

# AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE FÊMUR HUMANO UTILIZANDO PROCESSAMENTO DE IMAGEM MÉDICA, BIOCAD E O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

**Luiz E. Frezzatto Santos; Rafael R. Mattazio; Zilda de Castro Silveira**

Departamento de Engenharia Mecânica (SEM), Escola de Engenharia de São Carlos  
(EESC) – USP

luiz.frezzatto@gmail.com

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo modelar analítica e numericamente a estrutura de um fêmur humano, a partir da obtenção de uma imagem médica tridimensional deste osso. Para analisar os resultados obtidos, o procedimento incluiu o tratamento da imagem médica com um protocolo BioCAD®, a fim de localizar os marcos anatômicos no fêmur e sua exportação para um programa CAE (Ansys® v.15), com finalidade de ser avaliada numericamente pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Essas etapas permitiram um estudo comparativo entre a representação numérica e analítica do fêmur estudado. Os resultados obtidos a partir do modelo analítico indicaram valores de tensão axial e de deslocamento, 22,51 MPa e 4,91 mm, respectivamente. A análise numérica apresentou valores na mesma ordem de 24,63 MPa e 3,31 mm, com diferenças de 8,59% para a estimativa da tensão axial e 48,27% para a deslocamento. Os resultados apontaram que a utilização do MEF, juntamente à escolha propícia do modelo de geometria do material, demonstrou ser eficiente para a compreensão do comportamento mecânico do fêmur.

**Palavras Chaves:** *elementos finitos; BioCAD; modelo analítico; bioengenharia; biomecânica.*

## Abstract

This work presents the analytic and numerical modelling of a human femur structure, from medical 3-D images of the bone. In order to analyze the results, the procedure was composed of the image treatment using BioCAD protocol to locate the anatomical land marks in the femur. So, the model generated was exported to a CAE program (Ansys® v. 15) to be analyzed by Finite Element Method (FEM). After the numerical analysis, it was possible to obtain comparative results between the numerical and analytical representation of the femur. The results from the analytical model indicated values of the axial stress and displacement, 22,51 MPa and 4,91 mm, respectively. The numerical modeling indicated results close to analytical model 24,63 MPa and 3,31 mm, with variance of 8,59% for axial stress estimation and 48,27% for displacement. The results showed that the use of FEM along the propitious choice of model geometry of the material proved to be efficient for understanding the mechanical behavior of the femur.

**Key words:** *finite element; BioCAD, analytical model, bioengineering; biomechanics.*

## 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.

## Objetivos

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 (1970), Benedeck e Villars(1973), e Frankel e Nordin (1980).

## Materiais e Métodos

O procedimento utilizado para gerar os modelos analítico e numérico do fêmur, incluiu o uso de uma base de dados de imagens médicas de domínio público e de programas de computador, descritos a seguir:

a) OsiriX

O repositório OsiriX (<http://www.osirix-viewer.com/datasets/>), base de dados on-line de imagens médicas, permitiu a obtenção de uma tomografia computadorizada (TC) de fêmur, objeto deste estudo.

b) Mimics®

O *software* Mimics® da desenvolvedora belga Materialise converteu o conjunto das imagem médica (TC), em um modelo volumétrico, o qual é usado como referência para a construção do modelo em CAD da estrutura.

c) Rhinoceros®

O *software* Rhinoceros® v 4.0 permite maior liberdade de trabalho para sólidos de geometria complexa. Este possibilitou a construção do modelo 3-D com o uso do protocolo BioCAD para o desenvolvimento da geometria das estruturas anatômicas.

d) ANSYS® Workbench™

O *software* ANSYS® Workbench™ V.15 (versão acadêmica licenciada) objetivou a análise mecânica do fêmur. Neste software, foram atribuídas à geometria criada: as propriedades materiais para o fêmur, conforme dados mostrados na Tabela 1 (Cowin, 1989), as condições de contorno para o estudo (cargas, tipos de apoio e sistema de coordenadas) e as propriedades de malha (tamanho e tipo de elemento) com refinamento desta nas regiões de maior interesse (regiões de aplicação de carga e de geometria complexa). Após a inserção dos itens anteriormente citados, o problema mecânico foi solucionado numericamente pelo software.

