante nos diferentes meios de preparo do orifício piloto. As perfurações com broca e sondas de 2,5mm apresentaram valores maiores do que as perfurações com broca e sondas de 4,2mm. E as perfurações com sondas de 3,8mm foram maiores do que as realizadas com sondas de 4,2mm. (Figura 4)

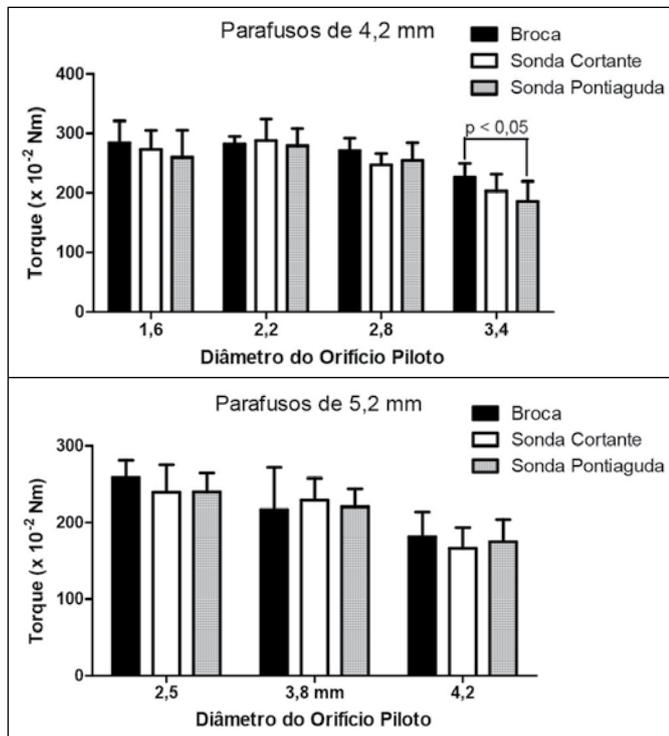


Figura 3. Resultados do torque de inserção nas análises do modo de preparo do orifício piloto com diferentes diâmetros de perfuração.

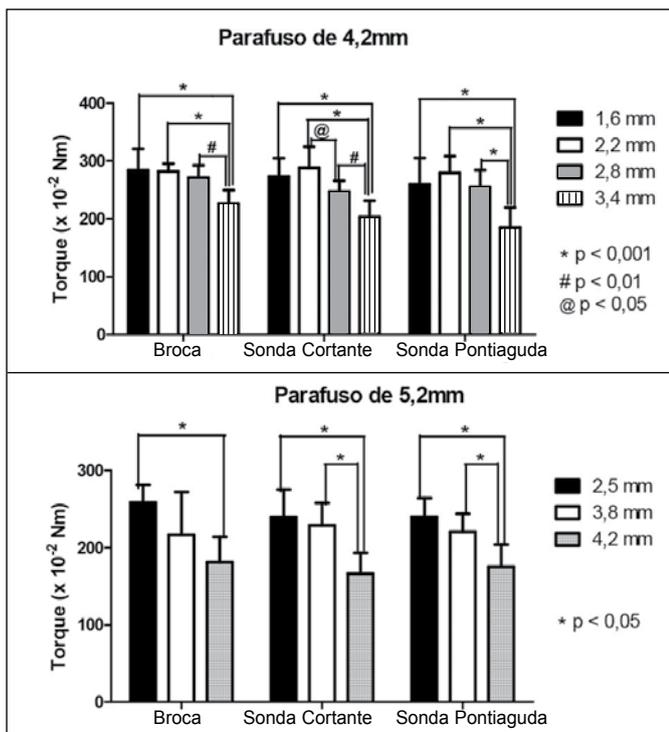


Figura 4. Resultados do torque de inserção nas análises do diâmetro, com diferentes instrumentos de perfuração.

