

ESTUDO DA VIABILIDADE DA DETERMINAÇÃO DE OSTEOPOROSE EM OSSOS LONGOS POR MEIO DO MÉTODO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA – RESULTADOS PRELIMINARES

Gustavo Bortonio de Carvalho, gustavo.bortonio@unesp¹

Bruno Agostinho Hernandez, bruno.agostinho@unesp.br¹

Paulo José Paupitz Gonçalves, paulo.paupitz@unesp.br¹

Luciano Luporini Menegaldo, lmeneg@peb.ufrj.br²

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Bauru - SP, 17033-360.

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Avenida Horácio Macedo 2030, Bloco H-338, Rio de Janeiro, 21941-914.

Resumo. A osteoporose é uma doença comum em idosos caracterizada pela redução da densidade mineral óssea, tornando os ossos frágeis e suscetíveis a fraturas. O diagnóstico tradicional é feito por densitometria óssea, técnica que utiliza raios-X de baixa intensidade, mas que apresenta desvantagens como alto custo, oferta limitada no sistema público e exposição à radiação. Uma alternativa para tentar baratear o custo, e viabilizar um diagnóstico facilitado, pode ser um método baseado na impedância mecânica. Essa técnica consiste em induzir excitações no osso, e analisar sua resposta vibratória em frequência, a qual está diretamente relacionada à massa do tecido. Portanto, tem-se como objetivo geral do projeto analisar a viabilidade da técnica da impedância mecânica, para o diagnóstico da osteoporose por meio de práticas experimentais e modelagem em Elementos Finitos. Neste trabalho, serão apresentados os procedimentos e os resultados iniciais do projeto. Experimentos preliminares com ossos sintéticos sem e com osteoporose severa com sensores e martelos de impacto foram realizados. A resposta foi processada com o estimador H1. Para a modelagem numérica, foram utilizadas imagens de tomografia e os softwares Simpleware (v2022, Synopsys) para geração das geometrias e Ansys (v22R2, Ansys INC) para simulação da resposta vibratória. O trabalho busca desenvolver uma metodologia mais acessível e segura para o diagnóstico da osteoporose, com base na análise das respostas em frequência dos ossos. Este trabalho mostra as etapas iniciais da modelagem e construção dos modelos. Como resultados preliminares, observa-se alguma diferença na resposta vibratória entre ossos com e sem osteoporose, e um modelo inicial da tíbia e do fêmur utilizados nos experimentos foram construídos.

Palavras-chave: Resposta em frequência de ossos, Osteoporose, Método dos Elementos Finitos, Impedância Mecânica em ossos, Simulações Biomecânicas

Abstract. Osteoporosis is a common disease in the elderly characterized by a reduction in bone mineral density, making bones fragile and susceptible to fractures. The traditional diagnosis is made by bone densitometry, a technique that uses low-intensity X-rays, but which has disadvantages such as high cost, limited supply in the public system and exposure to radiation. An alternative to try and reduce the cost and make diagnosis easier could be a method based on mechanical impedance. This technique consists of inducing excitations in the bone and analyzing its vibratory frequency response, which is directly related to the mass of the tissue. Therefore, the general objective of the project is to analyze the feasibility of the mechanical impedance technique for diagnosing osteoporosis through experimental practices and finite element modeling. This paper presents the procedures and initial results of the project. Preliminary experiments were carried out on synthetic bones without and with severe osteoporosis using sensors and impact hammers. The response was processed using the H1 estimator. For numerical modeling, tomography images and Simpleware software (v2022, Synopsys) were used to generate the geometries and Ansys (v22R2, Ansys INC) to simulate the vibration response. The work aims to develop a more accessible and safer methodology for diagnosing osteoporosis, based on analyzing the frequency responses of bones

Keywords: Bone Frequency Response, Osteoporosis, Finite Element Method, Bone Mechanical Impedance, Biomechanical Simulations

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução ao problema

Uma das doenças mais comuns entre pessoas idosas é a osteoporose. Segundo a *International Osteoporosis Foundation* (Allane, 2017), mais de 200 milhões de pessoas em todo o mundo sofrem dessa condição. Estima-se que aproximadamente uma em cada três mulheres, e um em cada cinco homens com mais de 50 anos, terão ao longo da vida uma fratura osteoporótica (INTERNACIONAL OSTEOPOROSIS FOUNTATION, 2013).

