



## GERAÇÃO DE MALHA PARA MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROBLEMAS ODONTOLÓGICOS

**Diego da Silva Lima** – diegoedificacoes@gmail.com

Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas  
Campus A.C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n  
CEP: 57072-970 Tabuleiro do Martins, Maceió – AL

**Francisco Patrick Araujo Almeida** – patrick@lccv.ufal.br

**José Adelson de Amorim** – adeilson\_amorim@lccv.ufal.br

**Leonardo Viana Pereira** – lpviana@lccv.ufal.br

Laboratório de Computação Científica e Visualização  
Universidade Federal de Alagoas

Campus A.C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n  
CEP: 57072-970 Tabuleiro do Martins, Maceió – AL

**Jorge Alberto Gonçalves** – goncalvesodonto@yahoo.com.br

Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Alagoas  
Campus A.C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n  
CEP: 57072-970 Tabuleiro do Martins, Maceió – AL

**Resumo.** *A biomecânica visa, através dos conceitos da física clássica, analisar e compreender os complexos movimentos do corpo humano. O advento da computação permitiu então aos profissionais da área de saúde utilizar modelos matemáticos como critério de diagnóstico, principalmente na Ortodontia. O presente trabalho consiste na geração de discretizações de domínio e de contorno da dentição humana; aspira-se, posteriormente, a análise de campos de tensões e deformações por meio de métodos numéricos clássicos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno (MEC). No modelo computacional empregado, os dados são obtidos a partir de exames de tomográfica computadorizada. Essa abordagem facilita a obtenção de um modelo experimental mais fidedigno, tornando o processo de discretização consideravelmente mais simples. Para discretizar o domínio, são utilizados elementos tetraédricos e para a discretização do contorno, elementos triangulares, conforme exemplo doravante apresentado, onde se observa a eficiência da metodologia desenvolvida.*

**Palavras chave:** *Biomecânica, Discretização, Método dos Elementos Finitos, Método dos Elementos de Contorno.*

## **1 INTRODUÇÃO**

Dentre os conceitos disponíveis na literatura para definir a Biomecânica e sua respectiva área de pesquisa, Amadio e Serrão (2007) indicam que biomecânica é a ciência, derivada das ciências naturais, que se ocupa das análises físicas de sistemas biológicos. Hay (1976), Brüggemann et al. (1991) citados por Amadio (2000) e Okuno(2003), entre outros, concordam e indicam que a biomecânica é a ciência responsável pelas mais diversas formas de análise do movimento humano, através da aplicação dos conceitos da física clássica.

Sob esta ótica, nos é perceptível a presença da biomecânica no simples ato de levantar o braço até a acirrada disputa de uma medalha olímpica no arremesso de peso. A biomecânica oferece, então, amplo campo de experimentação em diferentes áreas do conhecimento. Propicia ainda a interdisciplinaridade, apontada por Brandão (2000) como fundamental para alcançar excelência nos tratamentos em Odontologia. Este afirma ainda que cada uma das especialidades precisou rever, com o advento da computação, seu campo de ação, encontrando facilidades e dificuldades durante este processo de evolução.

As análises biomecânicas podem ser realizadas utilizando modelos computacionais, o método dos elementos finitos, ou modelos *in vitro*. Este último utilizado para validar os modelos computacionais, já que estes são a simplificação de um sistema real (PRENDERGAST et al., 2005). Sakamoto (2001) aponta ainda que na pesquisa odontológica tem-se empregado recentemente o método dos elementos finitos para simular, em computador, os esforços mecânicos e tensões que ocorrem em dentes e próteses durante o processo de mastigação. E complementa, que embora isso signifique um grande avanço na área odontológica, essas simulações vêm utilizando modelos planos ou simplificados da geometria de um dente real, o que nem sempre leva a resultados plenamente confiáveis.

O presente trabalho consiste na geração de discretizações de domínio e de contorno tridimensional da dentição humana visando posterior análise de campos de tensões e deformações por meio de métodos numéricos clássicos.

## **2 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Reddy (1984), para definir o Método dos Elementos Finitos, destaca o que chama de principal característica que a diferencia das demais técnicas de análise: a possibilidade de dividir um dado domínio em simples subdomínios, chamados então de elementos finitos.

A obtenção dos elementos - para a solução do problema sob análise - é possível com qualquer forma geométrica, desde que esta forneça relações necessárias entre os valores das soluções nos pontos escolhidos, denominados nós, do subdomínio, para qualificar-se como um elemento finito. Tal particularidade permite, então, a obtenção de análises com adequada precisão e maior simplicidade.

