



INVESTIGAÇÃO DE ASPECTOS ANTROPOMETRICOS DA COLUNA TORÁCICA E CONSTRUÇÃO CONTROLADA DE GEOMETRIA COMPUTACIONAL

Hebert Suares Trautwein

Luis Fernando Nicolini

Carlos Rodrigo Roesler

Alexandre Neves Trichez Junior

Eduardo Alberto Fancello

hebert.trautwein@posgrad.ufsc.br

lfernandonicolini@gmail.com

r.roesler@ufsc.br

ntrichez@gmail.com

eduardo.fancello@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina

Campus Reitor João David Ferreira Lima, 88040-900, Santa-Catarina, Florianópolis, Brazil

Marcelo Simões

marcelosimo666@gmail.com

Serviço de Neurocirurgia do Hospital Ernesto Dornelles

Av. Praia de Belas 2124-sala1105, 90110-001, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

Abstract. *The development of Finite element models of the human spine remains challenging because of the complexity of the geometry of vertebrae and intervertebral discs. The objective of this study is to develop a geometrical model of the intact thoracic spine that is representative of an average human spine. For that purpose, the geometry of the thoracic vertebrae T10-T11 derived from CT images, was modified by an iterative process considering anthropometric mean values provided literature. The proposed method successful lead to the development of a geometrical model well representative of the mean of human spine samples studied.*

Keywords: *Torácica, Coluna vertebral, Vértebra, Morfologia Vertebral, Disco Intervertebral, Biomecânica, Antropometria.*

INTRODUÇÃO

Modelos baseados em elementos (EF) da coluna vertebral têm o potencial de serem utilizados como bancadas de testes computacionais para desenvolvimento e análise de próteses, métodos cirúrgicos e tratamentos da coluna vertebral.

Tais modelos frequentemente utilizam as propriedades biomecânicas dos tecidos moles calibradas com base em testes experimentais, executados *in vitro*. Entretanto não é comum encontrar na literatura dados antropométricos detalhados das amostras testadas. Este fato dificulta a construção e calibração de modelos biomecânicos, pois existe a falta de controle das variáveis antropométricas de vértebras e discos intervertebrais.

Uma abordagem possível para este problema consiste em escolher uma geometria óssea arbitrária obtida via segmentação de imagens de uma coluna real e calibrar suas propriedades a partir dos dados experimentais acima mencionados.

Uma abordagem alternativa é a reconstrução ou adaptação controlada da geometria obtida para que ela se ajuste a valores estatisticamente representativos de dados antropométricos observados na literatura.

Existem aspectos positivos e negativos em prol de uma e outra escolha. No caso da primeira, pesa a favor o fato que a geometria é verdadeiramente real e conseqüentemente guarda proporções antropométricas exequíveis. Como aspecto negativo, ela pode carregar desvios de uma media antropométrica que forneçam, nos estudos numéricos, resultados com viés fortemente induzidos por estes desvios. Por outro lado, erros de segmentação na representação de regiões específicas como juntas facetarias trazem comprovadas dificuldades na interpretação de resultados mecânicos, em função da forte influência que estes erros geométricos podem ter na biomecânica do sistema multi-articulado.

A segunda opção recebe como crítica o fato de não ser uma coluna proveniente de um caso real e, por ter sido “sintetizada”, passível de carregar alguma relação geométrica que não seja verificada na realidade. Por outro lado, se observada uma construção estatisticamente representativa dos dados geométricos com relevância para o estudo mecânico pretendido, o perigo de se incorrer no problema acima mencionado é minimizado. Finalmente, a construção controlada permite a observância de alguns aspectos importantes na análise mecânica numérica posterior. A capacidade de controlar simetrias permite analisar a influencia destas nos resultados numéricos. No caso da coluna vertebral, orientação e folga de juntas facetarias são dados de forte influencia nos resultados mecânicos cujo controle geométrico baseado em valores estatísticos permite uma análise de sensibilidade ausente em modelos advindos de uma segmentação específica.

