

APLICAÇÕES DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NOS ESTUDOS BIOMECÂNICOS DA COLUNA VERTEBRAL

L. A. Aurich*, H. Vieira Neto* e S. L. Stebel*

*Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, UTFPR, Curitiba, Brasil

e-mail: aurich_lucas@yahoo.com.br

Resumo: O método de elementos finitos (EF) é uma técnica numérica que possibilita a construção de modelos computacionais capazes de simular o comportamento de estruturas mecânicas a forças externas. O desenvolvimento de modelos biológicos detalhados por meio desse método trouxe grandes avanços ao estudo da biomecânica. Este artigo analisa as aplicações do método de elementos finitos nos estudos biomecânicos da coluna vertebral, notadamente no crescente desenvolvimento de novas técnicas cirúrgicas.

Palavras-chave: Coluna vertebral, biomecânica, método de elementos finitos.

Abstract: *The finite elements method is a numerical technique, which enables the construction of computer models that simulate the behavior of mechanical structures to external forces. The development of detailed biological models using this method brought great advances to biomechanics. This paper reviews the applications of the finite elements method in biomechanical studies of the spine, especially regarding the increasing development of new surgical techniques.*

Keywords: *Spine, biomechanics, finite elements method.*

Introdução

O método de elementos finitos (EF) é uma técnica numérica amplamente difundida na área de engenharia. Caracteriza-se pela divisão de uma estrutura em partes menores denominadas elementos. Por meio da solução de equações diferenciais parciais, que envolvem várias funções incógnitas com múltiplas variáveis, o método de EF cria modelos computacionais capazes de prever o comportamento de estruturas a ações externas [1].

O desenvolvimento de modelos computacionais detalhados de estruturas biológicas trouxe grandes avanços à engenharia biomédica, especialmente na biomecânica [2]. Na coluna vertebral, estudos biomecânicos são importantes tanto para conhecimento da fisiopatologia das lesões quanto para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e tratamento. Usualmente esses estudos são realizados por meio de experimentos *in vitro* aplicados em segmentos da coluna vertebral obtidos de cadáveres. Estudos em seres vivos fornecem informações mais fidedignas e mais próximas da realidade, no entanto aspectos éticos e legislação mais rigorosa exigem redução do uso de modelos que empregam animais vivos [3].

Ao longo das últimas décadas, o método de EF tornou-se uma alternativa importante na avaliação biomecânica da coluna vertebral, com a vantagem de não estar sujeita às restrições éticas relacionadas aos outros métodos. Modelos computacionais da coluna vertebral são desenvolvidos para avaliar de uma série de intervenções, e também para investigar os riscos de fratura das vértebras e de degeneração dos discos intervertebrais.

O objetivo deste artigo é revisar e discutir as aplicações do método de EF nos estudos biomecânicos da coluna vertebral, analisando os modelos computacionais desenvolvidos e os estudos nos quais essa técnica é utilizada para avaliação de novas intervenções cirúrgicas.

Materiais e métodos

Revisou-se artigos recentes que aplicam o método de EF nos estudos biomecânicos da coluna vertebral. A pesquisa foi conduzida no PubMed, utilizando-se as palavras-chave “*finite elements*” e “*spine*”. Foram incluídos artigos originais e de revisão, com enfoque nos estudos que simulam o comportamento biomecânico da coluna vertebral frente a novas técnicas cirúrgicas. Artigos de validação de modelos tridimensionais da coluna vertebral que não avaliavam patologias ou tratamentos específicos foram excluídos. Os modelos tridimensionais desenvolvidos podem ser divididos em modelos de vértebras, de discos intervertebrais e de segmentos vertebrais.

Modelos de Vértebras – Os modelos computacionais de vértebras criados pelo método de EF facilitam a investigação das propriedades do componente ósseo da coluna vertebral, permitindo testes mais elaborados do que aqueles possíveis nos experimentos *in vitro*. Devido à relativa simplicidade anatômica da vértebra, a validação desses modelos computacionais é mais fácil quando comparada aos modelos de discos intervertebrais e de segmentos vertebrais [4].