Sob tal ótica, Lotti (2006), ratifica que o Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui análise matemática capaz de discretizar um meio contínuo sem prejuízo das propriedades do meio original. Tal processo perpassa pela descrição dos elementos por equações diferenciais e sua conseguinte resolução por modelos matemáticos, em vista da obtenção dos resultados desejados.

A origem do desenvolvimento deste recurso ocorreu no final do século XVIII, entretanto, a sua viabilização tornou-se possível somente com o advento dos computadores, facilitando a resolução das enormes equações algébricas geradas na aplicação do método.

O MEF encontra aplicações em significativa parcela das áreas das ciências exatas e biológicas, devido, sobretudo à sua grande eficiência. Verifica-se o crescente número de trabalhos com a técnica do MEF na Odontologia, especialmente nos casos onde se deseja analisar cargas, tensões ou deslocamentos, objeto de estudo também da área de estruturas, nas Engenharias. Com o contínuo uso desse método em pesquisas, torna-se de suma importância o conhecimento da técnica para que os resultados dos trabalhos sejam adequadamente interpretados.

### **3 O MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO**

De acordo com Brebbia e Dominguez (1989) citados por Senna (2003), o Método dos Elementos de Contorno tem emergido como uma poderosa alternativa aos Elementos Finitos, em casos particulares onde uma melhor acurácia é requerida devido a problemas como concentração de tensões ou onde o domínio se estende ao infinito. O MEC pode ser aplicado em uma ampla variedade de problemas, nas áreas da Física e da Engenharia, entre outras áreas.

Segundo Oliveira (2011), a principal característica do MEC é a redução na dimensão do problema, devido à maneira que a malha do problema é discretizada, por exemplo, em uma geometria tridimensional, a malha do contorno se reduz a uma malha bidimensional, podendo ser discretizada em elementos triangulares ou quadrilaterais, caso deste trabalho.

### **4 METODOLOGIA**

O grande avanço tecnológico, com destaque para o desenvolvimento de máquinas com cada vez maior capacidade de processamento e memória é apontado por Sakamoto (2001) como principal facilitador de simulações computacionais para modelos complexos, como a anatomia de um dente, por exemplo.

Para a obtenção de um modelo experimental para a aplicação dos métodos numéricos que permitirão a geração da malha, fora necessário definir o objeto de pesquisa, que poderá ser qualquer estrutura dento-maxilo-facial, neste caso, uma estrutura dentária. Uma simulação realista deve ser feita necessariamente em três dimensões, com um pré-processamento geométrico e uma geração de malha que leve em conta todas as assimetrias e estruturas internas da geometria de um dente.

A morfologia das estruturas modeladas pode ser baseada em Atlas de Anatomia, tomografias computadorizadas, crânios secos e/ou dentes extraídos. No modelo computacional empregado, os dados são obtidos a partir de exames de tomografia computadorizada disponibilizada por voluntários.

Contudo, uma exigência fundamental para a simulação é determinar com precisão o domínio geométrico de forma a reproduzir com o maior grau de precisão possível o modelo real em estudo.

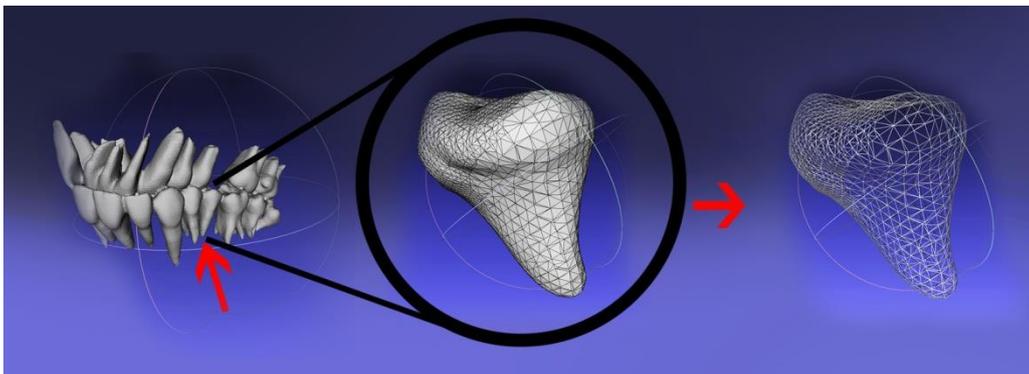
Essa abordagem facilita a obtenção de um modelo experimental mais fidedigno, tornando o processo de discretização consideravelmente mais simples. Para discretizar o domínio, são utilizados elementos tetraédricos e para a discretização do contorno, elementos triangulares, seguindo o procedimento descrito por Lotti (2006).