Tendo em vista este cenário, o presente trabalho opta pela segunda abordagem e tem por objetivo a construção de um modelo geométrico da coluna torácica de forma que ela seja estatisticamente representativa dos valores antropométricos médios observados na literatura.

Uma busca na literatura permitiu concluir pelo uso dos dados estatísticos obtidos no estudo detalhado de Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011) e as relações matemáticas para discos intervertebrais fornecidas por Kunkel (2011).

A escolha do estudo de Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011) se justifica pelos seguintes fatos: fornece dados antropométricos que não foram estudados por outros autores, como tamanhos e ângulos das facetas articulares, tamanho dos pedículos e distâncias entre facetas

articulares; no conhecimento destes autores é o estudo que apresenta o maior número de amostras (240) e o único que inclui variedades de etnias e gêneros de forma balanceada aumentando, portanto, as chances de representar a antropometria de uma população global.

O trabalho de Kunkel (2011) quantifica a proporção das alturas dos discos intervertebrais com as alturas das vértebras para cada nível da coluna torácica, informação que foi adotada no presente trabalho com o objetivo de construir a coluna torácica de tal forma que as alturas e ângulos de cunha dos discos mantenham uma relação com as características antropométricas vertebrais.

1 MATERIAIS E MÉTODOS

Como ponto de partida foi utilizado um modelo geométrico da coluna vertebral disponível na plataforma livre *GRABCAD*, doravante referido como Modelo de Coluna Original (MCO). Tal modelo foi construído a partir de imagens obtidas por tomografia computadorizada. Como já apontado na introdução, a geometria vertebral do MCO foi ajustada conforme dados antropométricos obtidos dos estudos de Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011). As vértebras foram reposicionadas uma a uma respeitando as alturas intervertebrais anteriores e posteriores calculadas com base no trabalho de Kunkel (2011). Por fim os discos intervertebrais são reconstruídos de forma a preencher os espaços vazios entre as vértebras adjacentes.

Tal procedimento será exemplificado neste trabalho para um segmento T10-T11.

1.1 Dados antropométricos

Nas seções 1.1.1 e 1.1.2 são explicados quais foram os dados antropométricos extraídos dos trabalhos de Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011) e Kunkel (2011) para construção do modelo geométrico computacional.

1.1.1 Vértebras

As medidas antropométricas vertebrais avaliadas por Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011) e adotadas por este estudo foram as seguintes (para facilitar o vínculo com o material fonte são mantidas as siglas em inglês):

1. *SVBW – Superior Vertebral Body Width;*
2. *IVBW – Inferior Vertebral Body Width;*
3. *SVBL - Superior Vertebral Body Length; IVBL – Inferior Vertebral Body Length;*
4. *AVBH – Anterior Vertebral Body Height;*
5. *PVBH – Posterior Vertebral Body Height;*
6. *SPL – Spinous Process Length; SPH – Spinous Process Height;*
7. *TPL – Transverse Process Length; VCSW – Vertebral Chanel Superior Width;*
8. *VCSL – Vertebral Chanel Superior Length;*
9. **IL – Isthmus Length; SFFW – Superior Interfacet Width;*

10. *IFFW – Inferior Interfacet Width;*
11. **FFH – Interfacet Height;*
12. **SFL – Superior Facet Length;*
13. **SFW – Superior Facet Width;*
14. **IFL – Inferior Facet Length;*
15. **IFW - Inferior Facet Width;*
16. **STFA – Superior Transverse Facet Angle;*
17. **ITFA – Inferior Transverse Facet Angle;*
18. **SLFA – Superior Longitudinal Facet Angle;*
19. **ILFA – Inferior Longitudinal Facet Angle.*

Tais marcas antropométricas podem ser visualizadas na Fig. 1a-c da seção de resultados.

