

AVALIAÇÃO TÉRMICA DA FURAÇÃO NO OSSO CORTICAL COM E SEM IRRIGAÇÃO

THERMAL EVALUATION OF BONE DRILLING IN A CORTICAL BONE WITH AND WITHOUT IRRIGATION

M. G. A. Fernandes¹, M. Vaz², R. M. J. Natal², E. M. M. Fonseca³

¹ PhD Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto

³ Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança



RESUMO

A osteotomia ou corte do tecido ósseo é um procedimento comum na cirurgia ortopédica, nomeadamente no tratamento cirúrgico de fraturas e reconstrutoras. No entanto, o calor produzido durante a perfuração óssea é um problema que se contrapõe aos benefícios deste tipo de intervenção cirúrgica. Estudos revelam que temperaturas acima dos 47°C provocam osteonecrose térmica agravando-se com a utilização de brocas com diâmetros $\geq 4,5$ mm, sem irrigação. No presente estudo utilizou-se um método de análise da temperatura durante a furação óssea. Numa fase inicial, com a utilização de termopares tipo k e uma câmara termográfica, mediu-se a temperatura ocorrida durante um processo de furação em blocos da Sawbones com propriedades aproximadas às do osso humano cortical. Posteriormente, desenvolveu-se um modelo numérico para simular o aumento de temperatura no osso durante o processo de furação através da análise por elementos finitos. Os resultados numéricos e experimentais são concordantes e permitiram identificar quais as situações e zonas consideradas mais propícias para a ocorrência de necrose térmica.

ABSTRACT

The osteotomy or bone cutting is a common procedure in orthopedic surgery, mainly in the treatment of fractures and reconstructive surgery. However, the heat produced during the bone drilling is a problem that oppose the benefits of this type of surgery. Studies show that temperatures above 47 ° C cause thermal osteonecrosis and worse with the use of drills by diameters ≥ 4.5 mm, without irrigation. The main goal of this study was to use a method for analyzing the temperature during bone drilling. We used thermocouples type k and a thermal imaging camera for measuring temperature during a drilling process into biomechanical blocks, supplied by Sawbones with similar properties those of human cortical bone. Subsequently, we developed a numerical model to simulate the temperature increase in the bone during the drilling process by finite element analysis. The numerical and experimental results agree and allow identify which situations and more critical regions with more probability for bone necrosis.

1. INTRODUÇÃO

As intervenções cirúrgicas que envolvem a furação do tecido ósseo são uma prática

cada vez mais frequente na medicina e com ela surgiu a necessidade de aprimorar o processo, reduzindo a geração de calor nos

tecidos envolventes, e conseqüentemente a necrose óssea.

O calor gerado é o resultado da fricção entre a superfície cortante da broca em contacto com o orifício e os fragmentos de osso formados durante a furação (Abbage 1998; Carvalho et al. 2004). Assim, são vários os parâmetros de corte envolvidos no processo de furação óssea que influenciam diretamente as temperaturas geradas no local perfurado: a velocidade de rotação, a velocidade de avanço, a força de corte, a profundidade do corte, o tipo de material e a geometria da broca, bem como o tipo de osso envolvido (Sezek et al. 2012; Lopes 1977).

Em processos de furação óssea, os efeitos da geração de calor são, habituamente, bastante severos, uma vez que a ferramenta de corte encontra-se inserida numa área restrita e permanece em contacto constante com as aparas. Nestes casos, o controlo do calor gerado é essencial para assegurar a integridade do osso e dos tecidos envolventes (Tu et al. 2013). No entanto, a intensidade do calor gerado e a distribuição de temperatura na interface de corte são difíceis de serem determinados.

Existem diversos estudos encontrados na literatura envolvendo a determinação da temperatura no osso, resultante do processo de furação. A maioria desses estudos baseiam-se em estudos experimentais com diferentes metodologias, usando ossos de animais mortos tais como porco, coelho, boi, e até mesmo ossos humanos. Alguns desses estudos são complementados com métodos convencionais para aquisição dos valores de temperatura nomeadamente, termopares inseridos no osso em posições adjacentes à broca e ainda recentemente o recurso à termografia. Em geral, as análises experimentais visam estabelecer a relação dos parâmetros de corte com o calor gerado no osso, fornecendo uma boa indicação de como seria o comportamento térmico do osso humano vivo quando submetido a diferentes conjuntos de parâmetros de corte (Sezek 2012; Shin e Yoon 2006). Contudo, a medição direta das temperaturas neste tipo de processos é extremamente complexa devido às condições físicas, como por exemplo o movimento da

broca e a presença de aparas (Sousa 2009). Estas limitações induzem a necessidade de complementar os modelos experimentais com modelos numéricos para a determinação do fluxo de calor gerado na interface, assim como o campo de temperaturas na interface de corte e em todo o tecido envolvente.