### Força de Arrancamento

Na análise da força máxima de arrancamento de parafusos de 4,2mm foi observada influência do modo de preparo do orifício piloto no diâmetro de 1,6 e 2,8 mm. No diâmetro de 1,6mm, a broca apresentou maiores valores que a sonda pontiaguda ( $p < 0,05$ ). No diâmetro de 2,8mm a sonda cortante apresentou valores superiores aos observados nos orifícios confeccionados com broca. Não foi observada diferença estatística nas demais comparações. Nos parafusos de 5,2mm não foi observada influência do meio de preparo do orifício piloto. (Figura 5)

Considerando o parafuso de 4,2mm o aumento do diâmetro de perfuração promoveu redução da força máxima de arrancamento dos implantes nos diferentes meios de preparo do orifício piloto. Esta redução não ocorreu de forma semelhante nos diferentes modos de preparo do orifício piloto. Na broca, esta redução ocorreu de forma gradual, onde a perfuração de 2,2mm apresentou valor superior a de 2,8mm. Já nas sondas pontiaguda e cortante, o diâmetro de 2,2mm (Medida recomendada pelo fabricante) e o diâmetro de 2,8mm apresentaram valores semelhantes. Nos parafusos de 5,2mm não foi observada influência da perfuração nos diferentes meios de preparo do orifício piloto. (Figura 6)

### Força de Arrancamento X Torque de Inserção

O cálculo matemático do coeficiente de correlação de Pearson demonstra que não há correlação significativa quando comparadas as variáveis de força de arrancamento e torque de inserção em nenhum dos grupos experimentais avaliados.

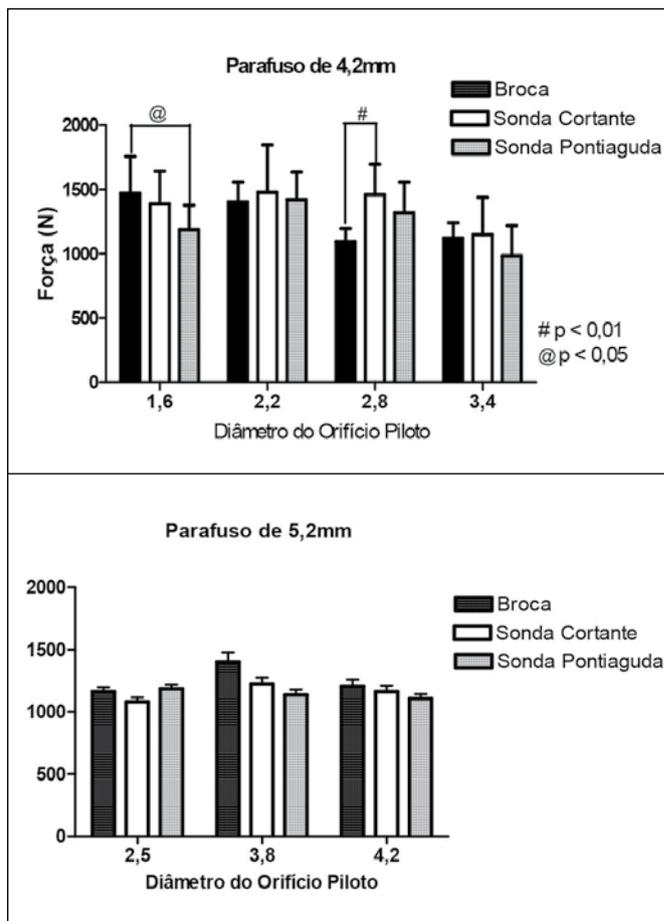
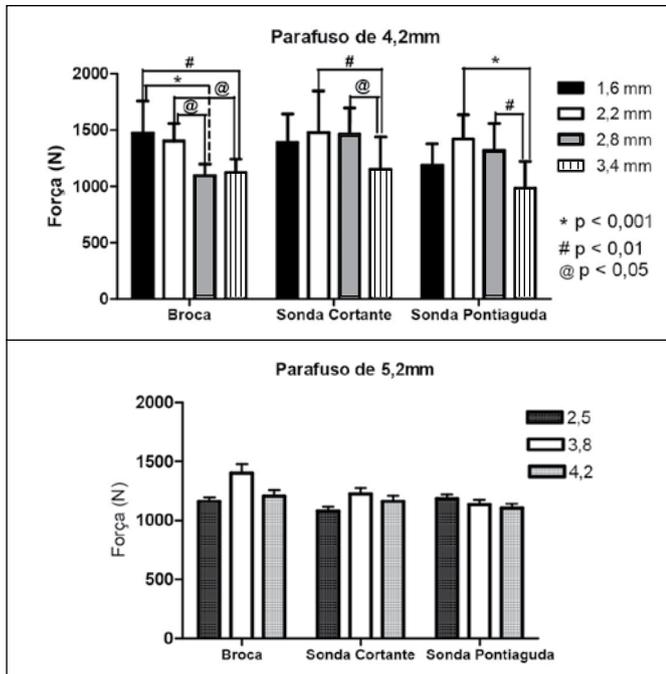