Marcas destacadas com * possuem informações diferentes para direita e esquerda. No presente trabalho as vértebras foram consideradas simétricas e foram adotadas as médias.

1.1.2 Discos

Do trabalho de Kunkel (2011) foram utilizados os coeficientes I1 e I3 da tabela 3 do referido texto, que representam respectivamente: Índice de altura relativa do disco (*Relative Disc Height index*), e Índice de cunha anteroposterior do disco (*Disc Anteroposterior wedging index*). Também foi utilizado o sistema acoplado de equações apresentado na legenda da mesma tabela e repetidas na sequência, cuja solução permite calcular as alturas anterior e posterior das vértebras, aqui referenciadas mediante suas siglas em inglês (ver Fig. 1d).

1. *PDH - Posterior Disc Height;*
2. *ADH - Anterior Disc Height;*

$$I_1 = \frac{ADH+PDH}{(AVBH+PVBH)}; I_3 = \frac{ADH}{PDH}$$

A medida da altura média do disco e o índice de convexidade (I2) não foram considerados neste trabalho, uma vez que os mesmos já estão definidos pelos contornos das vértebras adjacentes.

1.2 Procedimento

Os dados antropométricos medidos no Modelo de Coluna Original (MCO) foram comparados com aqueles de Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011). O MCO foi editado buscando uma diferença máxima de 30% do desvio padrão (0,3 d.p.). Entretanto para algumas medidas essa restrição foi relaxada para até 1,0 d.p. de modo a manter o alinhamento dos corpos vertebrais, canal vertebral e facetas articulares entre vértebras adjacentes.

Operacionalmente, as vértebras T10 e T11 do modelo MCO foram ajustadas em programa de *CAD (Computer Aided Design)* utilizando ferramentas básicas como multiplicação por fator de escala, rotação e translação. Dessa forma foi possível editar as

medidas antropométricas vertebrais sem comprometer a morfologia, compondo assim o que chamamos de Modelo de Coluna Atual (MCA), ou simplesmente Modelo Atual.

Com o tratamento geométrico concluído para duas vértebras adjacentes, é feito o reposicionamento destas vértebras no espaço, de tal forma a respeitar as alturas intervertebrais calculadas conforme explicado na seção 1.1.2. Na sequência o vazio existente entre as duas vértebras é preenchido formando assim o disco intervertebral, ver Fig. 1d.

2 RESULTADOS

Nesta seção serão ilustradas as medidas antropométricas referentes ao Modelo Atual da vértebra T11 bem como as alturas anterior e posterior do disco T10-T11.

2.1 Vértebra T11

Na Fig. 1a-d são ilustradas as medidas antropométricas obtidas para o segmento T10-T11 no Modelo Atual.