Neste estudo, o principal objetivo foca-se no desenvolvimento de uma metodologia para a análise da temperatura durante processos de furação óssea, com recurso aos métodos experimentais e numéricos. Na metodologia experimental são utilizados termopares tipo k e uma câmara termográfica. O registo experimental das temperaturas é efetuado em blocos da *Sawbones* com propriedades similares à do osso cortical. Na metodologia numérica é utilizado o método dos elementos finitos para simular o aumento da temperatura durante o processo de furação, através de uma análise térmica transiente.

2. MODELO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de medir a variação da temperatura durante um processo de furação óssea, foi utilizado um bloco da *Sawbones* (Fig. 1) com uma dimensão de 130x180x40mm e com densidade aproximada à do osso humano cortical. O registo da temperatura no interior do bloco foi efetuado através da instalação de termopares tipo k, colocados em duas faces opostas do bloco e em posições adjacentes à broca. Todos os termopares estavam ligados a um sistema de leitura para a aquisição de dados, o *MGCplus*.

A instalação dos termopares realizou-se através de furações laterais com diâmetro de 3,5mm. Numa das faces considerou-se os termopares colocados à mesma distância da broca (Lado A), e na outra face os termopares foram colocados a distâncias diferentes (Lado B), Fig. 2.



Fig. 1- Bloco teste da *Sawbones* e furações.

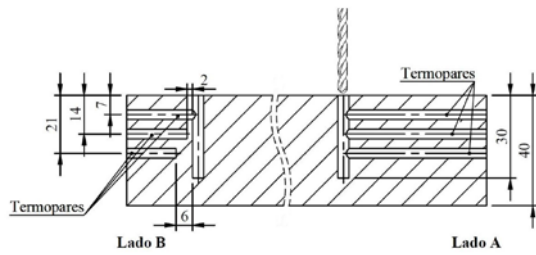


Fig. 2 – Posição dos termopares.

Os termopares foram devidamente etiquetados para a identificação de cada canal e respetiva ligação ao sistema de aquisição de dados. A Fig. 3 representa o desenho de definição do bloco em estudo e a Tabela 1 identifica os termopares.

Tabela 1- Identificação dos termopares.

ID Termopar	Definição
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

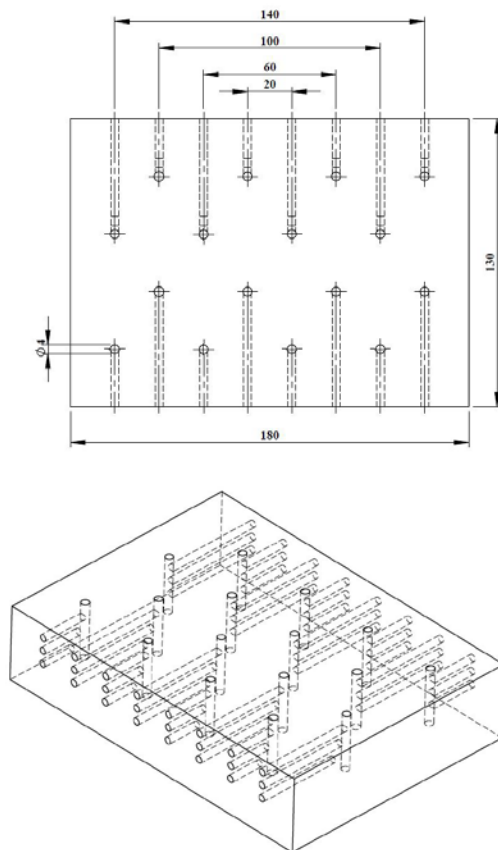


Fig. 3 – Modelo CAD do Bloco da Sawbones.