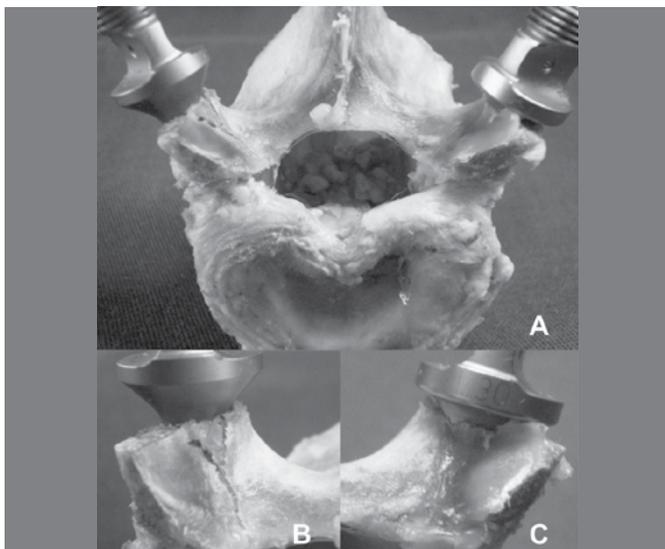
Figura 5. Resultados da força máxima de arrancamento nas análises do modo de preparo do orifício piloto, com diferentes diâmetros de perfuração.



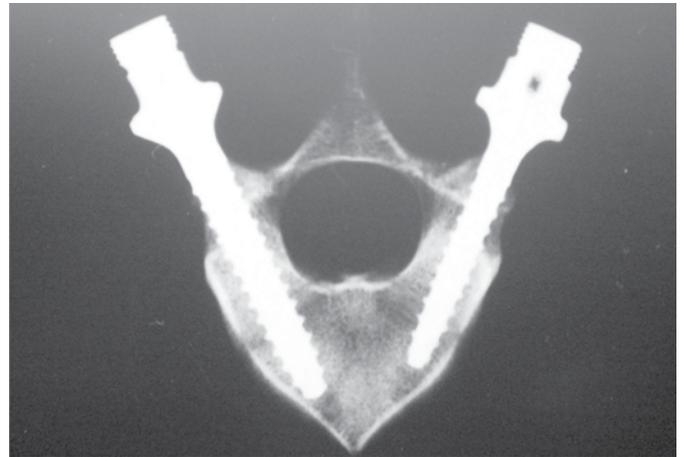
**Figura 6.** Resultados da força máxima de arrancamento nas análises do diâmetro com diferentes instrumentos de perfuração.

### Análise Qualitativa

Estudando o comportamento da superfície pedicular externa, após a inserção dos implantes nos diferentes grupos experimentais, foi possível verificar (Figura 7), que a inserção de parafusos de 5,2mm produziu traço de fratura ao longo da margem medial dos pedículos em que foram inseridos. Achado que não foi observado nos grupos em que foram inseridos parafusos de 4,2mm. Estudando o trajeto dos parafusos no interior dos pedículos vertebrais, foi verificado (Figura 8), que o espaço compreendido entre o implante e a parede medial do pedículo é menor quando inseridos parafusos de 5,2mm em comparação aos pedículos com parafusos de 4,2mm.