A vértebra é dividida anatomicamente em duas porções: o corpo vertebral e o arco vertebral. O corpo vertebral apresenta uma série de características que devem ser consideradas na simulação – possui uma camada interna de osso esponjoso, envolvida por uma camada externa de osso compacto, as quais diferem entre si nas suas propriedades mecânicas estruturais.

Como o corpo vertebral é o principal local acometido nas fraturas osteoporóticas, usualmente é exigido que os modelos apresentem estreitamento do osso cortical e redução da densidade do osso esponjoso para simular esta doença [5].

Modelos de corpos vertebrais fornecem informações valiosas da distribuição de carga na coluna vertebral, tanto na simulação de vértebras normais quanto de vértebras degeneradas. Alguns modelos foram construídos simulando a presença de algum material no interior do corpo vertebral, como tumores que podem invadir e alterar as propriedades dos ossos esponjoso e cortical [4].

Os componentes do arco vertebral – porção posterior da vértebra – apresentam geometria complexa, tornando desafiadora a construção de modelos biomecânicos computacionais. Em consequência desse fato, muitos estudos focam no corpo vertebral e excluem o arco vertebral das análises.

Os métodos para criação de modelos de EF das vértebras podem ser divididos entre aqueles em que a geometria coincide com a de um espécime *in vitro* e aqueles em que é desenvolvida uma geometria genérica que representa características médias de várias vértebras. Atualmente, também são empregados métodos que geram modelos específicos do indivíduo por meio da conversão direta de imagens de tomografia computadorizada [6], conforme mostra a Figura 1.

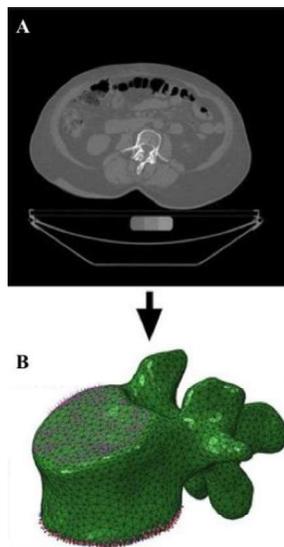


Figura 1: Exemplo de modelo computacional da vértebra L1 (B) desenvolvido de imagens de tomografia computadorizada (A) de um indivíduo [6].

A técnica de fixação vertebral com parafusos pediculares é a mais comumente utilizada nas diversas doenças que necessitam de artrodese da coluna vertebral. No entanto, ocorre a soltura dos parafusos pediculares em alguns casos em que a qualidade óssea do paciente não é favorável, levando à perda da correção e a falhas na fusão óssea. Matsukawa e colaboradores [7] estudaram uma nova técnica de implante de parafusos pediculares através do osso cortical, que apresentaria

menor risco de soltura. Essa técnica foi comparada biomecânicamente com a técnica tradicional em 30 modelos tridimensionais da vértebra L4, gerados a partir de imagens de tomografia computadorizada de pacientes. O trajeto pelo osso cortical demonstrou uma maior capacidade de fixação e maior rigidez na flexão e extensão do que o trajeto tradicional, conforme ilustra a Figura 2.

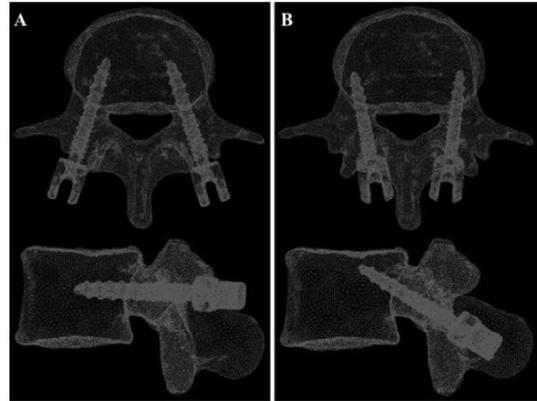


Figura 2: Modelo computacional da vértebra L4 ilustrando o trajeto tradicional (A) e o trajeto pelo osso cortical (B) [7].