Para a realização das furações, durante o registo de temperaturas, utilizou-se uma máquina de comando numérico CNC, Fig. 4. Foram utilizados 2 blocos com as mesmas características, tendo sido efetuadas 28 furações verticais (16 num bloco e 12 noutro bloco) com diâmetro de 4mm e profundidade de 30mm. Durante o processo de furação efetuou-se o registo de temperaturas com e sem irrigação. Na furação com irrigação utilizou-se ar comprimido e na furação sem irrigação o processo decorreu sem qualquer efeito externo.

Para cada furação registaram-se três leituras no interior do bloco, considerando a profundidade do furo e a distância entre a broca e o termopar. A broca utilizada neste método experimental é de aço rápido sinterizado, 4mm de diâmetro, 40mm de comprimento e um ângulo de ponta igual a 135°. Para além da utilização de termopares para o registo de temperaturas no bloco, também foi utilizada uma câmara termográfica FLIR® T365 que permitiu medir a temperatura na broca, durante o processo de furação, Fig. 4. Esta câmara foi posicionada a uma distância de 1,5 m da zona de furação.

As 28 furações foram efetuadas atendendo a um conjunto de parâmetros definidos na tabela 2, (Fonseca et al. 2012).



Fig. 4 - Furação do bloco e máquina termográfica.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na furação.

Parâmetros	
Diâmetro da broca	4 mm
Comprimento da broca	30 mm
Velocidade de rotação	800 rpm
Velocidade de avanço	50 mm/min
Tempo total (furação e arrefecimento)	45 s + 55 s

3. MODELO NUMÉRICO

Respeitando as dimensões do bloco utilizado no modelo experimental, todas as variáveis envolvidas, e o uso ou não da irrigação, considerou-se um modelo numérico tridimensional com o objetivo de simular a variação da temperatura no interior do bloco durante o processo de furação. Para este propósito utilizou-se o método dos elementos finitos através do programa Ansys® (versão 14.5). Efetuou-se uma análise em regime transiente para um tempo total de 100s. Na tabela 3 estão representadas as propriedades consideradas na análise numérica (Magalhães et al. 2013, The European Union 2005).

Tabela 3 – Propriedades térmicas.

Propriedades	Broca	Cortical
Densidade (kg/m ³)	7850	800
Condutividade térmica (W/mK)	53,3	0,4
Calor específico (J/kgK)	440	1260

Optou-se por efetuar uma malha de elementos finitos representativa de uma furação, incluindo o material cortical e o material da broca, Fig. 5. Para este tipo de análise foi utilizado um elemento térmico 3D de 8 nós, *Solid70*, com capacidade de formação de elementos tetraédricos com 4, 5 ou 6 nós.

Considerou-se uma temperatura inicial em todo o modelo de 18,5°C. Com base no registo de curvas de temperatura obtidas com a câmara termográfica, referentes à broca durante o processo de furação óssea, as condições de fronteira impostas no modelo numérico foram de temperatura prescrita em regime transiente. Para o caso do modelo sem irrigação a temperatura na broca registou a evolução apresentada na Fig. 6. No modelo com irrigação a temperatura na broca manteve-se constante, com valores registados na ordem dos 19°C. Os valores destas temperaturas foram colocadas como condição fronteira na superfície da broca, Fig. 5. Simultaneamente, na superfície superior, relativa ao osso, foi considerada convecção natural.

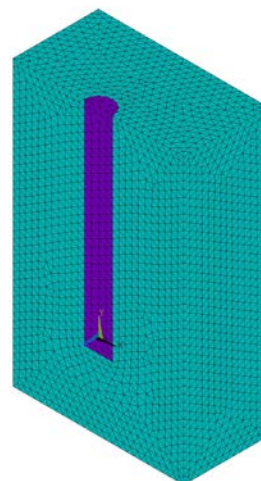


Fig. 5 – Malhas de elementos finitos.

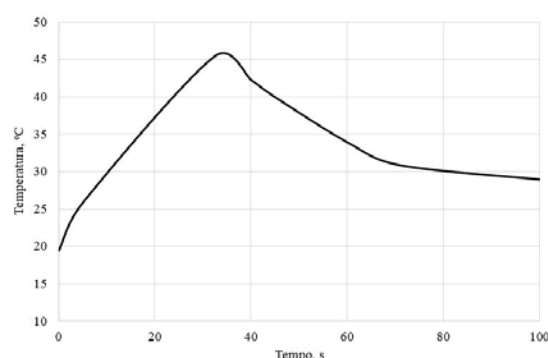


Fig. 6 – Curva de calor da broca, obtida com a câmara termográfica, sem irrigação.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Respeitando as distâncias dos termopares em relação à broca no modelo experimental (Fig. 2), foram consideradas 5 posições nodais diferentes no modelo numérico. Os resultados dos campos de temperatura nodais foram comparados com os obtidos experimentalmente e estão representados nas figuras 7 a 10. Utilizou-se a legenda identificada na tabela 1, com a designação E para experimental e N para resultados numéricos.