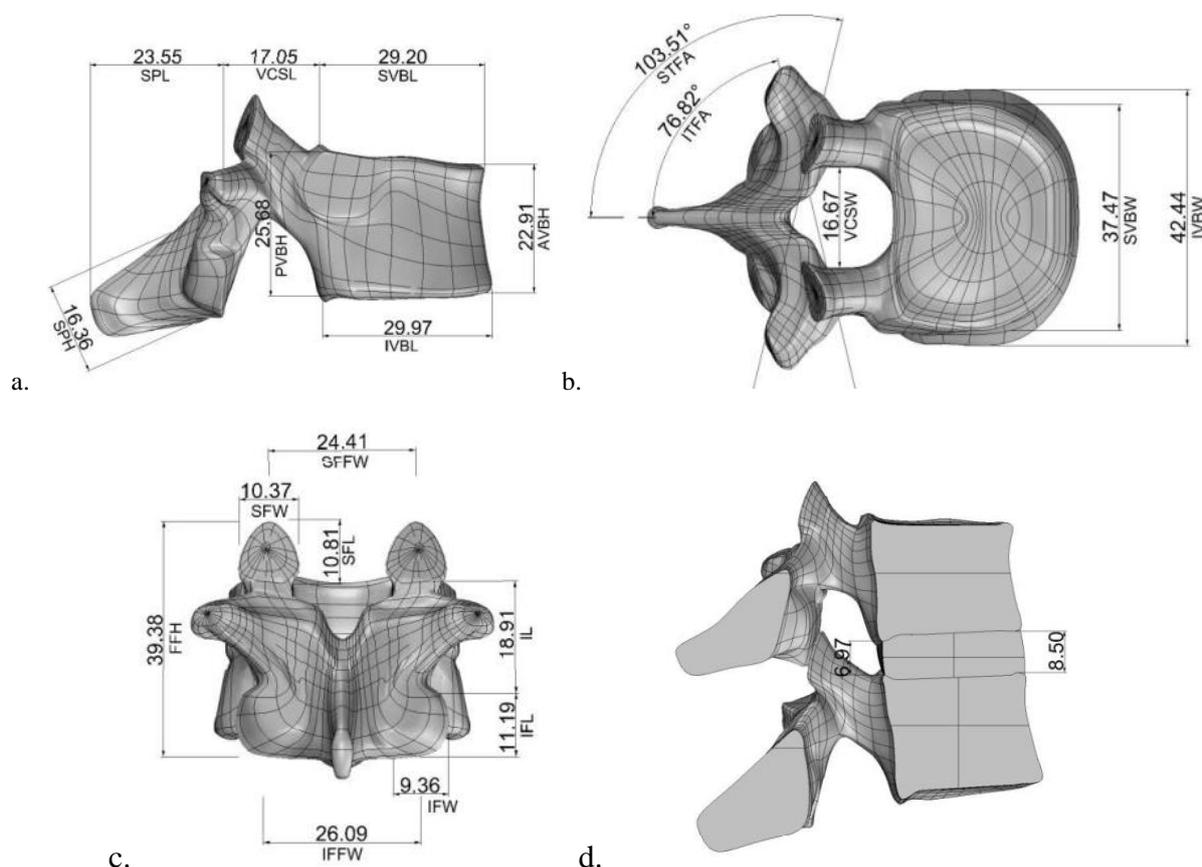


Figura 1: (a-c) Medidas antropométricas do Modelo Atual para a vértebra T11. As cotas *IFW*, *IFL*, *SFW* e *SFL* são feitas nos planos das facetas e estão representadas aqui no plano coronal para facilitar a visualização; (d) Imagem do segmento T10-T11, medidas antropométricas *PDH* e *ADH* respectivamente.

Nos gráficos da Fig. 2 os dados antropométricos da vértebra T11 referentes ao Modelo Atual (MCA) são mostrados em conjunto com os valores medidos por Masharawi (2004,

2005, 2008, 2011), Panjabi (1991) e Singh (2011) permitindo assim uma comparação visual entre geometria atual e as amostras.