A osteoporose é caracterizada pela diminuição da densidade mineral óssea, o que torna os ossos mais frágeis e suscetíveis a fraturas. Isso ocorre quando o corpo perde massa óssea em um ritmo mais rápido do que consegue repô-la, resultando em uma estrutura óssea porosa e vulnerável (Souza, 2010). Na Figura 1, observa-se, à esquerda, um osso saudável e, à direita, um osso afetado pela osteoporose.

Os principais grupos de pacientes com osteoporose são mulheres pós-menopáusicas e idosos, muito devido às alterações hormonais e à perda de massa óssea associadas ao envelhecimento, respectivamente (Revista Brasileira de ortopedia, 2010). Todavia, homens jovens com deficiência na produção de testosterona também podem ser acometidos por esta doença.

A gravidade da osteoporose reside no aumento do risco de fraturas ósseas, que decorrem até mesmo de traumas mínimos, ou quedas simples. Tais fraturas, principalmente na extremidade proximal do fêmur, podem levar a complicações graves, tais como a incapacidade física permanente, ou levar o paciente a óbito (Souza, 2010).

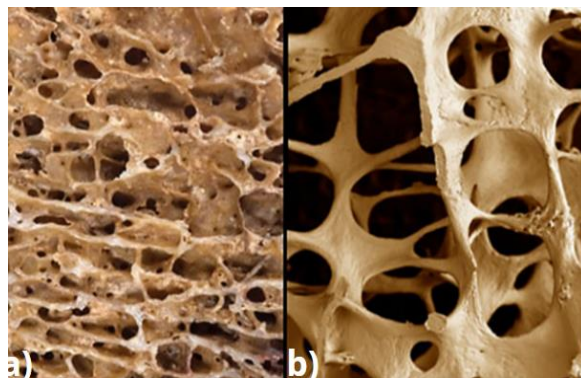


Figura 1 - Diferença entre um osso sem (à esquerda) e com osteoporose (à direita) (Fuggle, 2010).

Como esta doença não apresenta diagnóstico clínico claro, a principal forma de avaliar a existência da osteoporose em um paciente é por um método de diagnóstico por imagem, a densitometria óssea. Esta é uma técnica não invasiva, onde são emitidos feixes de raios-X de baixa intensidade através dos ossos do indivíduo (Baran, *et al*, 1997), e posteriormente, mede-se a quantidade de radiação absorvida pelo tecido ósseo para uma análise comparativa com dados de indivíduos saudáveis, com mesmas características, tais como idade ou gênero parecidos (Gali, 2001).

Como esta prática expõe o paciente à radiação ionizante, sendo contraindicado, por exemplo, para mulheres grávidas e pessoas obesas, além de se tratar de um procedimento relativamente caro e de pouca oferta nos centros de saúde, estudos para a utilização de outros métodos de diagnóstico de osteoporose começaram a ser desenvolvidos.

Pode-se citar primeiramente o estudo feito por Balden *et al* (1997), que utilizaram de um modelo oscilatório para analisar se seria possível medir os parâmetros modais da tíbia, visto que estes, tais como as frequências naturais de vibração e rigidez estrutural, podem ser afetadas pela diminuição da densidade óssea, a qual se insere no contexto da osteoporose. É possível ainda salientar a utilização de modelagem em elementos finitos por Couteau *et al* (1998), que realizaram uma análise modal do fêmur, tanto em simulação, quanto experimentalmente, e obtiveram um erro de aproximadamente 4%. Ou seja, pode ser que seja possível, por meio de uma análise vibratória, distinguir ossos com e sem osteoporose, e, conseqüentemente, determinar a severidade da doença.

