MODELO 3D PARA ANÁLISE TÉRMICA DURANTE O PROCESSO DE FURAÇÃO DO OSSO CORTICAL

3D MODEL FOR THERMAL ANALYSIS DURING A CORTICAL BONE DRILLING PROCESS

M. G. A. Fernandes[1], E. M. M. Fonseca[2], R. Natal[3]

[1] PhD Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto
[2] Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança
[3] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto

RESUMO

A produção excessiva de calor durante os processos de furação óssea é um procedimento que pode resultar na osteonecrose térmica, reabsorção óssea e prejudicar a osteointegração dos implantes. A análise dos diferentes parâmetros de furação e materiais utilizados podem reduzir a temperatura durante o processo de furação óssea e contribuir para um maior sucesso deste tipo de intervenções cirúrgicas. Neste contexto, o principal objetivo deste estudo foi a construção de um modelo numérico tridimensional para simular o processo de furação considerando a influência da irrigação e a densidade óssea do osso cortical normal e osteoporótico. A metodologia numérica foi complementada com uma metodologia experimental anteriormente realizada. Recorreu-se a um processo de irrigação, essencial para diminuir os danos no tecido ósseo em processos de furação. Verificou-se que a furação no tecido ósseo osteoporótico apresenta valores de temperatura inferiores quando comparado com o tecido cortical normal. O modelo numérico desenvolvido revelou-se uma ótima ferramenta de análise em processos desta natureza.

ABSTRACT

The excessive heat produced during the bone drilling process can result in thermal osteonecrosis, bone reabsorption and to damage the osseointegration of implants. The analysis of different drilling parameters and materials can decrease the temperature during the bone drill process and contribute to a greater success of this kind of surgical interventions. The main objective of this study was to build a numerical three-dimensional model to simulate the drilling process considering the influence of irrigation and the bone density of the cortical normal bone and osteoporotic bone. The numerical methodology was coupled with an experimental methodology. The use of irrigation proved to be essential to decrease the damage in the bone tissue in the process of drilling and it was concluded that the drilling in the osteoporotic bone presents temperature values much smaller when compared with the normal cortical. The developed numerical model proved to be a great tool of this type of analysis.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente existem vários procedimentos cirúrgicos que envolvem o tecido ósseo, sendo de extrema importância o conhecimento sobre o comportamento durante e após o ato cirúrgico. A furação do tecido ósseo tem sido discutida na literatura com frequência, tanto a nível clínico como a

nível experimental, devido aos problemas de produção de calor que este procedimento acarreta. O aumento excessivo de calor, durante a furação óssea, pode produzir danos irreversíveis na matriz orgânica do osso (Matthews e Hirsch 1972; Lavelle e Wedgwood 1980; Eriksson et al. 1982; Eriksson e Albrektsson 1983). A gravidade dos danos está diretamente relacionada com o tempo de exposição e a temperatura atingida (Lopes 1997). Alguns autores debruçaram-se em estudos relacionados com o registo das temperaturas alcançadas durante processos de furação óssea e concluíram que quando o osso cortical atinge uma temperatura de 47ºC por um minuto ocorre a morte do tecido ósseo (Tu et al. 2013; Eriksson e Albrektsson 1983). Outros autores relataram que quando atingidas temperaturas acima dos 55ºC por um período superior a 30 segundos provocam lesões irreversíveis no tecido ósseo (Tu et al. 2013; Hillery e Shuaib 1999). A temperatura gerada nestes processos encontra-se ligada às condições de corte impostas, tais como velocidade de corte, velocidade de avanço, geometria da broca, pressão exercida para o avanço da ferramenta, profundidade do furo, uso ou não de um sistema de irrigação e também a densidade dos materiais envolvidos (Carvalho et al. 2004). O controlo adequado destes parâmetros é fundamental para manter a integridade física e funcional do tecido ósseo perfurado, assim como o controlo das temperaturas registadas na interface de corte, através do desenvolvimento de metodologias que possibilitem a obtenção do campo de temperaturas na ferramenta de corte e no material perfurado.

