

AVALIAÇÃO ANALÍTICO-NUMÉRICA DE FÊMUR HUMANO UTILIZANDO PROCESSAMENTO DE IMAGEM MÉDICA

Santos, L. E.F., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, luiz.frezzatto@gmail.com

Silveira, Z.C., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, silveira@sc.usp.br

Mattazio, R.R., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, mattazio@gmail.com

Resumo: Neste trabalho é proposto um estudo comparativo entre dois modelos: analítico e numérico da estrutura de um fêmur humano, mediante a obtenção de uma imagem médica tridimensional (tomografia). O conhecimento do comportamento mecânico de distintas estruturas contribui sobejamente nas diversas esferas multidisciplinares na atualidade, beneficia em especial a bioengenharia. O procedimento inclui o tratamento da imagem médica apoiando-se no protocolo BioCAD, tendo o propósito de identificar marcos anatômicos na estrutura, ulterior exportação para um programa Computacional de Auxílio à Engenharia (CAE), e submissão a avaliação numérica por intermédio do método dos elementos finitos (MEF). Os resultados encontrados com o modelo analítico indicaram valores de tensão axial e de deslocamento de 21,77 MPa e 4,91mm, respectivamente. A análise numérica indicou valores na mesma ordem de 24,22MPa e 3,27mm, com variação de 10,12% para a estimativa da tensão axial e 50,15% para deslocamento. Os resultados apontam que a aplicação do MEF, aliada à escolha do modelo de geometria do material assevera ser eficiente na compreensão do comportamento mecânico da estrutura biológica, fêmur.

Palavras Chaves: BioCAD; Elementos Finitos; Imagens Médicas; Biomecânica

1. INTRODUÇÃO

O entendimento do comportamento mecânico de diferentes estruturas auxilia, não somente as áreas das diferentes aplicações da engenharia, mas também áreas multidisciplinares que nos últimos anos tem se beneficiado desta fronteira, como a bioengenharia. A biomecânica, com seu vasto campo de aplicações, pode proporcionar, por exemplo, melhor qualidade de vida para indivíduos com idade mais avançada, com quadros de osteoporose. Dentre as contribuições que a engenharia pode proporcionar em parceria com áreas da medicina, situa-se o conhecimento do comportamento mecânicos dos materiais e métodos numéricos computacionais aplicados a problemas de biomecânica e bioengenharia. O protocolo BioCAD (Sun et al, 2005) desempenha um papel importante entre a aquisição de imagens médicas tridimensionais e análise de estruturas em um programa CAE (*Computer Aided Engineering*), dada a complexidade das superfícies de estruturas anatômicas as quais diferem significativamente das geometrias de componentes mecânicos. O BioCAD possibilita a localização de marcos anatômicos, importantes para as análises relativas à biomecânica do movimento do membro e a comunicação das informações de anatomia. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo biomecânico estrutural analítico e numérico de um fêmur humano, a partir de uma imagem médica tridimensional (3-D), utilizando a condição de apoio sobre apenas um membro. O trabalho baseou-se nos modelos propostos por Frankel e Burstein (1971), Benedeck e Villars (1973), e Frankel e Nordin (1980).

2. METODOLOGIA

Para o procedimento de pesquisa utilizou recursos computacionais que permitiram a representação gráfica virtual da estrutura a ser analisada. Desta maneira obteve-se a imagem médica no formato DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) proveniente do repositório OSIRIX de uma tomográfica computadorizada (OBELIX), esta imagem foi, então, submetida a tratamento no software InVesalius (desenvolvido pelo CTI), no qual aplicou-se filtros definidos por voxels (faixa do filtro entre 226 e 3017) com a finalidade de selecionar a estrutura para o estudo e obter sua representação volumétrica. De maneira a adequar a geometria para a análise numérica, recorreu-se ao protocolo BioCAD auxiliado pelo software Rhinoceros®. Utilizou-se da reconstrução 3D obtida e, sobre esta, criou-se linhas de superfície sobre os marcos anatômicos e outras secundária de forma que a interpolação destas gerou as superfícies do sólido e este pôde ser analisado numericamente utilizando o método dos elementos finitos.