Neste contexto, delinearam-se quatro etapas para permitir a obtenção da malha objeto de estudo deste trabalho. A priori, fora realizada a reconstrução tridimensional da tomografia computadorizada, com vistas a possibilitar a obtenção de um modelo inicial da arcada dentária humana. Desta forma, torna-se possível a obtenção dos dados; a estratégia aqui aplicada visa possibilitar maior precisão e fidelidade. Viabiliza-se, assim, a construção de uma malha que possui maior proximidade com a realidade.

Com o modelo tridimensional virtual obtido, o estudo prosseguiu com a escolha da amostra, que para efeito deste estudo, constitui um único dente, dos 32 que compõem a totalidade da arcada dentária. Tal opção justifica-se, além da simplificação do processo, na observação de que tal opção não acarreta prejuízos para as análises aqui desejadas. Para este trabalho, a escolha foi pelo dente 35 - Segundo premolar inferior esquerdo - de acordo com a notação dentária internacional.

Em sequência, a terceira das quatro fases consistiu em viabilizar a exportação do modelo gerado do dente para um arquivo em extensão .stl (StereoLithography) que é formado por uma malha triangular. Para a visualização da malha obtida, elegeu-se o MashLab e o SALOME como ferramentas computacionais, ambos escolhidos por serem ferramentas ditas livres.

Por fim, um script em linguagem Matlab foi desenvolvido para permitir a leitura do arquivo .stl advindo na etapa anterior. A intenção, nesta etapa, é permear a leitura dos dados relevantes do arquivo, tais como informações dos elementos e coordenadas de seus respectivos nós que constituem a malha gerada, e que servirão para as análises doravante efetuadas. O resumo do processo, conforme supracitado pode ser ilustrado através da Figura 1.

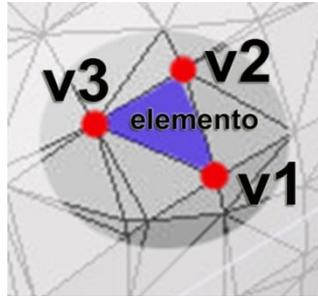


**Figura 1. Processo de geração da malha - dente nº 35 - Segundo premolar inferior esquerdo**

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

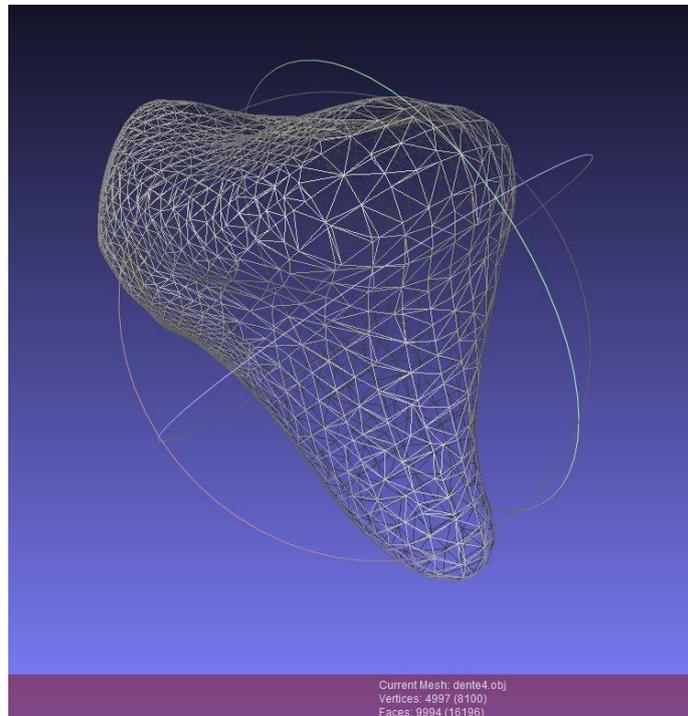
Os elementos representam coordenadas no espaço e podem assumir diversos formatos, sendo que os tetraédricos e os triangulares são os mais comuns. Naturalmente, quanto maior o número de elementos, mais preciso o modelo. Na malha gerada, foram obtidos 3102 nós e 6202 elementos. Através dos nós as informações são passadas entre os elementos.

Nas extremidades de cada elemento finito encontram-se pontos, ou nós, que conectam os elementos entre si, formando uma malha arranjada em camadas bi ou tridimensionais, objeto de estudo deste trabalho. A Figura 2 demonstra de maneira simplificada um elemento da malha, e seus respectivos nós.