**Figura 7.** Vértebra lombar de suíno com parafusos inseridos nos pedículos (A). Detalhe do pedículo vertebral direito com implante de 5,2mm (B). Detalhe do pedículo vertebral esquerdo com implante de 4,2mm (C).



**Figura 8.** Radiografia da vértebra lombar de suíno com parafusos inseridos nos pedículos. Parafuso de 5,2mm (A). Parafuso de 4,2mm (B).

### DISCUSSÃO

A resistência dos parafusos ao arrancamento são fenômenos complexos e multifatoriais que estão relacionados às propriedades intrínsecas do sistema de fixação e a ancoragem nas vértebras.<sup>16</sup> Sendo influenciada primariamente pela densidade mineral óssea, pela técnica de inserção e pela geometria do implante.<sup>17-19</sup> A confecção do orifício piloto facilita e orienta a penetração dos implantes no interior da vértebra e, teoricamente, a realização de orifícios de menor diâmetro em relação ao diâmetro interno do parafuso aumenta a quantidade de osso compactado ao seu redor, elevando a resistência ao arrancamento dos implantes.<sup>14,17,20</sup> O desenvolvimento de implantes com diâmetro interno cônic permitiu melhor acomodação na vértebra e ancoragem no tecido ósseo esponjoso, que é predominante no interior do pedículo.<sup>11</sup> Os primeiros modelos apresentavam diâmetro interno e externo cônic, o que propiciou bons resultados clínicos, mas reduziu a resistência do sistema de fixação.<sup>18</sup> Os modelos atuais, como os utilizados no experimento, são constituídos de diâmetro externo cilíndrico e interno cônic, que aumenta da extremidade em direção a cabeça. O aumento progressivo da parte interna promove a compressão de material ósseo ao redor do implante elevando a resistência mecânica do sistema.<sup>21,22</sup> Nesse estudo observamos que o diâmetro e o modo de preparação do orifício piloto exercem influência sobre a força máxima de arrancamento e o torque de inserção. Os resultados encontrados demonstram que, utilizando um parafuso de 4,2mm de diâmetro externo, a redução do orifício piloto em relação ao diâmetro interno do parafuso tende a aumentar a resistência ao arrancamento dos implantes e o aumento do diâmetro do orifício piloto reduz a resistência ao arrancamento. No entanto, ao confeccionar um orifício piloto inferior ao menor diâmetro interno do parafuso, a resistência não foi superior a apresentada com orifício igual ao menor diâmetro interno. Achados semelhantes foram apresentados por Hee *et al.*<sup>23</sup> e Zamarioli *et al.*<sup>24</sup> concluindo que para os parafusos cônicos, a maior resistência ao arrancamento é observada quando estes são inseridos em orifícios realizados com medida igual à do menor diâmetro interno do parafuso. Para fixar um parafuso em uma estrutura ou no osso, inicialmente faz-se um orifício piloto cujo tamanho está entre o diâmetro externo e o interno do parafuso.<sup>14</sup> Portanto, a área resistente depende do diâmetro externo e interno do parafuso além de outras variáveis como passo, geometria, altura do filete e o ângulo da rosca. Quando

um parafuso é inserido, um torque é aplicado para vencer o atrito dos filetes com o material rosqueado.<sup>16</sup> Na inserção, o parafuso funciona também como um “macho” de abertura de rosca, cortando o osso na geometria do filete do parafuso. Desta forma, um orifício menor permite maior deposição de material entre os filetes. No entanto, um orifício inferior ao menor diâmetro interno do parafuso eleva o torque de inserção, mas não há proporcionalidade com a força de arrancamento, pois não se obtém um alinhamento apropriado e a maior tensão gerada pode lesar as estruturas ósseas.<sup>14</sup>