Tabela 1 - 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, S.C. (1989), p. 102

Dos eixos coordenados utilizada no modelo segue 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, o que reduz consideravelmente o tempo de processamento computacional e a complexidade da malha do modelo.

Com o intuito de calcular as cargas aplicadas ao modelo, assim como as reações de apoio, o cálculo para equilíbrio estático fundamentou-se no modelo biomecânico proposto por Benedek e Villars (1970).

O cálculo analítico foi baseado em teoria de mecânica dos sólidos (Hibbler, R.C., 2002) e auxiliado pelo programa MATLAB®, de modo a obter parâmetros que conduzissem aos resultados da simulação. Para o modelo do fêmur, foi utilizado um modelo de material isotrópico, com módulo de Young 20,02 GPa, conforme Turner et al. (1999).

## Resultados

### A) Analítico

Com o calculo analítico baseado na mecânica dos sólidos e auxiliado pelo software MATLAB® foram avaliados vários parâmetros da estrutura tais como suas propriedades físicas (momento de inércia e área da seção transversal), esforços internos, tensão axial e deslocamentos resultantes da aplicação de cargas. Foram aferidos os valores de tensão axial correspondente a 22,51 MPa para o ponto de avaliação e, de deslocamento de 4,91 mm na estrutura.

### B) Numérico

A análise numérica em ANSYS® forneceu resultados correspondentes a 24,63 Mpa para tensão axial no ponto de análise e deslocamento de 3,31 mm na estrutura. Os resultados e a comparação entre os modelos são apresentados na Tabela 2. As figuras 1 (a) e (b) apresentam as tensões principais e deslocamento total do fêmur estudado.

Tabela 2 – Comparação entre os modelos analítico e numérico.

	Método Analítico	Método Numérico	Erro [%]
Tensão [MPa]	22,51	24,63	8,59
Deslocamento [mm]	4,91	3,31	48,27

## Conclusões

Por intermédio dos dados obtidos nas análises, verificou-se que os resultados do valor da tensão se encontram próximos e dentro da margem de erro aceitável entre o calculo analítico e numérico. Possivelmente tais erros podem ser atribuídos à variação do ponto de aplicação de carga e da geometria da estrutura, uma vez que o modelo analítico considera a estrutura sob uma perspectiva 2-D. Pode-se sugerir ainda a ocorrência dos erros em virtude da escolha do tipo de simetria do material, em que no modelo numérico considerou-se o fêmur como material transversalmente isotrópico (Cowin, 1989) e no analítico, para simplificação, como isotrópico. O erro associado ao deslocamento se mostra acima do esperado,

supunha-se este da mesma ordem do evidenciado na tensão. Novas análises e correções estão em andamento a fim de determinar as possíveis causas.

Os resultados evidenciam que o Método dos Elementos Finitos junto à escolha de um modelo apropriado do comportamento do material pode ser um procedimento para se entender o comportamento mecânico do fêmur.