Além disso, com o crescimento absoluto e relativo da população idosa, e a presença de hábitos não saudáveis nos atuais adolescentes, o estudo da osteoporose, tal como o seu diagnóstico e tratamento, ganham ainda mais notoriedade, visto que houve um aumento muito grande na incidência da osteoporose, e de fraturas decorrentes da doença, o que corrobora para um estudo a respeito de novas técnicas de diagnóstico (Borges, *et al*, 2022).

1.2 Objetivos

Baseado nos pontos descritos, esse projeto tem como objetivo realizar uma análise exploratória sobre o comportamento vibratório de ossos longos, tais como o fêmur e a tíbia, com e sem osteoporose, e analisar a viabilidade do uso da análise da resposta em frequência do osso dada uma excitação externa como uma técnica de diagnóstico da

doença. Serão utilizados práticas experimentais e modelagem por elementos finitos para avaliar essas possibilidades. Para este trabalho, serão apresentados os procedimentos e os resultados iniciais do projeto.

2. METODOLOGIA

Este projeto consistiu, inicialmente em três partes: estudos bibliográficos, ensaios experimentais preliminares e modelagem geométrica.

2.1 Estudos Bibliográficos

A osteoporose consiste em uma doença que causa a diminuição da massa óssea e a deterioração da microarquitetura dos ossos, o que pode causar fraturas com baixos níveis de energia (Szejnfeld, 2004). Esta condição pode ser visualizada na Figura 2, a qual ilustra a diferença entre a microarquitetura de um osso normal, e um com a osteoporose.

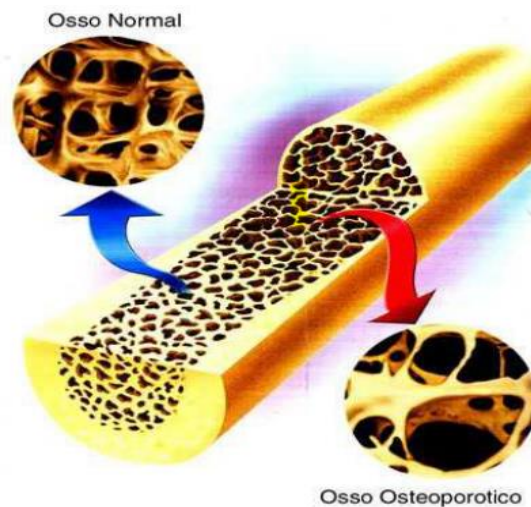


Figura 2 - Representação de um osso sem osteoporose (à esquerda) e um osso com osteoporose (à direita) (Dinis, 2009).

Esta doença é geralmente encontrada em mulheres pós-menopáusicas, visto que existe uma rápida perda óssea neste estágio. Nos homens, a doença ocorre por conta de limitações hormonais, e com primazia em idosos, os quais possuem a produção de tecido ósseo com defasagem (Lips, 2005). Pode-se ainda citar, a existência de alguns fatores ambientais que corroboram o surgimento da doença, tais como o álcool, cigarro, menopausa precoce, e dificuldade na absorção do cálcio (Lane, 1997). Na Figura 3, pode-se visualizar a condição da perda óssea tanto para homens, quanto mulheres no decorrer dos anos:

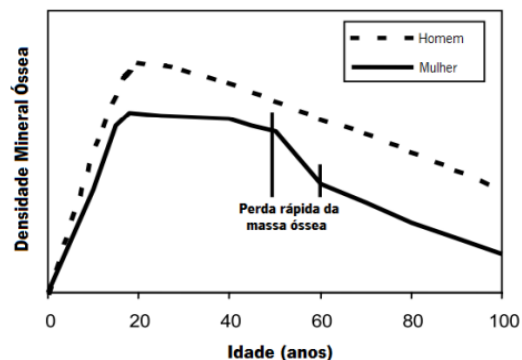


Figura 3- Gráfico ilustrativo do nível da massa óssea de homens e mulheres conforme suas respectivas idades (Pietschmann. P, Kersch-Schindl. K, 2004).