Modelos de discos intervertebrais – Os discos intervertebrais são estruturas fibrocartilaginosas complexas que articulam os corpos vertebrais. São compostos por duas porções anatômicas: externamente por um anel fibroso e internamente por um material gelatinoso denominado núcleo pulposo. Os discos sofrem deformações em decorrência de cargas axiais e da mobilização vertebral. A criação de modelos que simulam o disco intervertebral é mais desafiadora, devido à sua complexidade anatômica e funcional.

Assim como na simulação de vértebras, modelos de disco intervertebral foram desenvolvidos no intuito de investigar diferentes patologias. O foco das pesquisas foi na compreensão do processo de degeneração e envelhecimento do disco e seu efeito biomecânico. Modelos computacionais trouxeram conhecimentos importantes sobre mecanismos de funcionamento e de falha discal [8]. Estudos de EF demonstraram risco elevado de ruptura do ânulo fibroso sob grandes cargas simulando trabalho pesado. O risco de ruptura é maior na região póstero-lateral, especialmente quando há degeneração discal, e esse é o local mais comum de ocorrência de hérnia de disco intervertebral, como mostra a Figura 3.

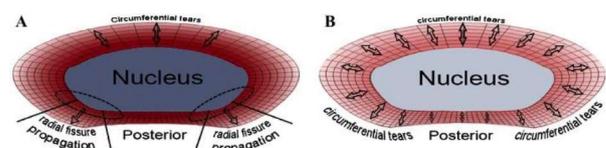


Figura 3: Modelo de disco intervertebral normal (A) e degenerado (B) ilustrando as tensões e os locais com maior risco de ruptura radial do anel fibroso [8].

Alguns estudos avaliaram técnicas cirúrgicas para tratamento de doenças do disco intervertebral utilizando o método de EF. Zhang e Teo [9] revisaram os trabalhos que avaliam a biomecânica de vários procedimentos cirúrgicos para a degeneração discal, incluindo técnicas de fusão vertebral, técnicas de substituição do disco intervertebral e técnicas de estabilização dinâmica. A análise por EF trouxe importantes informações sobre a eficácia biomecânica desses procedimentos.

Modelos de segmentos vertebrais – O segmento vertebral é a unidade funcional da coluna que corresponde a duas vértebras consecutivas, o disco intervertebral e os ligamentos intervertebrais. Modelos computacionais de EF tem sido amplamente utilizados para simular segmentos vertebrais no desenvolvimento de novas técnicas para tratamento de doenças da coluna.

Devido à sua maior complexidade anatômica e funcional, a simulação do segmento vertebral é mais difícil quando comparada aos modelos de vértebras e de discos intervertebrais [4]. Alguns estudos tem utilizado dados de tomografia computadorizada e de ressonância magnética para construção dos modelos.

Em um estudo típico de EF para avaliação de um novo dispositivo, um modelo computacional de segmento vertebral precisa ser inicialmente criado e validado. Para investigar o efeito do implante na coluna vertebral, vários movimentos são simulados no modelo, como flexão, extensão, inclinação lateral e rotação axial.

Nas cirurgias de deformidades vertebrais, a restauração do alinhamento sagital da coluna é o objetivo mais importante do tratamento. As abordagens cirúrgicas classicamente utilizadas neste intuito incluem ressecções amplas do arco e do corpo vertebral (osteotomias de subtração pedicular) e agregam um alto índice de complicações. Várias técnicas minimamente invasivas estão sendo desenvolvidas com o objetivo de reduzir essas complicações e o método de EF tem sido utilizado para avaliar estes novos tratamentos.