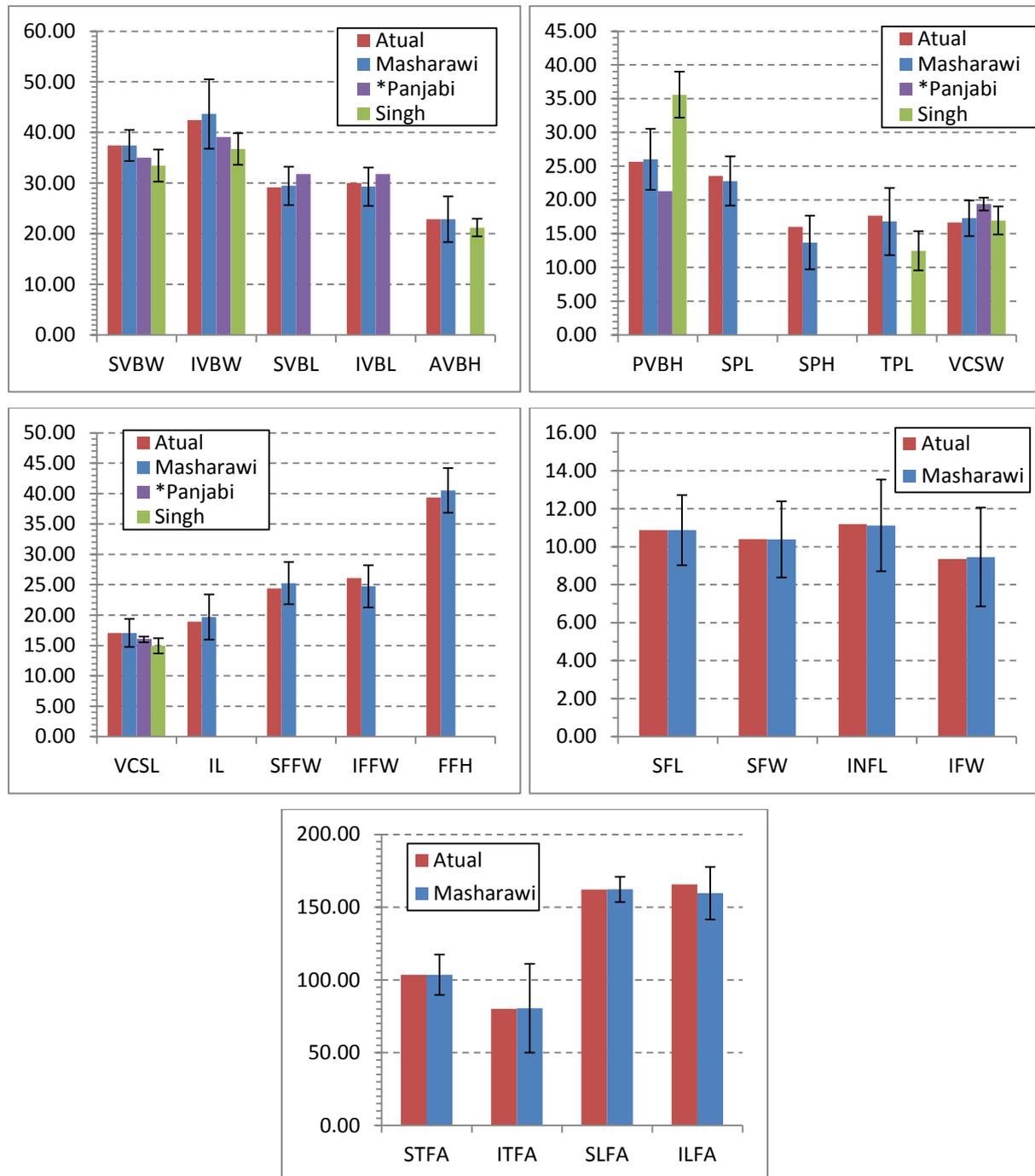


Figura 2: Dados antropométricos da vértebra T11 para Modelo Atual, Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011), Panjabi(1991) e Singh (2011). * Para alguns dados de Panjabi (1991) são desconhecidos os desvios padrões.

2.2 Disco T10-T11

As medidas do MCA para alturas dos discos intervertebrais são ilustradas na Fig. 3. Como as alturas vertebrais médias da amostra de Kunkel (2011) são maiores do que as de

Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011), observa-se que os tamanhos dos discos do modelo atual são maiores do que as médias obtidas por Kunkel (2011).

Fletcher (2015) observou resultados inferiores a Kunkel (2011), fato que pode ser explicado em parte pela diferença de métodos utilizados: Enquanto Kunkel (2011) dissecou os cadáveres para medir as alturas dos discos, Fletcher (2015) utilizou tomografia computadorizada com o cadáver em posição de supino.