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), a osteoporose pode ser considerada uma doença comum, onde uma a cada três mulheres brancas, acima de 65 anos são portadoras, e se estima que metade das mulheres com mais de 75 anos venham a sofrer alguma fratura osteoporótica em suas vidas (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1994).

A osteoporose é classificada como uma doença silenciosa, pois não há sintomas específicos, os quais possam levar a um diagnóstico rápido, o que muitas vezes faz com que haja a suspeita da doença é uma fratura osteoporótica sofrida pelo paciente (Oliveira, 2002).

O principal meio para o diagnóstico da osteoporose advém da densitometria óssea. Este é um exame que utiliza o densitômetro, um aparelho que emite um feixe duplo de raios-X, o qual atravessa determinada área do corpo do paciente. A quantidade de radiação absorvida pelo tecido ósseo é medida, e comparada com um banco de dados de indivíduos com características semelhantes, como etnia, peso, altura e idades que variam de 20 a 100 anos (Ramalho, 2007). Os resultados obtidos no exame são comparados com a média dos jovens de 20 anos, que indica o valor máximo de densidade óssea. Na Figura 4, é apresentado o densitômetro, equipamento utilizado na densitometria óssea.



Figura 4 - Densitômetro, equipamento utilizado na densitometria óssea (Santos, 2007).

Com esta técnica, é possível descobrir a condição do paciente, ou o nível da osteoporose, sendo possível avaliar desde um estado inicial da enfermidade, como a osteopenia, até seu grau mais agudo, apontando além disso, também os ossos mais prováveis de fratura (Marshall, Johnell, Wedel, 1996).

Apesar do exame da densitometria óssea apresentar diversos benefícios, é necessário notar as dificuldades encontradas para realizar este exame no Brasil: o número de aparelhos para este diagnóstico. Este número se aproxima de três mil, e no contexto atual, em que o número de idosos vem crescendo constantemente, nota-se a defasagem de oferta deste exame. É apontado também a precariedade da aquisição dos densitômetros no Sistema Único de Saúde (SUS), principalmente em estados como o Alagoas, Pará, Rio Grande do Norte e a Bahia, evidenciando a dificuldade de tais populações em acessarem com rapidez e facilidade o exame de densitometria óssea (Pereira, 2017).

Além disso, por se tratar de um exame que emite feixes de baixa intensidade de raios-X, este é contraindicado para determinados grupos de pacientes, tais como mulheres grávidas e pessoas obesas (Hobatho, *et al*, 1991).

Sendo assim, é notável a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas de diagnóstico da doença, as quais possam de maneira mais simples, apresentar um método de rastreamento de doença para um tratamento mais precoce e assim diminuir consequentemente, a incidência de fraturas osteoporóticas em uma população idosa que se encontra em ascensão no país.

A técnica da impedância mecânica é amplamente utilizada na detecção de danos estruturais (An, 2012); (Zhu, 2016), e teve sua origem nos estudos de circuitos elétricos de corrente alternada, o qual se estendeu posteriormente para a aplicação em acústica, e às vibrações de estruturas. Tal técnica consiste em excitar um sistema mecânico com uma força harmônica, e medir a resposta em determinada posição da estrutura que pode ser o deslocamento, velocidade ou a aceleração. Quando a resposta é medida na mesma posição onde a força é aplicada na estrutura, dá-se o nome de Resposta Pontual (*Point Response*). Já quando esta resposta é medida em um ponto da estrutura diferente de onde se aplica a força, dá-se o nome de resposta de transferência (*Transfer Response*).

Para a emissão desta força pode ser utilizado um martelo de frequência de impulso, enquanto para a medição dos parâmetros, um acelerômetro. Esta técnica permite a identificação dos parâmetros modais da estrutura, tais como as frequências naturais de vibração e os coeficientes de amortecimento (Hight, 1980).

Esta lógica permite a aplicação desta técnica em diferentes tipos de estruturas, como por exemplo em ossos, visto que seu comportamento em uma excitação vibratória, assemelha-se a de uma viga, (Hobatho, *et al*, 1991). Sendo assim, analogamente há a possibilidade da utilização da técnica de impedância mecânica em ossos, com o intuito de obter os parâmetros modais de sua estrutura, ou seja, de uma possível forma de descobrir e diferenciar ossos com e sem osteoporose.

