



CNB 2015

ATAS DO
6º CONGRESSO NACIONAL DE BIOMECÂNICA
PROCEEDINGS OF THE
6TH PORTUGUESE CONGRESS ON BIOMECHANICS



COMISSÃO ORGANIZADORA / ORGANIZING COMMITTEE

Rui B. Ruben, CDRsp-ESTG, Instituto Politécnico de Leiria
Milena Vieira, ESTG, Instituto Politécnico de Leiria
Carlos Campos, ESTG, Instituto Politécnico de Leiria
Henrique A. Almeida, ESTG, Instituto Politécnico de Leiria
Jorge Siopa, ESTG, Instituto Politécnico de Leiria
Paulo Bárto, Manchester Biomanufacturing Centre, University of Manchester
João Folgado, LAETA, IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

PATROCÍNIOS E APOIOS INSTITUCIONAIS / SPONSORSHIP AND INSTITUTIONAL SUPPORT



COMISSÃO CIENTÍFICA / *SCIENTIFIC COMMITTEE*

Adélia Sequeira, IST-U Lisboa
Amílcar Ramalho, CEMUC-U Coimbra
António Manuel Godinho Completo, U Aveiro
António J. Figueiredo, FCDEF-U Coimbra
António Ramos, U Aveiro
António José Rocha Martins da Silva, U Trás-os-Montes e Alto Douro
António Veloso, Laboratório de Biomecânica e Morfologia Funcional-FMH-U Lisboa
Aurélio Marques, UBI
Ausenda Mendes, CDRsp-IP Leiria
Daniela Barroso Cipreste Vaz, FCT-U Coimbra – ESSLei-IP Leiria
Eduardo Borges Pires, ICIST-IST-U Lisboa
Elza M. M. Fonseca, IP Bragança
Fernanda Gentil - IDMEC-FEUP – ESTSP
Fernando Simões, DECivil-IST-U Lisboa
Filipa Oliveira da Silva João, FMH-U Lisboa
Filipe Carvalho, CMRRC-Rovisco Pais
Gilberto Costa, FM-U Porto
Gonçalo Dias, FCDEF-U Coimbra – CIDAF
Hélder Rodrigues, IST-U Lisboa
Jacinto Monteiro, FM-U Lisboa
Joana Reis, Dep. Medicina Vet.-E. de Ciências e Tecnologias-U Évora-CICECO-U Aveiro
João Folgado, IDMEC-IST-U Lisboa
João M. C. S. Abrantes, MovLab-U Lusófona de Humanidades e Tecnologias
João Manuel Tavares, FEUP
João Paço, Hospital CUF, FML-U Lisboa
Paulo Flores, U Minho
J. Paulo Vilas-Boas, CIFI2D-LABIOMEPE- Faculdade de Desporto-U Porto
Jorge Ambrósio, IST-U Lisboa
Jorge Belinha, FEUP
Jorge Laíns, CMRRC-Rovisco Pais
José Alberto Duarte, CIAFEL-Faculdade de Desporto-U Porto
José Potes, Dep. Medicina Veterinária-Escola de Ciências e Tecnologias-U Évora
José Reis Campos, FMDUP
José Manuel Casanova, FM-U Coimbra
José Oliveira Simões, U Aveiro
Leandro Machado, Faculdade de Desporto-U Porto
Lídia Carvalho, INESC-Porto
Luís Roseiro, ISEC-IP Coimbra
Luisa Costa Sousa, FEUP
Manuel Gutierrez, FM-U Porto
Marco Parente, FEUP
Maria Augusta Neto, U Coimbra
Mário Augusto Vaz, INEGI-FEUP
Mário Forjaz Secca, Dep. de Física-F. de Ciências e Tecnologia-U Nova de Lisboa
João Gamelas, Nova Medical School-U Nova de Lisboa
Miguel Tavares da Silva, IST-U Lisboa
Miguel Velhote Correia, INESC TEC-FEUP-LABIOMEPE
Paulo Piloto, IP Bragança
Paulo R. Fernandes, IST-U Lisboa
Pedro G. Coelho, DEMI-FCT-U Nova de Lisboa
Pedro Martins, IDMEC-FEUP
Pedro G. Morouço, CDRsp-IP Leiria
Renato Natal Jorge, FEUP
Rita Santos Rocha, ESDRM-IP Santarém – CIPER-FMH-U Lisboa
Ronaldo Gabriel, U Trás-os-Montes e Alto Douro
Rui Lima, IP Bragança – CEFT-FEUP
Rui Miranda Guedes, POLO-INEGI-FEUP do Labiomepe
Vera Moniz-Pereira, Laboratório de Biomecânica e Morfologia Funcional-FMH-U Lisboa