Na interpretação dos resultados verifica-se que as temperaturas obtidas no tecido ósseo durante o processo de furação têm um comportamento similar às obtidas no modelo numérico. Uma vez que o calor gerado ao longo da furação não é facilmente conduzido para fora do tecido ósseo, é importante analisar a distribuição da temperatura na vizinhança próxima do furo. Assim, confirmou-se que a temperatura au-

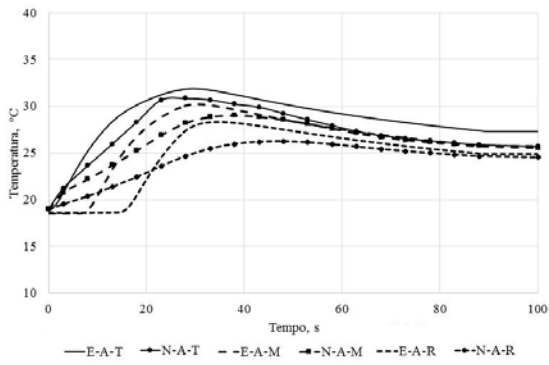


Fig. 7 – Furação Lado A, sem irrigação.

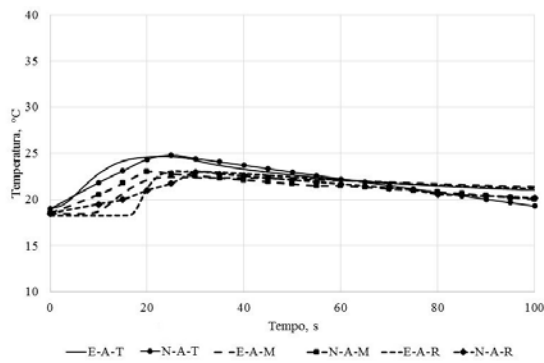


Fig. 8 - Furação Lado A, com irrigação.

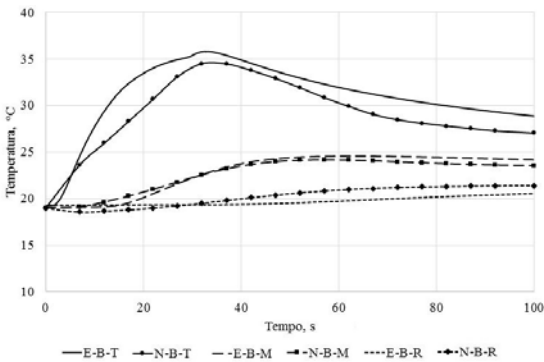


Fig. 9 – Furação Lado B, sem irrigação.

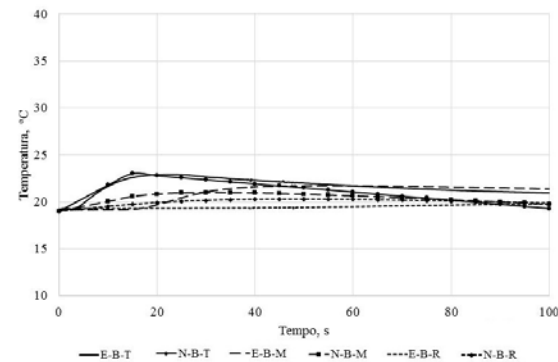


Fig. 10 - Furação Lado B, com irrigação.

menta muito rapidamente na região do osso, na zona adjacente ao furo e vai diminuindo com o afastamento da zona de furação. Este acontecimento já era previsto, uma vez que o osso é considerando um mau condutor térmico e por isso não conduz facilmente o calor gerado ao longo da furação para fora da zona do furo. Os resultados obtidos numericamente confirmam este mesmo comportamento. Comparando os lados A e B é evidente que os picos máximos de temperatura atingidos encontram-se nos termopares localizados na interface da broca e do osso, e nas profundidades próximas da zona do orifício. Os picos máximos de temperatura foram atingidos, tanto para os modelos experimentais como numéricos, no intervalo de tempo entre os 25s-35s. Em geral, todos os furos encontram-se a temperaturas entre os 18°C e os 40°C, não ultrapassando o limite que pode originar lesão óssea nos tecidos, segundo (Augustin, et al., 2008; Augustin, et al., 2012).