Para a elaboração dos modelos analítico e numérico adotou-se como hipóteses:

- O estudo procedeu sob a condição do indivíduo apoiado sobre uma única perna.
- Os únicos esforços adotados são provenientes dos músculos abdutores e da força agindo sobre a cabeça femoral.
- Os músculos abdutores são agregados em um feixe ao longo de uma única linha de ação e, a força agindo na cabeça do fêmur é uma carga pontual e não distribuída.
- Todas as forças atuam no plano coronal ou frontal, deste modo foram obtidos os esforços internos à estrutura, força normal, cortante e momento, no plano coronal para diversas seções transversais ao longo do corpo do fêmur. Com as magnitudes dos esforços internos pôde-se calcular a tensão axial em qualquer ponto da estrutura.
- O ângulo formado pelo feixe dos músculos abdutores com relação ao eixo vertical é de aproximadamente 30°, como assumido por Frankel e Burstein (1971).

A) Modelo Analítico

Com o cálculo analítico baseado na mecânica dos sólidos foram avaliados os parâmetros físicos da estrutura e seus esforços internos para a obtenção da tensão axial e deslocamentos resultantes.

A análise da tensão e deslocamento deste estudo considerou de maneira genérica o peso (W) de um indivíduo estando apoiado, apenas, sobre um dos membros inferiores. Com este procedimento foi possível generalizar o comportamento mecânico da estrutura. A análise biomecânica se constituiu em objeto de pesquisas realizadas anteriormente por Frankel e Burstein (1971), Benedek e Villars (1973) e Frankel e Nordin (1980). Com a finalidade de pautar o presente estudo buscou-se, especificamente, referenciais na pesquisa publicada por Benedek e Villars. (1973), em virtude de sua interpretação geométrica sobre o fêmur. Com o auxílio do diagrama de corpo livre (DCL) apontado na Fig. (1-a) calculou-se as forças atuantes no trocante maior por intermédio dos músculos abdutores (A) e na cabeça femoral (R). No modelo proposto as cargas A e R foram aplicadas na superfície do fêmur, deste modo, se recorre a Fig. (1-b) obtida em CAD para calcular o momento em torno do centro de massa da cabeça do fêmur (M_Q), de maneira a obter o equilíbrio estático na estrutura.