MODELO DINÂMICO 3D PARA ANÁLISE TÉRMICA EM PROCESSOS DE FURAÇÃO ÓSSEA

Maria G. A. Fernandes¹, Mário A. P. Vaz², Renato M. N. Jorge³, Elza M. M. Fonseca⁴

¹ PhD Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal;
mariagoreti_fernandes@hotmail.pt

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal; gmavaz@fe.up.pt

³ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal; rnatal@fe.up.pt

⁴ Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal; efonseca@ipb.pt

PALAVRAS CHAVE: Furação Óssea, Necrose Térmica, Elementos Finitos, Ls-Dyna

RESUMO: *O principal objetivo deste estudo foi a construção de um modelo dinâmico tridimensional para simular o processo de furação óssea. Foi utilizado o módulo Ls-Dyna do programa Ansys com ajuste dos parâmetros relativos à velocidade, força de corte, ângulo da broca, propriedades dos materiais da broca e do osso. A metodologia numérica proposta foi validada com uma metodologia experimental. A análise do campo de tensões e temperaturas obtidos é função da imposição de diferentes parâmetros, o que permitiu obter diferentes conclusões.*

1 INTRODUÇÃO

A furação óssea é um procedimento cirúrgico amplamente adotado e essencial na medicina. Durante os processos de furação é comum o aumento da temperatura da broca devido à fricção, proporcionando um aquecimento do tecido ósseo adjacente. Quando atingidos valores de temperatura não suportados pelo tecido ósseo podem comprometer a integridade e provocar a denominada necrose óssea térmica [1, 2]. O aumento da temperatura durante a furação está diretamente relacionado com os parâmetros de corte escolhidos, nomeadamente a velocidade de rotação, velocidade de avanço, força aplicada, profundidade do corte, utilização ou não de um sistema de refrigeração, geometria da ferramenta de corte e também o tipo de material da broca e do osso [3]. A análise e controlo dos parâmetros de furação são essenciais para a diminuição do campo de temperaturas na ferramenta de corte e no

osso perfurado. As metodologias numéricas complementadas com metodologias experimentais são fundamentais neste tipo de análise.

No presente estudo desenvolveu-se uma metodologia numérica baseada na construção de um modelo dinâmico tridimensional para simular o processo de furação do osso cortical humano. Este modelo incorpora o conjunto broca-osso e todos os parâmetros envolvidos nos processos de furação óssea. A metodologia numérica foi validada com uma metodologia experimental desenvolvida para a obtenção das temperaturas e deformações durante a furação de três blocos da *Sawbones* com propriedades semelhantes às propriedades do osso cortical humano [4]. Foram analisados e comparados diferentes resultados de acordo com a variação de diferentes parâmetros de furação.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental adotada neste estudo foca-se na furação de três blocos da *Sawbones*. Estes blocos apresentam uma dimensão de 130x180x40mm e densidades similares ao osso cortical humano (Fig. 1). Em todos os blocos realizaram-se furações com registo das temperaturas no interior do material e na ferramenta de corte. A análise das deformações durante o processo de furação óssea foi realizado apenas para dois dos blocos utilizados.



Fig. 1 Bloco da *Sawbones* e furação.

O registo das deformações foi efetuado através da instalação de extensómetros lineares *HBM* (Ref. 1-LY18-6/120), colocados à superfície dos blocos e em alguns dos furos, Fig. 2. A medição da temperatura no material cortical foi realizada através da colocação de termopares tipo k, posicionados em duas faces opostas do bloco e em posições adjacentes à broca. Para registo da temperatura na ferramenta de corte utilizou-se uma câmara termográfica *FLIR® T365*, posicionada a uma distância de 1,5m da zona de furação.

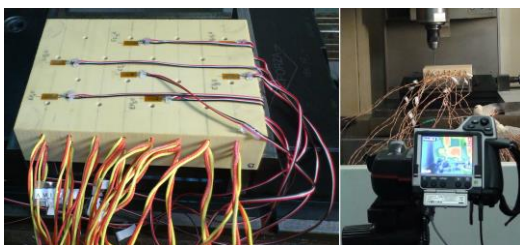


Fig. 2 Colocação dos extensómetros e termopares.