Outro aspeto evidente nos resultados apresentados é a diferença de temperaturas considerando a utilização de irrigação, através do ar comprimido, durante o processo de furação. Este procedimento permite a refrigeração de todo o material envolvido e conseqüentemente as temperaturas atingidas são menores quando comparadas com os furos onde esse procedimento não foi utilizado. Para cada ensaio de furação foram retiradas, através da câmara termográfica, duas imagens térmicas da broca, considerando o instante inicial, antes de iniciar o furo e o instante logo após a conclusão do furo. Nas figuras 11 e 12 estão representadas imagens considerando dois furos, com e sem irrigação.

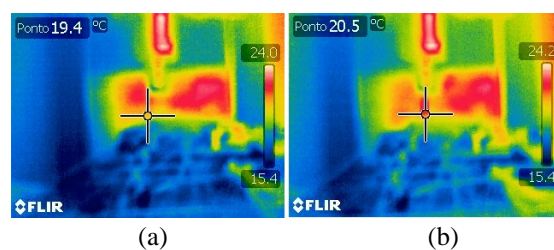


Fig. 11 – Imagem termográfica da broca para furo com irrigação: (a) antes e (b) após a furação.

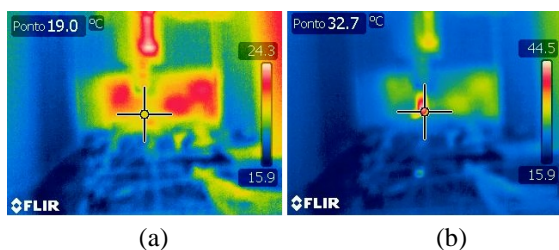


Fig. 12 - Imagem termográfica da broca para furo sem irrigação: (a) antes e (b) após a furação.

Para uma análise geral de todos os furos realizados, calculou-se a média e o desvio padrão (SD) da distribuição das temperaturas obtidas nos diferentes termopares, tabela 4. Do total das furações realizadas, foram utilizadas 11 com irrigação e 11 sem irrigação. Após a análise de todos os ensaios de furação, verifica-se que os termopares situados em posições mais próximas da zona de furação registaram valores de temperatura mais elevados, assim como as furações em que não foi utilizada a irrigação. A comparação entre os diferentes desvios padrões obtidos permitiu verificar que existe uma maior

discrepância nas temperaturas registadas em furos realizados sem recurso à irrigação, em comparação com os furos realizados com recurso à irrigação. Este comportamento era previsível, uma vez que as furações acompanhadas de ar comprimido registam gamas de valores menos alargados. O pico máximo de temperatura atingido encontra-se no termopar T do Furo 7, sem irrigação e no Lado B, com um valor médio de 33,23°C, enquanto que o valor mais baixo regista-se no termopar R do Furo 1, com irrigação e também no Lado B.

5. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu apresentar resultados experimentais de temperaturas obtidas durante um processo de furação óssea, considerando ou não o uso de irrigação. Foram também apresentados resultados numéricos que traduzem robustez e concordância com os resultados experimentais, revelando-se ótimas ferramentas de análise

Tabela 4 – Média e desvio padrão (SD) das temperaturas registadas nos diferentes furos e termopares.