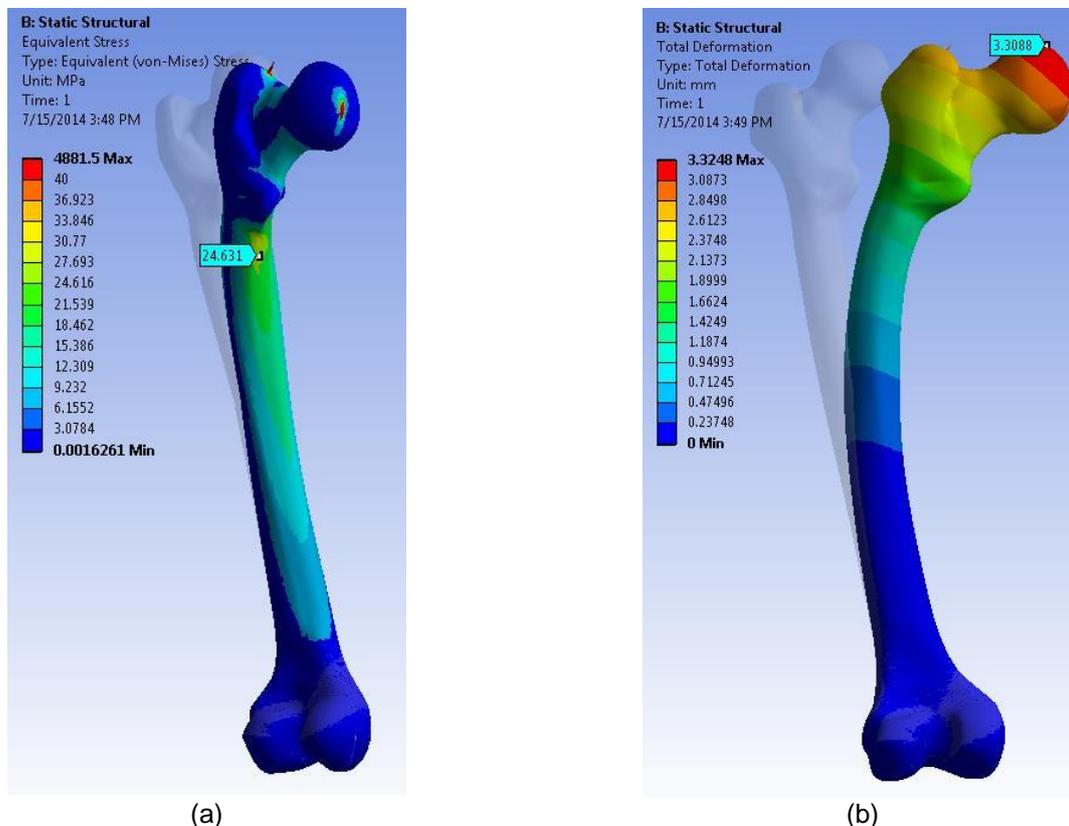


Figura 1 (a) Campo de variação das tensões axiais; (b) Campo de variação das deformações do fêmur.

## Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia; a Divisão de Tecnologias Tridimensionais do CTI – Renato Archer e ao Daniel Takanori Kemmoku, integrante desta Divisão; à USP; e ao LAMAC.

## Referências

- Benedeck, G.B. e Villars, F.M.H.** (1973) Physics with illustrative examples in medicine and Biology, Vol 1, Addison-Wesley. Cap. 3. p. 15-35.
- Cowin, S.C.** (1989) Bone Mechanics, CRC Press. 313 p.
- Frankel, V.H. e Burstein, A.H.** (1970) Orthopedic Biomechanics, Lea & Febiger, p. 21-29.
- Frankel, V.H. e Nordin, M.** (2001) Basic Biomechanics of the skeletal System, 3<sup>rd</sup> ed. Lippincott Williams & Wilkins. p. 202-221.
- Hibbeler, R.C.** (2004) Resistência dos Materiais, 5. Ed, Pearson Prentice Hall. 670 p.
- Turner, C.H., Rho, J., Takano, Y., Tsui, T.Y., e Pharr, G.M.** (1999) The elastic properties of trabecular and cortical bone tissues are similar: results from two microscopic measurement techniques. Journal of Biomechanics n. 32, p. 437-441.
- Sun, W., Starly, B., Nam, J., e Darling, A.** (2005) Bio-CAD modeling and its applications in computer-aided tissue engineering. Computer-Aided Design n. 37, p. 1097-1114.