2.2 Desenvolvimento da técnica de impedância mecânica experimentalmente

Como descrito anteriormente, a técnica de impedância mecânica é muito utilizada para detectar danos em estruturas, onde um sistema mecânico é excitado por uma força harmônica, e assim, é feita a medição da resposta em determinada posição da estrutura. A Figura 5 (a) mostra uma ilustração dos ossos longos membros inferiores. No detalhe é ilustrado um exemplo de aplicação e medição de resposta no mesmo ponto (*Point Response*). A Figura 5 (b) mostra o ponto de tuberosidade da tíbia, onde planeja-se aplicar a força.

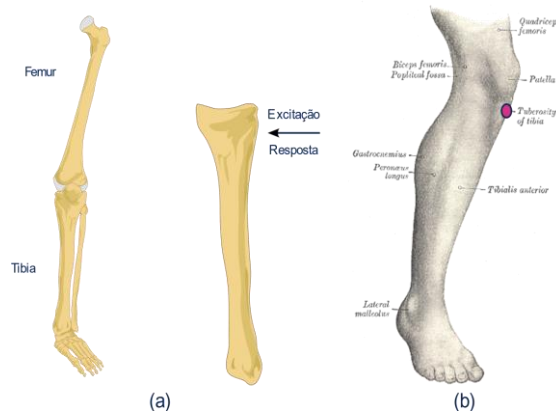


Figura 5 - Modelo esquemático da técnica de impedância mecânica por simulação numérica aplicada no fêmur. (a) Modelo de uma tíbia e aplicação de um estímulo e medição da resposta em determinada posição da estrutura (Commons, 2009). (b) Ponto de Tuberosidade da tíbia, onde planeja-se aplicar a força (Strandring, 2005).

De forma similar ao desenvolvimento numérico, foram iniciados ensaios experimentais nos dois tipos de ossos sintéticos já adquiridos, da marca Nacional Ossos (Nacional Ossos, Brasil). Inicialmente, para efeitos comparativos com o modelo de elementos finitos, estes ossos foram pendurados de forma a simular uma condição (livre-livre). Foram utilizados sensores do tipo acelerômetros (*tear drop*) de sensibilidade nominal de 100 mV/g, e um martelo de impacto instrumentado para medir a força aplicada ao osso. Os sinais foram adquiridos no tempo e gravados por um sistema de aquisição de sinais e posteriormente pós-processados para o domínio da frequência, utilizando um estimador de função de transferência do tipo H_1 .

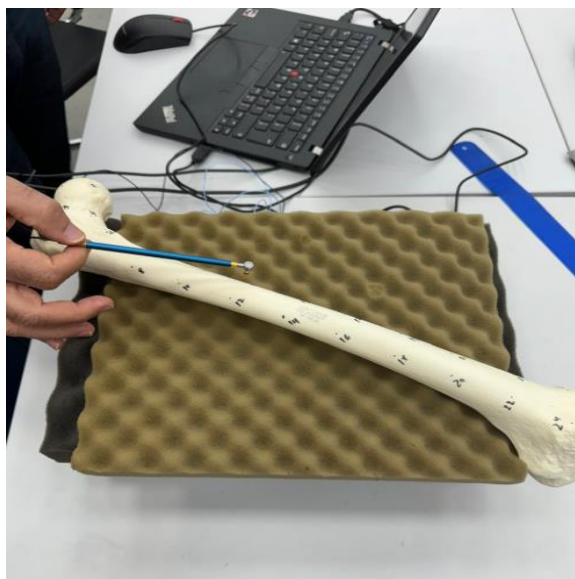


Figura 5 – Teste de impedância mecânica no fêmur sem osteoporose.

Como o experimento no osso sintético com osteoporose ainda não foi realizado até o momento, não foi possível inserir neste artigo os resultados experimentais obtidos.