Esse resultado mostra a relação direta entre a redução da força máxima de arrancamento e o aumento do diâmetro do orifício piloto em relação ao diâmetro interno dos parafusos. À medida que maior quantidade de osso é removida durante a perfuração, ocorre a compactação de menor quantidade de osso ao redor dos filetes de rosca do parafuso, enfraquecendo a interface entre o implante e o osso adjacente, e consequentemente redução da resistência ao arrancamento dos implantes.<sup>16</sup>

Quando considerado o instrumento utilizado para produção do orifício piloto confeccionado para acomodar os parafusos de 4,2mm de diâmetro externo, observamos que brocas, sondas cortantes e sondas pontiagudas apresentam resistência ao arrancamento semelhante na maioria dos grupos. No entanto, quando utilizadas as sondas, independente de ser pontiaguda ou cortante, o comportamento da resistência no orifício confeccionado com instrumento de 2,8mm (dimensão superior ao menor diâmetro interno do parafuso) foi similar ao das sondas e brocas de 2,2mm (menores que o diâmetro interno do implante), o que não foi verificado no grupo confeccionado com broca. Isso sugere que quando a sonda é utilizada para produção do orifício, seja possível utilizar um instrumento um pouco maior e obter o mesmo desempenho de uma broca ou sonda do tamanho do menor diâmetro do implante. Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos de Carmouche *et al.*<sup>20</sup> onde as perfurações realizadas com sondas proporcionaram valores superiores de resistência ao arrancamento em comparação às realizadas com brocas em modelos osteopênicos.

Os resultados do torque de inserção do parafuso apresentaram comportamento semelhante aos encontrados por Inceoglu *et al.*<sup>21</sup> e Hsu *et al.*<sup>10</sup> A redução do diâmetro do orifício piloto em relação ao diâmetro interno do parafuso, tende a aumentar o torque de inserção dos implantes e o aumento do diâmetro do orifício piloto tende a reduzir o torque. Porém o parafuso cônico não proporciona uma correlação tão confiável quanto à encontrada em parafusos cilíndricos.<sup>22</sup>

Quando considerado o instrumento utilizado para confeccionar o orifício piloto, o comportamento dos grupos que utilizaram broca, sonda cortante e sonda pontiaguda são semelhantes, sendo verificada a redução do torque de inserção somente no grupo que utilizou sondas pontiagudas com dimensão de 3,4mm. Esse valor semelhante à maior dimensão do implante sugere que a sonda pontiaguda de maior diâmetro possa causar maior dano à estrutura pedicular.<sup>23</sup>

Os resultados encontrados demonstram que utilizando um parafuso de 5,2 mm de diâmetro externo, a redução do orifício piloto em relação ao diâmetro interno do parafuso, não proporcionou o aumento da força máxima de arrancamento dos implantes, assim como o aumento das dimensões do orifício piloto não reduziu a resistência ao arrancamento independente do instrumento utilizado. Esses achados se opõem aos de Hsu *et al.*<sup>10</sup>, Lill *et al.*<sup>11</sup>, Zamarioli *et al.*<sup>24</sup>, e aos resultados encontrados na primeira etapa deste estudo quando vértebras de suínos com as mesmas caracte-

terísticas, cujos orifícios foram confeccionados seguindo a mesma metodologia, foram submetidas à inserção de um parafuso de modelo igual, porém de diâmetro menor.

No entanto, esse comportamento pode ser compreendido considerando que o desempenho mecânico de um parafuso pedicular depende das propriedades físicas do implante e biomecânicas da união osso-parafuso.<sup>12</sup> A força máxima de arrancamento além de apresentar relação direta com o tipo de osso, a geometria da rosca, e a densidade mineral óssea, é dependente do tamanho do parafuso.<sup>1</sup> Alguns estudos descreveram que a ancoragem depende mais do pedículo do que do osso esponjoso do corpo vertebral. Desta forma, o rompimento do pedículo reduz a resistência do sistema de fixação.<sup>22,23</sup> O comportamento mecânico do pedículo vertebral está diretamente relacionado ao diâmetro do implante e quando este tem dimensões próximas às do pedículo podem ocorrer danos à estrutura pedicular.<sup>23</sup> Os pedículos com parafusos de 5,2mm inseridos tiveram o espaço entre o implante e a parede cortical medial reduzido, o que comprometeu integridade estrutural gerando traço de fratura ao longo da margem medial.