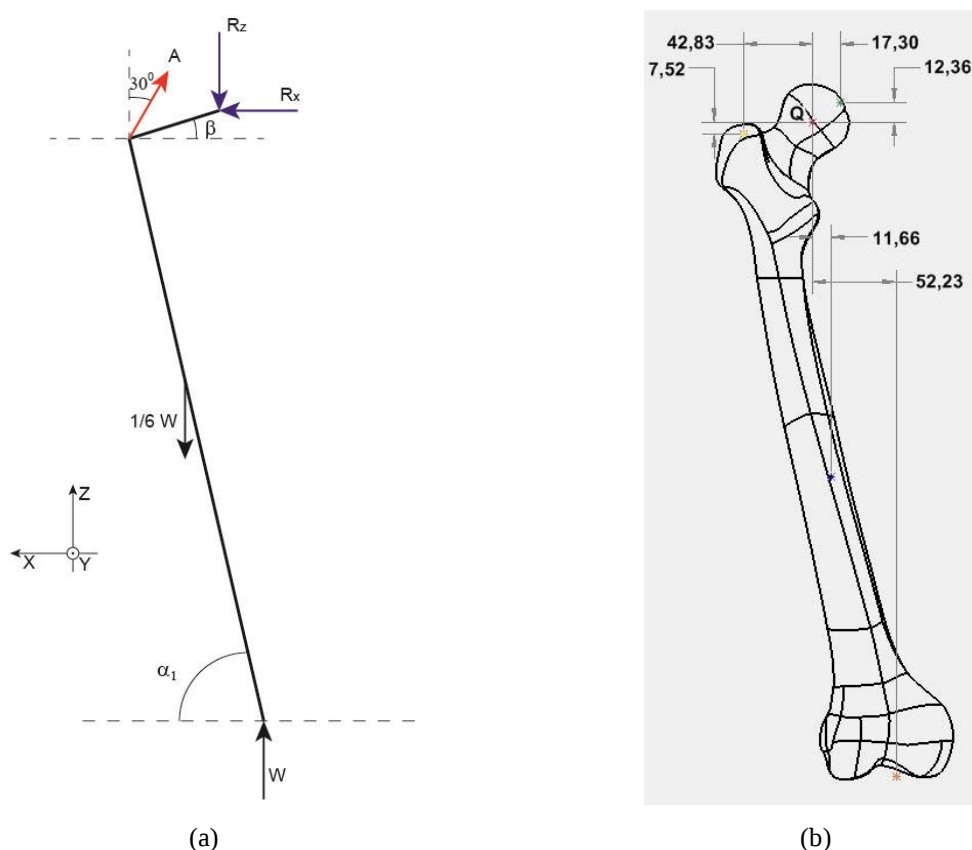


Figura 1 – Diagrama de corpo livre (a) e representação do CAD em 2D,

Ao se efetuar os cálculos para as reações de apoio e esforços internos sob o modelo biomecânico analítico deve-se definir a forma da seção transversal da estrutura de modo a se obter dados inerentes à geometria. Adotou-se como hipóteses simplificadores neste caso dois cilindros maciços unidos com características isotrópicas (osso cortical). Os dados aplicados nos cálculos foram gerados através de análise do modelo obtido em software CAD. Os ângulos α_1 e β apresentam valores de 77° e $17,34^\circ$ respectivamente. A Tab. (1) apresenta as propriedades geométricas utilizadas no cálculo.

Tabela 1 - Propriedades geométricas do modelo analítico.

Propriedade	Cilindro inferior (diáfise do fêmur)	Cilindro superior (colo do fêmur)
Comprimento [mm]	411,96	65,01
Raio da menor seção transversal [mm]	14,516	15,529
Momento de Inércia [mm ⁴]	34872,069	45673,452
Área [mm ²]	661,978	757,594
Módulo de Young [GPa] (Turner <i>et al.</i> , 1999)	20,02	

Empregou-se para a determinação o valor do σ e δ uma massa aplicada de 80 kg. Desse modo, obteve-se os valores para as forças atuantes no trocante maior e na cabeça femoral, respectivamente, de: $A = 667,865\text{N}$ e $R = 1276,556\text{N}$. A tensão foi calculada pelo somatório das componentes causadas pela força normal e o momento fletor na região de menor diâmetro da diáfise localizada pouco abaixo do trocante menor. O deslocamento foi calculado utilizando a força cortante interna à estrutura.

B) Modelo Numérico

A análise numérica em ANSYS® foi realizada utilizando propriedades para material transversalmente isotrópico conforme Tab.(2). Neste modelo empregou-se o fêmur como osso maciço sem a cavidade medular.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do fêmur

Propriedade	Valor
Módulo de Young direção X [GPa]	17,0
Módulo de Young direção Y [GPa]	11,5
Módulo de Young direção Z [GPa]	11,5
Coefficiente de Poisson XY	0,51
Coefficiente de Poisson YZ	0,31
Coefficiente de Poisson XZ	0,31
Modulo de Cisalhamento XY [GPa]	3,3
Modulo de Cisalhamento YZ [GPa]	3,6
Modulo de Cisalhamento XZ [GPa]	3,3

Fonte: Cowin, 1989, pp. 102

Os eixos coordenados utilizados no modelo seguem a seguinte orientação: Eixo X está alinhado com o eixo da diáfise do fêmur. Os planos Y e Z estão alinhados transversalmente ao eixo X.