2.3 Modelagem Geométrica

Por meio de imagens de tomografias computadorizadas de ossos sintéticos adquiridos da marca Nacional Ossos (Nacional Ossos, Brasil), foi iniciada a construção dos modelos geométricos para futura análise por Elementos Finitos. Para a modelagem geométrica de ossos longos, foi utilizado o software Simpleware (v2022, Synopsys INC, EUA).

3. RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÕES

Após a realização do experimento no fêmur sintético saudável foi possível obter a Função Indicadora de Modo Complexo, na qual é possível visualizar os principais modos de vibração do osso e suas respectivas frequências naturais, os quais podem ser visualizados na Figura 6. Vale ressaltar que tais modos servirão de um parâmetro comparativo em relação ao fêmur com osteoporose quando o experimento deste for realizado.

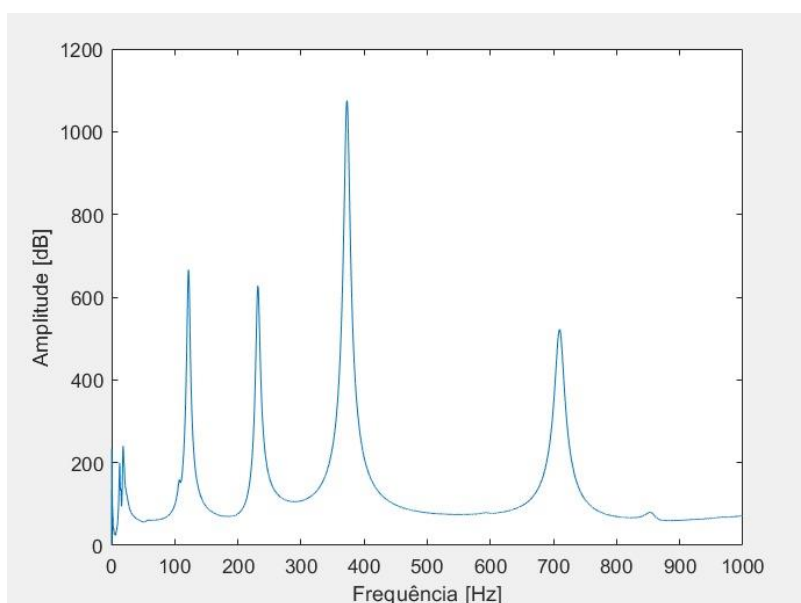


Figura 6 – Função Indicadora de Modo complexo do fêmur saudável.

Além disso, também foram criadas todas as geometrias dos ossos sintéticos que serão utilizados nos demais experimentos por meio do software Simpleware (v2022, Synopsys), a partir de tomografias computadorizadas.

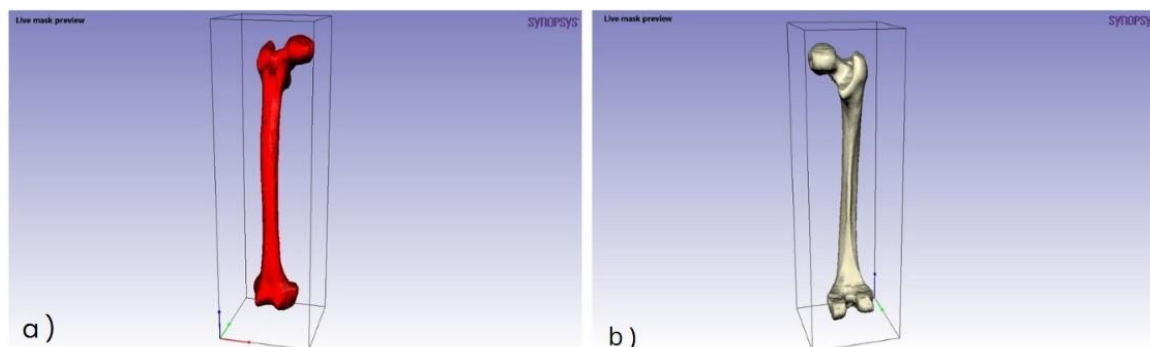


Figura 7 – Modelo geométrico do fêmur com osteoporose (a) e modelo do fêmur saudável (b).