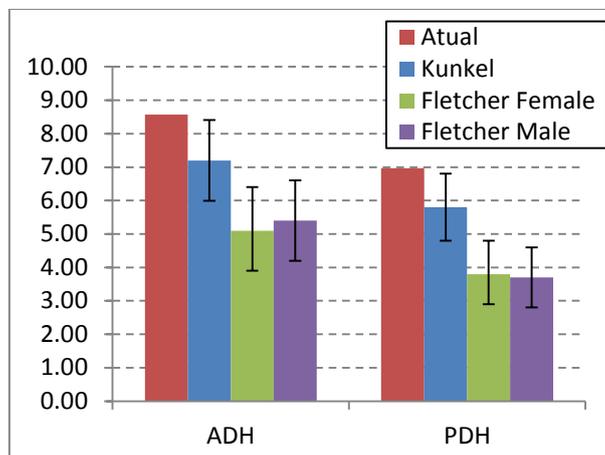


Figura 3: Dados antropométricos dos discos intervertebrais para Modelo Atual, Kunkel (2011) e Fletcher (2015).

2.3 Limitações e sugestões

O tratamento apresentado buscou adequar um formato morfológico da coluna vertebral a dados antropométricos disponíveis na literatura. Entretanto ainda existem alguns parâmetros geométricos que não foram encontrados na revisão bibliográfica, dentre os quais se destaca a distância das facetes ao corpo vertebral. O trabalho de Singh (2011) fornece o tamanho do pedículo, mas esse dado não representa um resultado completo para a posição da faceta em relação ao corpo vertebral. Portanto fica como sugestão a realização de trabalhos com investigações mais detalhadas das medidas antropométricas citadas acima e ilustradas na Fig.4 em projeção no plano sagital com respectivos nomes sugeridos.

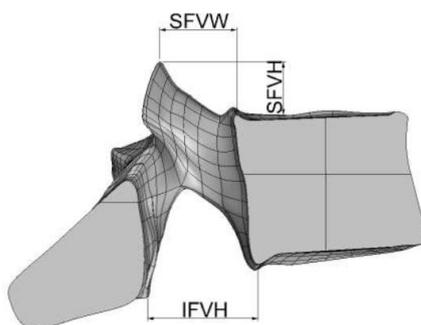


Figura 4: Sugestão para trabalhos futuros investigando as distâncias das juntas facetarias ao corpo vertebral: SFVW-Superior Facet Vertebra Width; SFVH-Superior Facet Vertebra Height; IFVH – Inferior Facet Vertebra Height.

3 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou um estudo dos dados antropométricos para confecção de geometrias *CAD* para desenvolvimento de um modelo de Elementos Finitos da coluna torácica que vise ser estatisticamente representativo de uma coluna média da população.

Neste documento foi apresentado o procedimento proposto executado para a vértebra T11 bem como para o disco do segmento T10-T11.

Obteve-se um modelo geométrico com valores próximos às médias de Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011). Para a maioria dos parâmetros geométricos foram mantidas diferenças menores do que 0,3 d.p. das amostras deste autor, exceto para:

1. Ângulo longitudinal da faceta inferior (*ILFA*): Foi necessário ultrapassar a diferença de 0,3 d.p. da média de Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011) para poder manter o paralelismo com a faceta articular superior da vértebra T12;
2. Altura do processo espinhoso (*SPH*): Foi executada a operação de escalamento do processo espinhoso no MCO visando adequar *SPL* com Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011). O resultado para *SPH* foi automaticamente obtido daquela operação, aceitando-se o valor de diferença igual a 0,7 d.p e justificando-se esse relaxamento pelo fato de que os ligamentos intra-espinhal e supra-espinhoso se ligam diretamente ao processo espinhoso e a medida *SPL* define o braço de alavanca e conseqüentemente as rigidezes rotacionais proporcionadas por estes ligamentos. Portanto foi estabelecido como meta atingir a média para *SPL* e aceitar *SPH* resultante desde que menor do que 1 d.p.