Para a geração de malha no ANSYS® optou-se por elementos tetraédricos com tamanho 3,79 mm, o que reduziu consideravelmente o tempo de processamento computacional e a complexidade da malha do modelo. O tamanho dos elementos foi determinado através de análise de convergência. As cargas aplicadas a este modelo foram idênticas àquelas do modelo analítico em um mesmo plano, aplicou-se o peso do membro em uma circunferência localizada no ponto médio da diáfise. A condição de engastamento utilizada foi aplicada sobre uma linha de superfície na região distal do fêmur. As condições de contorno assim com os carregamentos estão ilustradas na Fig. (2-a) e a malha de elementos finitos na Fig. (2-b).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no modelo analítico e numérico são mostrados na Fig.(3) e Tab.(3). Ao comparar os resultados verificaram-se discrepâncias. A tensão apresentou valor 10,12% menor de acordo com o modelo biomecânico analítico, a fonte desta discrepância recaiu sobre as simplificações geométricas adotadas e aos distintos modelos constitutivos empregados, posto que no modelo analítico elegeu-se o modelo isotrópico e no numérico o transversalmente isotrópico. O deslocamento, por outro lado, mostrou valor 50,15% maior, justificou-se esta discordância não apenas pelas simplificações aplicadas no modelo analítico, mas, também, pela diferença do volume entre os modelos, geometria homogênea e propriedades materiais isotrópicas. Comparando-se ambos os modelos observam-se que, o modelo biomecânico analítico possui, portanto, quantidade menor de material para análise do que o modelo numérico. Assim sendo, a estrutura torna-se suscetível a maiores deslocamentos causados pela aplicação de forças.

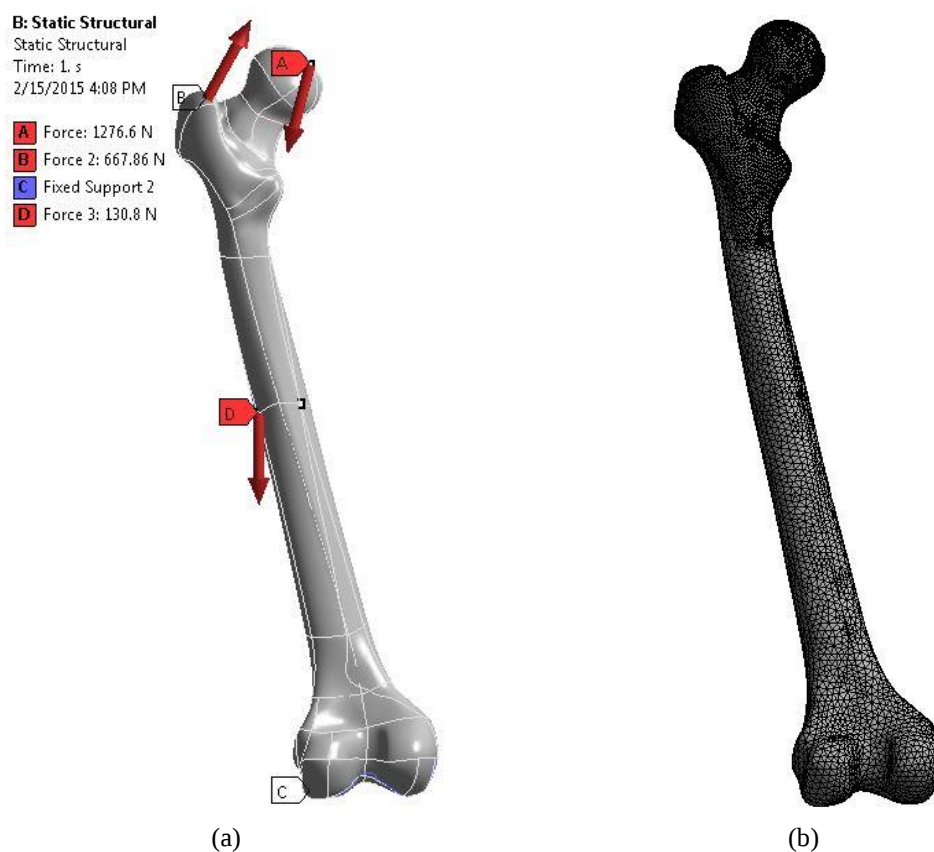


Figura 2 (a) Condições de contorno e carregamento; (b) Malha de elementos finitos.