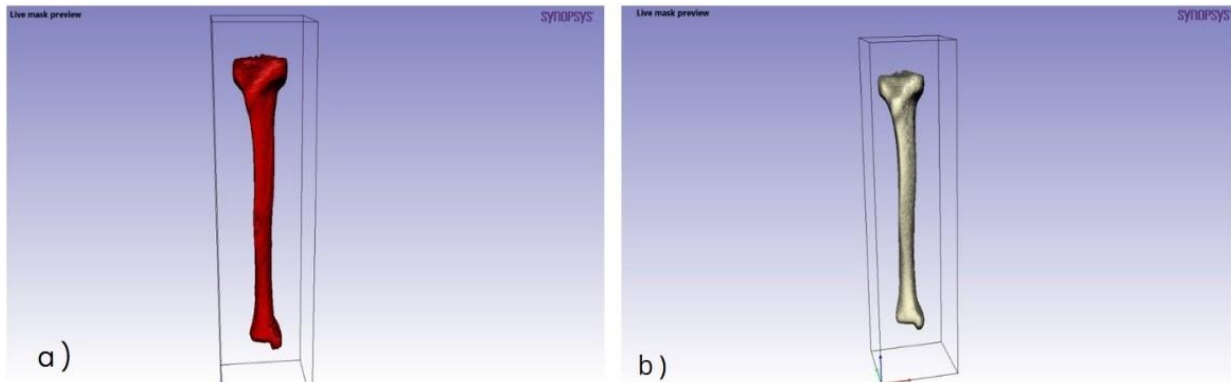


Figura 8 – Modelo geométrico tíbia com osteoporose (a), e modelo tíbia saudável (b).

Após o desenvolvimento da geometria dos ossos, estas serão exportadas para o software Ansys (v22R2, Ansys INC, EUA), onde será realizada a análise estrutural dinâmica numérica.

Como o trabalho não pôde ser concluído até o momento, não foi possível neste tempo obter resultados concretos numéricos ou experimentais, sobre a diferença entre o comportamento vibracional de um osso com osteoporose e outro sem. Todavia, com o experimento do fêmur saudável realizado até o momento, pôde-se visualizar indícios que levem a conclusão da existência de alguma diferença entre seus comportamentos. Prevê-se que algumas faixas de frequência sejam mais sensíveis à mudança estrutural devido a perda de densidade dos ossos com osteoporose em relação aos saudáveis.