Nº Furo	Termopar	Com irrigação				Sem irrigação			
		Lado A		Lado B		Lado A		Lado B	
		Média	SD	Média	SD	Média	SD	Média	SD
1	T	22,5	1,3	22,33	1,96	27,67	2,96	32,53	5,41
	M	21,5	1,2	20,77	0,93	26,99	3,43	23,99	2,39
	R	21,4	1,6	19,19	0,19	—	—	19,83	0,64
2	T	20,38	0,82	21,40	0,83	27,64	3,22	30,61	3,47
	M	21,75	1,55	21,35	1,08	25,66	3,67	23,11	1,96
	R	19,97	1,44	19,52	0,19	24,28	3,72	19,87	0,53
3	T	21,26	0,89	21,57	0,83	28,33	3,44	27,58	3,04
	M	21,71	1,30	21,01	0,89	26,17	3,63	23,49	1,74
	R	20,41	0,88	19,52	0,19	24,55	3,52	20,41	0,75
4	T	24,52	2,72	23,00	1,78	26,00	2,32	32,41	4,83
	M	23,42	2,00	21,29	0,98	25,51	2,84	24,54	1,98
	R	22,12	1,84	19,63	0,20	24,38	3,37	20,26	0,75
5	T	—	—	23,45	1,35	—	—	31,34	4,06
	M	—	—	21,86	1,16	—	—	25,21	2,98
	R	—	—	19,81	0,21	—	—	20,38	0,75
6	T	—	—	22,97	1,04	—	—	30,39	3,30
	M	—	—	20,88	0,82	—	—	25,64	2,83
	R	—	—	20,15	0,12	—	—	20,86	0,89
7	T	—	—	22,69	1,08	—	—	33,23	4,45
	M	—	—	21,26	0,94	—	—	26,53	3,32
	R	—	—	20,26	0,14	—	—	20,93	0,86

para este tipo de situações. Os ensaios realizados permitiram concluir que o uso de irrigação, através de ar comprimido, diminui significativamente a agressão ao tecido ósseo, uma vez que foram os modelos que registaram campos de temperaturas menos elevados. Tanto os ensaios experimentais como os modelos numéricos indicaram que os picos de temperatura regista-vam-se nas zonas adjacentes à broca e perto do orifício de furação. A temperatura diminui com o afastamento destas zonas, concluindo-se assim que as zonas mais críticas para a ocorrência de necrose térmica são junto ao furo. No entanto, e de acordo com estudos encontrados na literatura, os modelos considerados neste estudo, apresentam uma gama de valores que não é suficiente para a ocorrência da necrose térmica.

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

- Abage, M. 1998. Necrose Térmica do Osso Produzida por Perfuração com Broca Metálica, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.
- Augustin, G., Davila, S., Mihoci, K., Udiljak, T., Vedrina, D. S., & Antabak, A. 2008. Thermal osteonecrosis and bone drilling parameteres revisited. *Arch orthop Trauma surg*, 128:71-77.
- Augustin, G., Davila, S., Udiljak, T., Staroveski, T., Brezak, D., & Babic, S. 2012. Temperature changes during cortical bone drilling with a newly designed step drill and an internally cooled drill. *International Orthopaedics*.
- Carvalho, D.S., Abrão, A.M., Rubio, J.C.C. 2004. Monitoramento da Temperatura de

Usinagem, XI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Nova Friburgo, Rio de Janeiro.

EN 1993-1-2:1995 2005. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design, CEN.

Fonseca, E.M.M., Magalhães, K., Fernandes, M.G.A., Barbosa, M.P., Sousa, G. 2012. Numerical Model of Thermal Necrosis due a Dental Drilling Process, II Inter. Conf. On Biodental Engineering, R.M. Natal Jorge et al (Eds), CRC PRESS, Taylor & Francis.

Lopes, M.C.A. 1997. Reparação Óssea Após Osteotomia com Broca Tronco-Cônica, Serra Oscilatória e serra recíprocante. Estudo Histológico em Cães, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

Magalhães, K., Fonseca, E.M.M., Monteiro, D.C.A. 2013. Metodologia para Determinação da Elevação da Temperatura por Cimentação ou Furação num Modelo Dentário, 5º Cong. Nac. Biomecânica, R.M. Natal (Ed), p613-617.

Sawbones – Worldwide Leaders in Orthopaedic and Medical Models, www.sawbones.com/

Sezek, S., Aksakal, B., Karaca, F. 2012. Influence of drill parameters on bone temperature and necrosis: A FEM modelling and in vitro experiments, *Journal of Comp. Materials Science*, 60, p.13-18.

Shin, H.C., Yoon, Y.S. 2006. Bone temperature estimation during orthopaedic round bur milling operations, *Jour. Biomechanics*, 39(1), p.33-39.

Sousa, P.F.B. 2009. Estudos de Processos Térmicos Decorrentes da Usinagem: Aplicação de Problemas Inversos em Furação, Tese PhD, Univ. Federal Uberlândia.

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

Vasconcellos, V. d. (2012). Avaliação do Desempenho de Fresas Cirúrgicas Para Implantes Osseointegráveis. Inst. Militar de Engenharia, Rio Janeiro.