**Figura 2. Elemento e seus nós - malha do dente n° 35 - Segundo premolar inferior esquerdo**

A estrutura criada é então discretizada em elementos em um programa específico de MEF ou MEC, como o SALOME e o MashLAB, e então é possível obter a visualização da malha correspondente. O resultado obtido é exposto na Figura 3.



**Figura 3. Malha Computacional do dente n° 35 - Segundo premolar inferior esquerdo**

Cada nó possui um número definido de graus de liberdade, que caracterizam a forma como o nó se deslocará no espaço. Este deslocamento pode ser descrito em três dimensões espaciais (X, Y e Z) de modelos tridimensionais aqui empregados.

Para obter o arquivo de saída com as informações relativas a cada elemento, foi desenvolvido um script em linguagem Matlab. É com este arquivo de dados que as análises posteriores poderão ser efetivadas. A figura 4 demonstra o arquivo de saída com os dados relativos aos respectivos elementos e nós.

ELEM	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3
1	8.983280	5.647302	12.591780	9.270277	5.647302	11.971590	8.767378	5.870014	11.971590
2	8.983280	5.647302	12.591780	8.767378	5.870014	11.971590	8.767378	5.714059	12.591780
3	8.767378	5.714059	12.591780	8.767378	5.647302	12.922580	8.983280	5.647302	12.591780
4	9.387612	5.340219	13.212020	8.767378	5.647302	12.922580	8.767378	5.594641	13.212020
5	9.387612	5.340219	13.212020	8.767378	5.594641	13.212020	8.767378	5.464986	13.832270

**Figura 4. Parcela dos nós e elementos da malha gerada – Arquivo de Saída**

Deste modo, em posse da discretização, é possível efetivar a análise de campos de tensões e deformações, com a obtenção de novas malhas do dente no estado original e após a aplicação das cargas consideradas.

## 6 CONCLUSÃO

A aplicação apresentada neste trabalho mostra que a metodologia empregada atendeu satisfatoriamente aos objetivos delineados inicialmente, com a adequada representação real da geometria do dente.

De posse das discretizações de domínio e de contorno geradas da dentição humana, pode-se, a partir destas, efetuar análises de campos de tensões e deformações por meio de métodos numéricos clássicos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno (MEC).

Tal estudo efetiva-se com as condições de contorno de prescrição de deslocamentos e aplicação de carregamentos para análise dos campos de tensão e deformação, em ferramenta computacional já desenvolvida pelo grupo e que atenderá esta demanda. Essa abordagem facilita a obtenção de um modelo experimental mais fidedigno, tornando o processo de discretização consideravelmente mais simples.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação pela concessão de bolsas do Programa de Educação Tutorial, e ao Laboratório de Computação Científica e Visualização da Ufal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amadio, A. C. *Fundamentos da biomecânica do esporte: considerações sobre a análise cinética e aspectos neuromusculares do movimento*. 1989. Tese (Livre docência) – Escola de Educação Física e Esporte/Universidade de São Paulo.

Brandão, R. C. B., Brandão, L. B. C. *Ajuste oclusal na Ortodontia: por que, quando e como?*. Revista. Dental Press Ortodon Ortop Facial, Maringá, v. 13, n. 3, p. 124-156, Junho 2008

Brebbia, C. A.; Dominguez, J., *Boundary elements: an introductory course*. Computacional Mechanics Publications and McGraw-Hill, Southhampton, 1989.

Lotti, R. S, et. Al. *Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos*. Revista. Dental Press Ortodon Ortop Facial, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, Abril 2006

Okuno, O.; Fratin, L. *Desvendando a física do corpo humano*. São Paulo: Ed. Manole, 2003.

Oliveira, M. F. *O Método dos Elementos de Contorno para a Análise de Fluxo de Calor Unidimensional*. Curitiba, 2011, Dissertação. UFPR

Prendergast, P.J. et al. *Analysis of muscle and joint loads*. In: MOW, V.C.; HUISKES, R. Basic orthopaedic biomechanics and mechano-biology. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2005. Cap.2, p.29-90.

Reddy, J.N. *An introduction of the finite element method*. McGraw-Hill Book Company, 1984.

Sakamoto, M. M. *Implementação de um Gerador Tridimensional de Malhas de Elementos Finitos, com Aplicações à Simulação Computacional em Odontologia*. São Paulo, 2001, Dissertação de Mestrado. USP

Tanne, K. D. D. S et. Al. *Three-dimensional finite element analysis for stress in the periodontal tissue by orthodontic forces*. American Journal of orthodontics and dentofacial orthopedics, v. 92, n. 6, p. 499-505, Dezembro 1987