No total foram utilizados 14 extensómetros (7 extensómetros em cada um dos dois blocos) e um conjunto de termopares colocados estrategicamente com o objetivo

de estudar a intensidade e a distribuição do calor gerado. Numa das faces considerou-se os termopares à mesma distância da broca (Lado A), e na outra face a distâncias diferentes (Lado B), Fig. 3 [5].

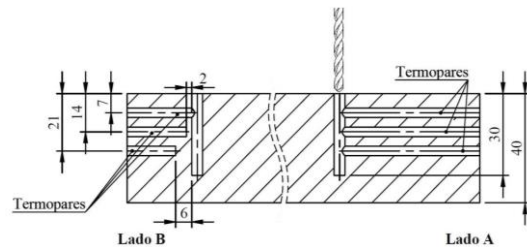


Fig. 3 Posicionamento dos Termopares.

Todos os termopares e extensómetros foram devidamente identificados e etiquetados para posterior tratamento dos dados, conforme Tab.1.

Tab. 1 Etiquetagem dos termopares e extensómetros.

ID	Definição
Termopar	
A/B-T	Lado A ou B, termopar a 7mm de profundidade
A/B-M	Lado A ou B, termopar a 14mm de profundidade
A/B-R	Lado A ou B, termopar a 21mm de profundidade
Extensómetro	
A/B-EF1	Lado A ou B, extensómetro posicionado no Furo 1
A/B-EF5	Lado A ou B, extensómetro posicionado no Furo 5
A/B-EF8	Lado A ou B, extensómetro posicionado no Furo 8
B/-EF4	Lado B, extensómetro posicionado no Furo 4

Através de uma broca convencional *HSS* com $\varnothing 4\text{mm}$ e um ângulo de 118° , realizaram-se 48 furações verticais (16 furações em cada bloco) com 30mm de profundidade. Foi considerada uma distância adequada entre os diferentes furos, assim como um tempo de espera de arrefecimento, garantido que o aquecimento de cada furo não interferia nos valores de temperatura do furo seguinte. A Fig. 4 representa a geometria dos blocos utilizados, a identificação dos furos e a distância entre eles. As furações efetuadas nos blocos respeitaram um conjunto de parâmetros de furação considerados

aceitáveis neste tipo de processos, Tab. 2 [5, 6]. O único parâmetro variável de bloco para bloco foi a velocidade de avanço, permitindo concluir qual a sua influência nos processos de furação.

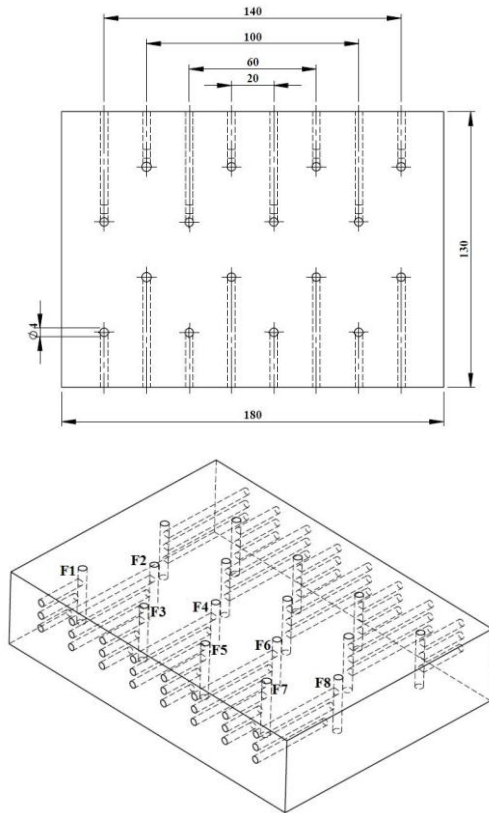


Fig. 4 Modelo CAD dos blocos em estudo.

Tab. 2 Parâmetros utilizados na furação óssea.