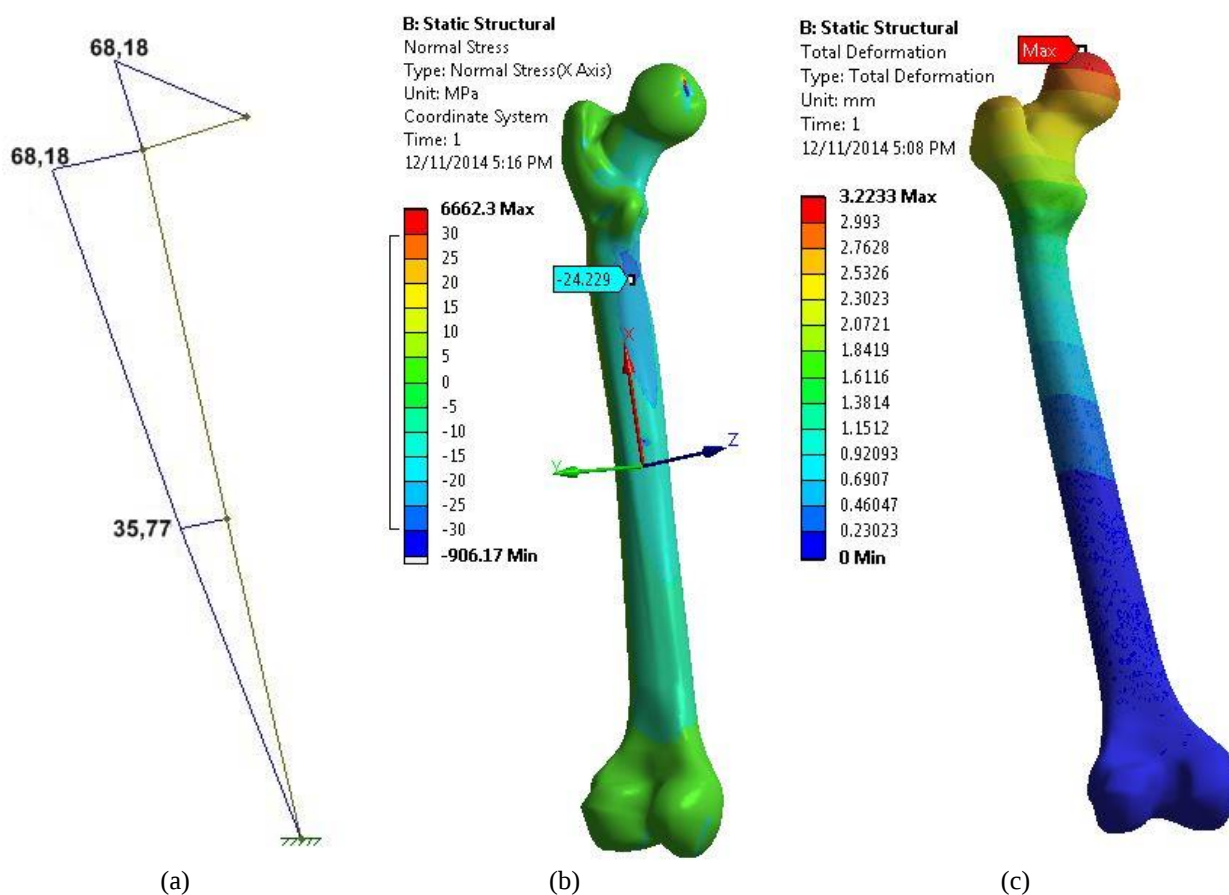


Figura 3 (a) Gráfico do momento interno calculado no modelo analítico; (b) Campo de variação das tensões axiais; (c) Campo de variação das deformações do fêmur.