Uribe e colaboradores [10] avaliaram uma nova técnica para restauração do alinhamento sagital que utiliza espaçadores hiperlordóticos entre os corpos vertebrais, pelo método de EF. Foi determinada a máxima lordose obtida com diferentes variações da técnica, que incluíam preservação do ligamento longitudinal anterior (LLA), abertura do LLA isolada, abertura do LLA associada a facetectomia e abertura do LLA associada a osteotomia posterior. Um modelo tridimensional do segmento L3-L4 foi criado a partir de dados da tomografia computadorizada da coluna vertebral de um espécime cadavérico, simulando vértebras e principais ligamentos, conforme ilustrado na Figura 4.

O estudo demonstrou aumento da lordose em todos os casos após inserção do espaçador e ressecção do LLA. Facetectomia aumentou a lordose segmentar, porém resultou em contato entre os processos espinhosos. O aumento do tamanho do espaçador tendeu a aumentar a quantidade de lordose obtida, porém em alguns casos foi necessária uma osteotomia posterior adicional para maximizar a lordose.

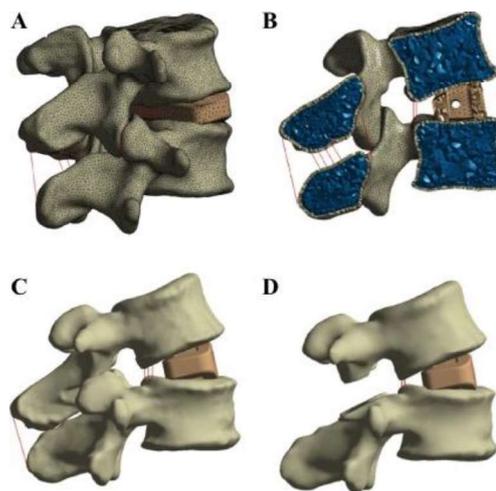


Figura 4: Previsão do aumento da lordose com colocação do espaçador intervertebral por diferentes técnicas [10]: Modelo do segmento vertebral L3-L4 (A); abertura isolada do LLA (B); abertura do LLA associada a facetectomia (C); Abertura do LLA associada a osteotomia posterior (D).

A estenose do canal vertebral lombar é uma doença frequente na população adulta e resulta em dor radicular e claudicação neurogênica. O tratamento cirúrgico padrão é a descompressão do canal vertebral, realizada por meio da ressecção dos elementos posteriores das vértebras. Novas técnicas cirúrgicas menos invasivas foram desenvolvidas com o intuito de se preservar a estabilidade vertebral no segmento operado. Kim e colaboradores [11] avaliaram o comportamento biomecânico da osteotomia dos processos espinhosos, uma nova técnica que preserva o complexo ligamentar posterior. Um modelo computacional do segmento L2-L5 foi criado a partir de dados de tomografias computadorizadas de um paciente e a osteotomia dos processos espinhosos foi comparada com a descompressão padrão, conforme ilustra a Figura 5.

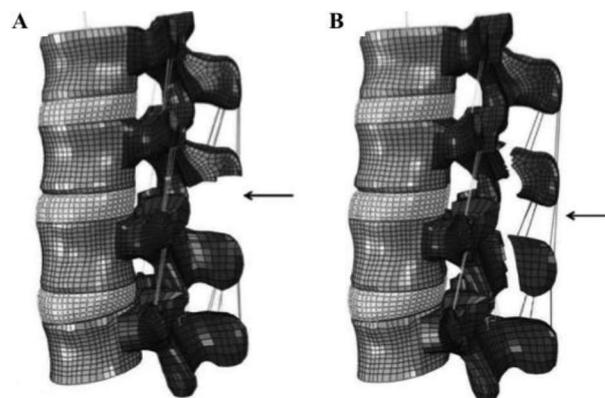


Figura 5: Modelo de elementos finitos dos segmentos L2-L5: na laminectomia convencional (A) observa-se a ressecção do complexo ligamentar posterior (seta); na osteotomia dos processos espinhosos (B) os ligamentos posteriores são preservados (seta) [11].