Também é possível visualizar que mesmo comparando com outros estudos da literatura, as diferenças alcançadas são menores do que 2,0 d.p. (quando o d.p. é conhecido) para todas as medidas com exceção do parâmetro *PVBH* medido por Singh (2011). Este desvio presume-se ocorrer por se tratar uma amostra com etnia diferente da amostra de Masharawi (2004, 2005, 2008, 2011), confirmando assim a importância deste tipo de estudo antropométrico e possível necessidade de desenvolvimento de técnicas cirúrgicas e próteses específicas para cada tipo de etnia. Em comparação com o estudo de Panjabi (1991), o desvio padrão para algumas medidas é desconhecido, porém é possível visualizar que as diferenças são pequenas, fato esperado uma vez que se tratam amostras da mesma população.

Pode-se concluir então que, apesar das limitações expostas na seção 2.3, o procedimento geométrico proposto é capaz de resultar em um modelo de geometria controlada com características antropométricas estatisticamente representativas de uma média de população humana, portanto apto a servir como bancada de testes para análise de próteses, procedimentos cirúrgicos e tratamentos de problemas na coluna.

Agradecimentos

AGRADECEMOS AO CNPQ E CAPES PELO FOMENTO À PESQUISA.

REFERENCIAS

- Fletcher, J. G. R., Stringer, M. D., Briggs, C. A., Davies, T. M., & Woodley, S. J. (2015). CT morphometry of adult thoracic intervertebral discs. *European Spine Journal*, 24(10), 2321–2329. <https://doi.org/10.1007/s00586-015-3925-y>
- Kunkel, M. E., Herkommer, A., Reinehr, M., Böckers, T. M., & Wilke, H. J. (2011). Morphometric analysis of the relationships between intervertebral disc and vertebral body heights: An anatomical and radiographic study of the human thoracic spine. *Journal of Anatomy*, 219(3), 375–387. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2011.01397.x>
- Masharawi, Y., Rothschild, B., Dar, G., Peleg, S., Robinson, D., Been, E., & HersHKovitz, I. (2004). Facet orientation in the thoracolumbar spine: three-dimensional anatomic and biomechanical analysis. *Spine*, 29(16), 1755–1763. <https://doi.org/00007632-200408150-00009> [pii]
- Masharawi, Y., Rothschild, B., Salame, K., Dar, G., Peleg, S., & HersHKovitz, I. (2005). Facet tropism and interfacet shape in the thoracolumbar vertebrae: characterization and biomechanical interpretation. *Spine*, 30(11), E281–E292. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000164098.00201.8d>
- Masharawi, Y., & Salame, K. (2011). Shape variation of the neural arch in the thoracic and lumbar spine: Characterization and relationship with the vertebral body shape. *Clinical Anatomy*, 24(7), 858–867. <https://doi.org/10.1002/ca.21175>
- Masharawi, Y., Salame, K., Mirovsky, Y., Peleg, S., Dar, G., Steinberg, N., & HersHKovitz, I. (2008). Vertebral body shape variation in the thoracic and lumbar spine: Characterization of its asymmetry and wedging. *Clinical Anatomy*, 21(1), 46–54. <https://doi.org/10.1002/ca.20532>
- Panjabi, M. M., Takata, K., Goel, V., Federico, D., Oxland, T., Duranceau, J., & Krag, M. (1991). Thoracic Human Vertebrae Quantitative Three-Dimensional Anatomy. *Spine*. <https://doi.org/10.1097/00007632-199108000-00006>
- Singh, R., Srivastva, S. K., Prasath, C. S. V., Rohilla, R. K., Siwach, R., & Magu, N. K. (2011). Morphometric measurements of cadaveric thoracic spine in Indian population and its clinical applications. *Asian Spine Journal*, 5(1), 20–34. <https://doi.org/10.4184/asj.2011.5.1.20>