Tabela 3 - Comparação entre os modelos analítico e numérico

Parâmetro	Método Analítico	Método Numérico	Diferença [%]
Tensão [MPa]	21,77	24,23	10,12
Deslocamento [mm]	4,91	3,27	50,15
Volume [mm ³]	312964,96	510591,65	38,71

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho foram: a obtenção de um modelo analítico simplificado de um fêmur humano e a geração de um modelo computacional criado com base em imagem médica. A partir desta imagem médica (DICOM) foi concebido um modelo CAD ancorado no protocolo BioCAD e, então, o modelo 3D foi exportado para CAE ANSYS®. As análises dos resultados gerados mostram que o uso do Método dos Elementos Finitos vinculado à escolha de um modelo constitutivo apropriado do material pode suscitar resultados mais acurados. Em vista disso, o uso de ferramentas CAE, em específico, programas apoiados no MEF podem auxiliar no projeto de desenvolvimento de próteses e, desse modo, no entendimento do comportamento biomecânico de estruturas ósseas.

Pode-se, ainda, aplicar o modelo analítico como opção para a análise de tensão nas estruturas biológicas dado que este apresenta boa expectativa de resultados para o modelo numérico.

5. REFERÊNCIAS

- Benedek, G. B.; Villars, F. M. H., 1973, "Physics with Illustrative Examples from Medicine and Biology." Vol.1. Reading, Massachusetts London Amsterdam, Ed. Addison-Wesley.
- Cowin, S. C., 1989. "Bone Mechanics." Ed. Boca Raton: Crc Press. 313p.
- Frankel, V. H.; Burstein, A. H., 1971, "Orthopedic Biomechanics." Philadelphia: Lea & Febiger.
- Nordin, F.; Frankel, V. C., 2008. Biomecânica Básica do Sistema Musculoesquelético. 3. ed. Rio de Janeiro. Ed. Guanabara Koogan.
- Sun, W.; Starly, B.; Nam, J.; Darling, A. 2005, Bio-CAD modeling and its applications in computer-aided tissue engineering. "Computer-aided Design." Vol. 37, n. 11, pp.1097-1114.
- Turner, C.H., Rho, J., Takano, Y., Tsui, T.Y., Pharr, G.M. 1999, The elastic properties of trabecular and cortical bone tissue are similar: results from two microscopic measurement techniques. "Journal of Biomechanics". Vol. 32, pp. 437-441.

6. AGRADECIMENTOS

Ao programa de pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia da EESC-USP; a Divisão de Tecnologias Tridimensionais do CTI – Renato Archer, em agradecimento especial ao pesquisador eng. MsC. Daniel Takanori Kemmoku.

7. ABSTRACT

This paper presents two models: analytical and numerical of the structure of a human femur by means of a three-dimensional medical image. The knowledge of the mechanical behavior of different structures widely contributes in various multidisciplinary areas nowadays, benefiting in particular the bioengineering area. The procedure included the treatment of the medical image relying, firstly, on BioCAD in order to identify anatomical landmarks in the structure, and then the result was exported to a Computer Aided Engineering (CAE) program and, finally, submitted it to numerical evaluation through the finite element method (FEM). The results attained by the analytical model indicated values of axial strain and displacement of 21.77 MPa and 4.91mm, respectively. The numerical analysis shows values of the same order of 24.22 MPa and 3.27mm, with an estimate variation of 10.12% for the axial strain and 48.27% for the displacement. The results show that the application of the FEM, together with the choice of the material geometry model asserts to be efficient in understanding the mechanical behavior of the biological structure, femur.

Keywords: BioCAD; finite elements; medical images; biomechanics.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.