Parâmetros	
Diâmetro da broca	4 [mm]
Comprimento da broca	30 [mm]
Velocidade de rotação (ω)	800 [rpm]
Velocidade de avanço (V_f)	25, 50, 75 [mm/min]

3 MODELO DINÂMICO 3D

No presente trabalho desenvolveu-se um modelo dinâmico tridimensional para simular o processo de furação do osso cortical. Foi realizada uma análise dinâmica explícita através do módulo *Ls-Dyna* do programa *Ansys*. O modelo numérico 3D consiste no conjunto: broca cilíndrica convencional HSS e um bloco representativo do osso cortical (Fig. 5). A geometria 3D da broca foi desenvolvida no programa *SolidWorks*® com $\varnothing 4$ mm e um

ângulo de ponta de 118° , sendo posteriormente exportada para um programa de elementos finitos, o *Ansys*®.

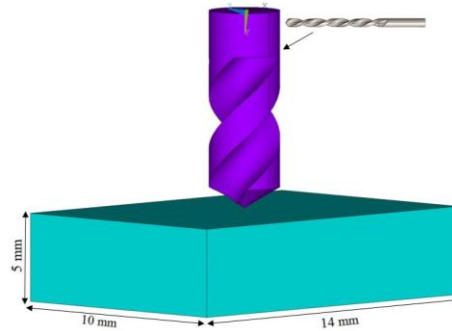


Fig. 5 Modelo de elementos finitos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Atendendo às características mecânicas dos materiais (osso cortical e broca) utilizou-se um conjunto de propriedades mecânicas representadas na Tab. 3 [4, 5, 7, 8]. A broca foi assumida como um corpo rígido devido à sua elevada rigidez elástica (200-240GPa) quando comparada com a rigidez do osso cortical (16-17GPa), permitindo reduzir o esforço computacional envolvido neste tipo de análise [9]. O osso cortical foi modelado como material cinemático plástico, dependente da taxa de deformação e do critério de falha do material. A remoção do osso durante a furação óssea simula-se através da eliminação dos elementos finitos que ocorre quando estes atingem o limite da deformação plástica imposta.

Tab. 3 Propriedades Mecânicas dos materiais.

Propriedades	Broca	Osso cortical
Massa específica (kg/m^3)	7850	800
Módulo de elasticidade (GPa)	200	16.7
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.3	0.3
Tensão de cedência (MPa)	—	27
Módulo Tangente (MPa)	—	2083.3
<i>Hardening parameter</i>	—	0
<i>Cowper-Symonds model</i>		
	C	0.13
	P	0.0001
Failure plastic strain	—	0.0021

3.2 MALHA E CONDIÇÕES FRONTEIRA

No modelo em estudo optou-se por efetuar uma malha com elementos sólidos

representativa de uma furação, incluindo o material cortical e o material da broca. Foi considerado um elemento finito próprio para análise dinâmica explícita, *3D Solid 164*, com 8 nós (Fig. 6).

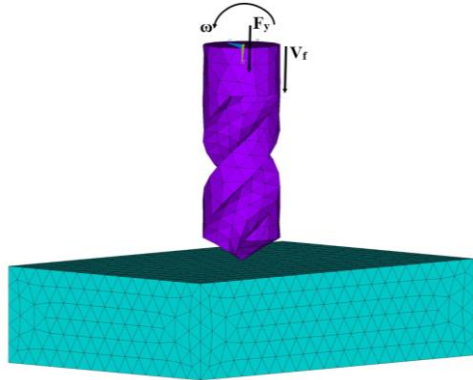


Fig. 6 Malha e condições fronteira.

Com objetivo de descrever a interação entre a broca e o material cortical durante o processo de furação foi estabelecido um contato *Eroding*, designado por superfície contra superfície. Este tipo de contato permite que uma ou ambas superfícies exteriores sofram dano durante o contato e continuem com os elementos internos remanescentes [10]. No presente estudo definiu-se o material cortical como “*target component*” e a broca como “*contact component*”. Assumiu-se um coeficiente de atrito entre as superfícies de 0.3 [11].

Na tentativa de aproximar o modelo numérico à metodologia experimental adotada, procedeu-se à fixação do material cortical e aplicou-se um conjunto de parâmetros de furação utilizados na metodologia experimental (Tab. 2). As simulações realizadas requereram uma média de 72 horas num *quad-core i7-4790k* com 16GB de memória RAM, para obter a solução.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXPERIMENTAL

Em processos de furação óssea é importante compreender a relação existente entre as diferentes variáveis envolvidas e a variação

da temperatura. No presente estudo avaliou-se o aumento da temperatura durante a furação óssea com a variação da velocidade de avanço. Considerando as velocidades $V'=25$, $V''=50$ e $V'''=75$ mm/min, comparou-se graficamente a evolução da temperatura ao longo do tempo de furação e arrefecimento para três furos dos blocos, (Fig. 7).