Os resultados do torque de inserção do parafuso de 5,2mm de diâmetro externo e o comportamento mecânico proporcionado pelos diferentes instrumentos, apresentam comportamento semelhante aos encontrados por Hsu *et al.*<sup>10</sup>, Lill *et al.*<sup>11</sup> e Hee *et al.*<sup>23</sup>, e aos resultados encontrados na primeira etapa deste estudo. A redução do diâmetro do orifício piloto em relação ao diâmetro interno do parafuso tende a aumentar o torque de inserção dos implantes e o aumento do diâmetro do orifício piloto tende a reduzir o torque.

Estes resultados indicam que as alterações estruturais sofridas pelo pedículo foram capazes de influenciar a força máxima de arrancamento, mas não exerceram efeito sobre o torque de inserção. Segundo Hee *et al.*<sup>23</sup>, a violação da parede pedicular não altera o torque de inserção quando utilizados parafusos cônicos. O resultado do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson demonstra que não há correlação matemática entre as variáveis de força de arrancamento e torque de inserção em nenhum dos grupos experimentais, indicando que no parafuso cônico o torque inserção não é plenamente confiável para estimar a resistência do implante.<sup>1,21</sup>

## CONCLUSÃO

Utilizando o parafuso de 4,2mm, o diâmetro e o modo de preparação do orifício piloto exerceram influência na resistência ao arrancamento e no torque de inserção do parafuso. A perfuração em que a dimensão era igual ou inferior ao menor diâmetro interno do parafuso, aumentou a resistência ao arrancamento e o torque de inserção do implante.

As perfurações com os diferentes instrumentos apresentaram comportamento semelhante. No entanto, as perfurações com sondas pontiaguda e cortante permitiram que um orifício confeccionado com dimensão superior ao menor diâmetro interno do parafuso apresenta-se resistência semelhante a das perfurações do mesmo tamanho que o menor diâmetro interno do implante realizadas com sondas e broca.

Utilizando o parafuso de 5mm, o diâmetro do orifício piloto exerceu influência somente no torque de inserção do parafuso, indicando que a resistência mecânica do pedículo foi comprometida, pois as dimensões do implante excederam a capacidade pedicular.

Não há correlação entre as medidas do torque de inserção e da força de arrancamento independentemente das dimensões do parafuso, instrumento de perfuração ou tamanho do orifício confeccionado.