REFERÊNCIAS

- ALLANE, G. et al. **Worldwide prevalence and incidence of osteoporotic vertebral fractures**. *Osteoporosis International*, v. 28, n. 5, p. 1531–1542, 6 fev. 2017.
- AN, Y.-K.; Sohn, H. Integrated impedance and guided wave based damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 28, p. 50–62, abr. 2012.
- BALDEN, Victor. *The identification of structural modal parameters as an alternative in-vivo diagnosis for osteoporosis*. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade da Cidade do Cabo, Cidade do Cabo, 1997.
- BARAN, D. A. et al. **Diagnosis and Management of Osteoporosis: Guidelines for the Utilization of Bone Densitometry**. v. 61, n. 6, p. 433–440, 1 dez. 1997.
- BORGES BRITO, B. et al. **Fatores associados à osteoporose em idosos: um estudo transversal**. *Conjecturas*, v. 22, n. 5, p. 493–506, 2022.
- COMMONS W. **Osteotomie tíbia**, 2009. Disponível: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Osteotomie_tibia.svg. Acesso em 19 de maio de 2024.
- COUTEAU, B.; HOBATHO, M.-C.; DARMANA, R.; BRIGNOLA, J.-C.; ARLAUD, J.-Y. Finite element modeling of the vibrational behavior of the human femur using CT-based individualized geometrical and material properties. *Journal of Biomechanics*, v. 31, p. 383–386, 1998.
- FUGGLE, NCR; Curtis, EM, et al. **Fracture prediction, imaging and screening in osteoporosis**. *Nature Reviews – Endocrinology*, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41574-019-0220-8>. Acesso em 21 de setembro de 2024.
- GALI, J. C. Osteoporose. *Acta ortopédica brasileira*, v. 9, n. 2, p. 53–62, 2001.
- HIGHT T.K, Piziali R.L and Nagel D.A. Natural frequency analysis of a human tibia. *Journal of Biomechanics*, 1980.
- HOBATHO M.C, DARMANA R, Ban-au P., et al. Development of a three-dimensional finite element model of a human tibia using experimental modal analysis. *Journal of Biomechanics*. 24(6), pages 371–383, 1991.
- INTERNATIONAL OSTEOPOROSIS FOUNDATION. **Osteoporosis: Burden Healthy Care provision and Opportunities in the European Union**. Geneva, Switzerland: International Osteoporosis Foundation, 2013.
- LANE, J.M. : **Osteoporosis : medical prevention and treatment**. *Spine* 22, suppl. 24 : 32S–37S, 1997.
- PIETSCHMANN, P.; KERSCHAN-SCHINDL, K. Osteoporosis: **Gender-specific aspects**, *WMW Wiener Medizinische Wochenschrift*, vol. 154, no. 17, pp. 411–415, 2004.
- LIPS.P., van Schoor, N.M. **Quality of life in patients with osteoporosis**. *Osteoporos Int* 16, 447–455 (2005). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00198-004-1762-7>. Acesso em 24 de setembro de 2024.
- MARSHALL, JOHNELL, WEDEL. **Meta-analysis of how well measures of bone mineral density predict occurrence of osteoporotic fractures**. *BMJ*. 1996.
- OLIVEIRA, L.G. Osteoporose. **Guia para diagnóstico, prevenção e tratamento**. Rio de Janeiro: Revinter; 2002.
- Osteoporosis in primary care: an opportunity to approach risk factors. *Revista Brasileira de Reumatologia* (English Edition), v. 56, n. 2, p. 111–116, 1 mar. 2016.

- PEREIRA, E. N. L. **Análise da distribuição dos equipamentos de densitometria óssea no Brasil : importância da gestão eficiente de tecnologias em saúde, 2017.** Disponível em: http://www.rlbea.unb.br/jspui/bitstream/10482/23334/1/2017_EzequielN%c3%babioLucasPereira.pdf.. Acesso em: 18 de setembro de 2024.
- RAMALHO, R. S. **A utilização da Densitometria Óssea como ferramenta de diagnóstico preventivo e confirmatório na suspeita clínica da osteoporose.** (Trabalho de Conclusão de Curso). Belo - Horizonte: UNIFENAS; 2007.
- SANTOS, L. M. F. **Análise comparativa dos parâmetros quantitativos do osso osteoporótico – modelo computacional de remodelação óssea vs resultados clínicos de DEXA.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Medicina. Universidade de Lisboa. 2007.
- SOUZA, M. P. G. DE. Diagnóstico e tratamento da osteoporose. **Revista brasileira de ortopedia**, v. 45, n. 3, p. 220–229, 2010.
- STANDRING, Susan et al. Gray's anatomy: the anatomical basis of clinical practice. **American journal of neuroradiology**, v. 26, n. 10, p. 2703, 2005.
- SYED, Z.; KHAN, A. Bone Densitometry: Applications and Limitations. **Journal of Obstetrics and Gynaecology Canada**, v. 24, n. 6, p. 476–484, 1 jun. 2002.
- SZEJNFELD, V. L. **Osteoporose.** RBM rev. bras. med, p. 417–418, 2004.7.DINIS, J. C. **Avaliação de resistência óssea do colo do fêmur em pacientes do gênero feminino, Relatório de Licenciatura em Engenharia Biomédica Instituto Politécnico de Bragança**, 2009.
- ZHU, H. et al. Mechanical impedance-based technique for steel structural corrosion damage detection. **Measurement**, v. 88, p. 353–359, jun. 2016.