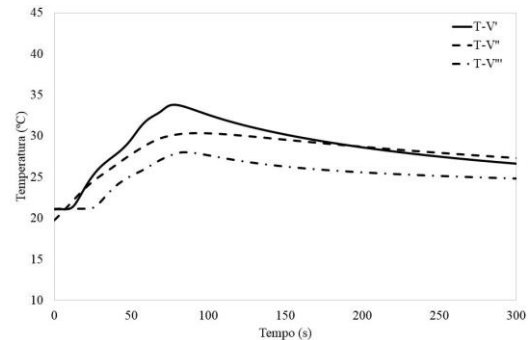


Fig. 7 Variação da temperatura para diferentes velocidades de avanço.

As furações realizadas com diferentes velocidades de avanço esclarecem a influência deste parâmetro em processos de furação óssea. Através da Fig. 7 verifica-se que o aumento da velocidade de avanço provoca uma diminuição significativa da temperatura no material perfurado. Estes resultados são explicados pelo facto da velocidade de avanço representar a rapidez ou não da passagem da fonte de calor ao redor da parede óssea. Assim, com o aumento deste parâmetro o calor gerado aumenta mas reduz o tempo de furação levando a uma diminuição da temperatura, na totalidade do processo.

Outro aspeto importante e avaliado neste estudo foi a intensidade e a distribuição do calor gerado na interface de corte e na vizinhança próxima do furo. As Fig. 8 e 9 representam as temperaturas obtidas nos diferentes termopares de dois furos realizados com uma velocidade de 25mm/min, considerando os lados A e B.

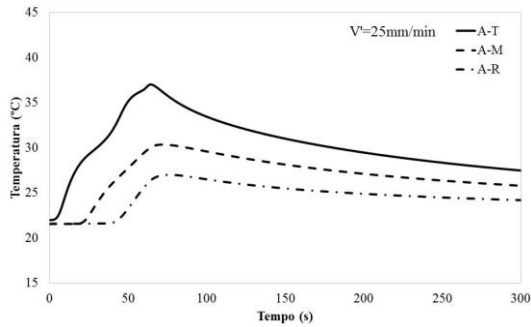


Fig. 8 Variação da temperatura para o Lado A.

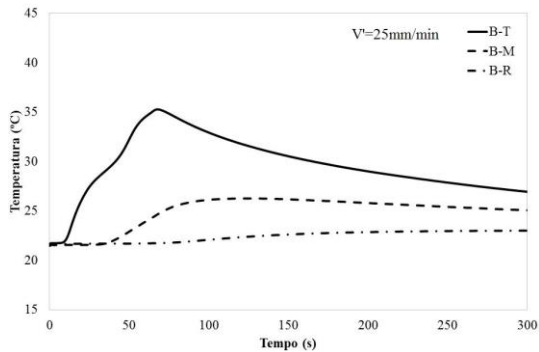


Fig. 9 Variação da temperatura para o Lado B.

Analisando a distribuição da temperatura nos lados A e B verifica-se que os termopares posicionados na interface da broca-osso e nas profundidades próximas da zona de orifício (T) apresentam valores

mais elevados de temperatura. A temperatura diminui com o afastamento destas zonas, nas posições M e R.

4.2 EXPERIMENTAL VERSUS NUMÉRICO

As deformações e as tensões geradas no osso durante processos de furação óssea são outro aspeto presente nestes procedimentos. Na metodologia experimental, através da colocação dos extensómetros, foi possível calcular as tensões geradas durante a furação óssea. Numericamente realizou-se diferentes simulações numéricas com o objetivo de comparar as tensões obtidas com o modelo experimental. Na Tab. 4 estão representadas as tensões normais máximas obtidas em cada um dos furos que continha extensómetro (Tab. 1) e a média dos valores obtidos experimental e numericamente. É importante referir que numericamente foram consideradas diferentes posições nodais respeitando a posição dos extensómetros na metodologia experimental.

Tab. 4 Tensões normais (MPa) obtidas nos modelos: experimental e numérico.