## REFERÊNCIAS

1. Law M, Tencer AF, Anderson PA. Caudo-cephalad loading of pedicle screws: mechanisms of loosening and methods of augmentation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1993;18(16):2438-43.
2. Chen PQ, Lin SJ, Wu SS, So H. Mechanical performance of the new posterior spinal implant: effect of materials, connecting plate, and pedicle screw design. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2003;28(9):881-6.
3. Chen SI, Lin RM, Chang CH. Biomechanical investigation of pedicle screw-vertebrae complex: a finite element approach using bonded and contact interface conditions. *Med Eng Phys*. 2003;25(4):275-82.
4. Hackenberg L, Link T, Liljenqvist U. Axial and tangential fixation strength of pedicle screws versus hooks in the thoracic spine in relation to bone mineral density. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2002;27(9):937-42.
5. Kostuik JP, Munting E, Valdevit A. Biomechanical analysis of screw load sharing in pedicle fixation of the lumbar spine. *J Spinal Disord*. 1994;7(5):394-401.
6. Coe JD, Warden KE, Herzig MA, McAfee PC. Influence of bone mineral density on the fixation of thoracolumbar implants. A comparative study of transpedicular screws, laminar hooks, and spinous process wires. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1990;15(9):902-7.
7. George DC, Krag MH, Johnson CC, Van Hal ME, Haugh LD, Grobler LJ. Hole preparation techniques for transpedicle screws. Effect on pull-out strength from human cadaveric vertebrae. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1991;16(2):181-4.
8. Hirano T, Hasegawa K, Takahashi HE, Uchiyama S, Hara T, Washio T, et al. Structural characteristics of the pedicle and its role in screw stability. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1997;22(21):2504-9.
9. Brantley AG, Mayfield JK, Koeneman JB, Clark KR. The effects of pedicle screw fit. An in vitro study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1994;19(15):1752-8.
10. Hsu CC, Chao CK, Wang JL, Hou SM, Tsai YT, Lin J. Increase of pullout strength of spinal pedicle screws with conical core: biomechanical tests and finite element analyses. *J Orthop Res*. 2005;23(4):788-94.
11. Lill CA, Schneider E, Goldhahn J, Haslemann A, Zeifang F. Mechanical performance of cylindrical and dual core pedicle screws in calf and human vertebrae. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2006;126(10):686-94.
12. Zdeblick TA, Kunz DN, Cooke ME, McCabe R. Pedicle screw pullout strength. Correlation with insertional torque. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1993;18(12):1673-6.
13. Silva VC, Barbosa SV, Campos BP, Campos BP. Análise histológica do osso peiimplantar após o preparo por brocas ou compactando por expansores ósseos. *Rev Bras Implant*. 2004;11(42):113-8.
14. Oktenoğlu BT, Ferrara LA, Andalkar N, Ozer AF, Sarioğlu AC, Benzel EC. Effects of hole preparation on screw pullout resistance and insertional torque: a biomechanical study. *J Neurosurg*. 2001;94(1 Suppl):91-6.
15. Pfeiffer M, Gilbertson LG, Goel VK, Griss P, Keller JC, Ryken TC et al. Effect of specimen fixation method on pullout tests of pedicle screws. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1996;21(9):1037-44.
16. Jacob AT, Ingahlalkar AV, Morgan JH, Channon S, Lim TH, Torner JC et al. Biomechanical comparison of single- and dual-lead pedicle screws in cadaveric spine. *J Neurosurg Spine*. 2008;8(1):52-7.
17. Cook SD, Salkeld SL, Stanley T, Faciane A, Miller SD. Biomechanical study of pedicle screw fixation in severely osteoporotic bone. *Spine J*. 2004;4(4):402-8.
18. Daftari TK, Horton WC, Hutton WC. Correlations between screw hole preparation, torque of insertion, and pullout strength for spinal screws. *J Spinal Disord*. 1994;7(2):139-45.
19. Hashemi A, Bednar D, Ziada S. Pullout strength of pedicle screws augmented with particulate calcium phosphate: an experimental study. *Spine J*. 2009;9(5):404-10.
20. Carmouche JJ, Molinari RW, Gerlinger T, Devine J, Patience T. Effects of pilot hole preparation technique on pedicle screw fixation in different regions of the osteoporotic thoracic and lumbar spine. *J Neurosurg Spine*. 2005;3(5):364-70.
21. Inceoglu S, Ferrara L, McLain RF. Pedicle screw fixation strength: pullout versus insertional torque. *Spine J*. 2004;4(5):513-8.
22. Sella K, Wahl D, Wild A, Krauspe R, Schneider E, Linke B. Pullout strength of anterior spinal instrumentation: a product comparison of seven screws in calf vertebral bodies. *Eur Spine J*. 2007;16(7):1047-54.
23. Hee HT, Khan MS, Goh JC, Wong HK. Insertion torque profile during pedicle screw insertion of the thoracic spine with and without violation of the pedicle wall: comparison between cylindrical and conical designs. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2006;31(22):E840-6.
24. Zamarioli A, Simões PA, Shimano AC, Defino HLA. Torque de inserção e resistência ao arrancamento dos parafusos vertebrais com alma cilíndrica e cônica. *Rev Bras Ortop*. 2008;43(10):452-9.