Ambas as técnicas demonstraram aumento da instabilidade segmentar em comparação ao modelo intacto. Porém, a osteotomia dos processos espinhosos mostrou maior estabilidade quando comparada à descompressão padrão.

Discussão

O método de EF aplicado a modelos isolados de vértebras ajudou no conhecimento da distribuição de cargas, na avaliação dos riscos de fraturas patológicas vertebrais e na investigação de efeitos de procedimentos cirúrgicos. A vantagem desse método é a ausência de tecidos moles como discos intervertebrais e ligamentos, o que torna a criação e a validação do modelo mais simples.

Modelos de discos intervertebrais, apesar de mais complexos, trouxeram conhecimentos importantes da biomecânica do disco normal e de suas alterações com o envelhecimento. Além disso, diversas opções de tratamento cirúrgico da doença degenerativa discal foram adequadamente avaliadas por este método.

Atualmente os modelos de segmentos vertebrais são os mais utilizados para avaliação biomecânica de novos dispositivos e novas técnicas desenvolvidas para o tratamento minimamente invasivo da coluna vertebral. Com o avanço tecnológico dos exames de imagem e dos recursos de computação, espera-se a possibilidade de criação de modelos altamente específicos baseados nas características do indivíduo estudado.

Conclusão

O método de EF é aplicável a uma grande variedade de condições que envolvem a coluna vertebral. O método traz simulações biomecânicas realistas, que contribuam com o desenvolvimento de novas técnicas para tratamento da coluna vertebral, tais como cirurgias menos invasivas para descompressão e dispositivos para correção de deformidades.

Referências

[1] Kurutz M. Finite Element Modeling of the Human Lumbar Spine. *Finite Element Analysis*, David Moratal (Ed.). 2010.

[2] Erdemir A, Guess TM, Halloran J, Tadepalli SC, Morrison TM. Considerations for reporting finite element analysis studies in biomechanics. *Journal of Biomechanics*. 2012; 45(4):625-33.

[3] Adams M, Dolan P. Spine biomechanics. *Journal of Biomechanics*. 2005; 38(10):1972-83.

[4] Jones AC, Wilcox RK. Finite element analysis of the spine: towards a framework of verification, validation and sensitivity analysis. *Medical Engineering & Physics*. 2008; 30(10):1287-1304.

[5] Ara ED, Schmidt R, Pahr D, Varga P, Chevalier Y, Patsch J, Kainberger F, Zysset P. A nonlinear finite element model validation study based on a novel experimental technique for inducing anterior

wedge-shape fractures in human vertebral bodies *in vitro*. *Journal of Biomechanics*. 2010; 43(12): 2374-2380.

[6] Carpenter RD. Finite element analysis of the hip and spine based on quantitative computed tomography. *Current Osteoporosis Reports*. 2013; 11(2):156-62.

[7] Matsukawa K, Yato Y, Imabayashi H, Hosogane N, Asazuma T, Nemoto K. Biomechanical evaluation of the fixation strength of lumbar pedicle screws using cortical bone trajectory: a finite element study. *Journal of Neurosurgery Spine*. 2015; 1-8.

[8] Schmidt H, Galbusera F, Rohlmann A, Shirazi-Adl A. What have we learned from finite element model studies of lumbar intervertebral discs in the past four decades? *Journal of Biomechanics*. 2013; 46(14):2342-2355.

[9] Zhang QH, Teo EC. Finite element application in implant research for treatment of lumbar degenerative disc disease. *Medical Engineering & Physics*. 2008; 30(10):1246-1256.

[10] Uribe JS, Harris JE, Beckman JM, Turner AWL, Mundis GM, Akbarnia BA. Finite element analysis of lordosis restoration with anterior longitudinal ligament release and lateral hyperlordotic cage placement. *European Spine Journal*. 2015; 24(3):S420-S426.

[11] Kim H, Chun H, Kang K, Lee H, Chang B, Lee C, Yeom JS. Finite element analysis for comparison of spinous process osteotomies technique with conventional laminectomy as lumbar decompression procedure. 2015; 56(1):146-153.