	Experimental								Numérico
	EF1A	EF5A	EF8A	EF1B	EF4B	EF5B	EF8B	Média	
V'=25mm/min	2.82	2.80	3.04	2.44	2.73	2.30	3.60	2.82	2,43
V''=50mm/min	—	—	—	—	—	—	—	—	1,19
V'''=75mm/min	0.4	1.12	0.45	—	—	0.98	0.98	0.79	0,99

Analisando as tensões máximas obtidas é perceptível que o aumento da velocidade de avanço nos processos de furação óssea provoca uma diminuição das deformações no osso e consequentemente a diminuição das tensões normais. O modelo numérico é validado pelo modelo experimental, uma vez que os resultados em ambas as metodologias são concordantes.

5 CONCLUSÕES

São vários os estudos encontrados na literatura que visam esclarecer a influência

dos diferentes parâmetros de furação em processos de furação óssea, no entanto não existe uma concordância clara entre diferentes autores. Neste estudo, através do complemento das metodologias experimentais e numéricas, foi possível exibir resultados de temperaturas e tensões obtidos para diferentes situações de furação. Assim, através da análise de três velocidades de avanço diferentes conclui-se que o aumento da velocidade diminui o campo de temperaturas, deformações e

tensões geradas no osso perfurado durante a sua furação.

Com diferentes posições dos termopares verificou-se que os picos mais altos de temperatura encontram-se nas zonas mais próximas do orifício de furação e junto às paredes do furo. Com o afastamento destas zonas a temperatura diminui.

O modelo dinâmico 3D apresentado neste estudo revelou-se uma ótima ferramenta de análise nestes processos. Tratam-se de modelos complexos que permitem englobar as variáveis envolvidas em processos reais desta natureza. Os resultados obtidos numericamente traduzem robustez e concordância com os resultados experimentais.

Em geral, todos os furos realizados registam valores de temperatura e tensões que não ultrapassam o limite suportado pelo osso, segundo os autores Augustin *et al.* [12].

AGRADECIMENTOS

A autora deste trabalho agradece o apoio do Projeto “Biomechanics: contributions to the healthcare” cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (ON.2 – O Novo Norte), ao abrigo do Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

REFERÊNCIAS

- [1] L.S. Matthews, C. Hirsch, *Temperatures measured in human cortical bone when drilling*, J. Bone Joint Surg. Am., 54:297-308, 1972.
- [2] A.R. Eriksson, T. Albrektsson, B. Grane, D. Mcqueen, *Thermal injury to bone. A vital microscopic description of heat effects*, Int J Oral surg 11:115-121, 1982.
- [3] D.S. Carvalho, A.M. Abrão, J.C.C. Rubio, *Monitoramento da Temperatura de Usinagem*, XI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, 2004.
- [4] Sawbones-Worldwide Leaders in Orthopaedic and Medical Models, www.sawbones.com/.
- [5] M.G.A. Fernandes, E.M.M. Fonseca, R.M.J. Natal, *Modelo 3D para análise térmica durante o processo de furação do osso cortical*, Humberto Varum et al. Eds., Livro de Resumos, 9CNME - 9º Congresso Nacional de Mecânica

Experimental, Universidade de Aveiro, pp.151-152, ISBN: 978-95695-5-3, 2014.

[6] M.T. Hillery, I. Shuaib, *Temperature effects in the drilling of human and bovine bone*, J. Mater. Process. Technol., 92-93:302-308, 1999.

[7] C.C. Huang, Y.C. Liu, L.W. Chen, Y.C. Chen, *Temperature rise of alveolar bone during dental implant drilling using the finite element simulation*, Life science Journal, 7(1): 68-72, 2010.

[8] Z. Asgharpour, D. Fressmann, E. Schuller, S. Peldschus, *Implementation of a Strain Rate Dependent of Human Bone Model*, 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, 2011.

[9] W.A. Lughmani, K. Bouazza-Marouf, I. Ashcroft, *Drilling in cortical bone: a finite element model and experimental investigations*, J Mech Behav BioMed., 32-42, 2014.

[10] C.A.A Sánchez, *Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear*, Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2001.

[11] Y.K. Tu, L.W. Chen, J.S. Ciou, C.K. Hsiao, Y.C. Chen, *Finite Element Simulations of Bone Temperature Rise During Bone Drilling Based on a Bone Analog*, J Med Biol Eng., 33(3), p.269-274, 2013.

[12] G. Augustin, S. Davila, T. Udiljak, T. Staroveski, D. Brezak, S. Babic, *Temperature changes during cortical bone drilling with a newly designed step drill and an internally cooled drill*, International Orthopaedics, 36(7), p.1449-1456, 2012