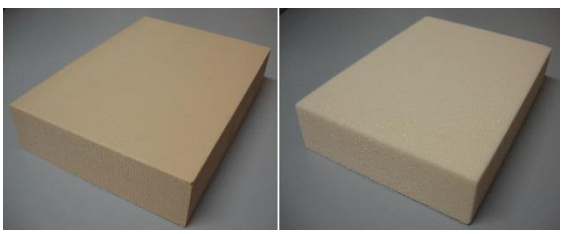
Nesse sentido, o principal objetivo deste estudo é desenvolver novas metodologias que possibilitem a obtenção da distribuição de temperatura nas proximidades das paredes dos furos e nos tecidos envolventes, durante processos de furação óssea, a partir de métodos experimentais e numéricos. O método experimental referido neste trabalho já tinha sido desenvolvido para obtenção das temperaturas durante a furação de blocos da *Sawbones*, considerando a influência da densidade e a aplicação ou não de irrigação. O modelo numérico proposto neste trabalho vai de encontro com a geometria dos blocos utilizados no método experimental e pretende simular a temperatura atingida em processos de furação desta natureza. O complemento de ambos os métodos permite validar os resultados obtidos.

2. MODELOS DE ANÁLISE TÉRMICA

2.1. Modelo Experimental

Neste estudo foram utilizados dois blocos da *Sawbones* (Fig.1), ambos com uma dimensão de 130mmx180mmx40mm e com densidades similares às do osso cortical humano, considerando osso normal e osteoporótico. Em ambos os blocos foram realizadas furações com registo das temperaturas no interior do material e na ferramenta de corte.

Através da utilização de termopares tipo k posicionados em duas faces opostas de ambos os blocos e em posições adjacentes à broca, registaram-se os valores de temperatura no interior do material. Todos os termopares foram colocados estrategicamente com o objetivo de estudar a intensidade do calor gerado e a distribuição da temperatura na interface de corte e vizinhança próxima do furo. Assim, numa das faces do bloco colocaram-se os termopares à mesma distância da broca (Lado A) com profundidades diferentes. Na outra face consideraram-se termopares a distâncias diferentes da broca com profundidades diferentes (Lado B), Fig.2. A inserção dos termopares foi realizada através de furações laterais com diâmetro de 3,5mm.



(a) (b)

Fig. 1- Blocos da *Sawbones*: (a) Cortical Normal, (b) Cortical Osteoporótico.

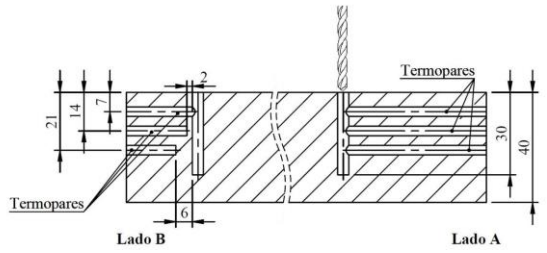


Fig. 2 – Posição dos termopares.

Com o objetivo de facilitar a identificação de cada termopar e posterior leitura dos dados, etiquetaram-se conforme a tabela 1 para posterior ligação a um sistema de aquisição de dados, o *MGCplus*. Este sistema permitiu a leitura das temperaturas obtidas no interior do bloco ao longo do tempo, Fig. 3.

Tabela 1 – Etiquetagem 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

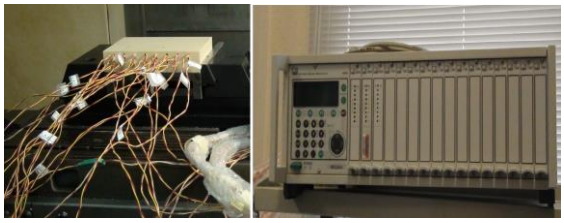


Fig. 3 – Colocação dos termopares e *MGCplus*.

O registo da temperatura na ferramenta de corte foi efetuado com recurso à termografia. Utilizou-se uma câmara termográfica FLIR® T365, posicionada a uma distância de 1,5 m da zona de furação que permitiu obter imagens termográficas e vídeos das furações efetuadas, Fig. 4.

Com uma broca metálica de aço rápido sinterizado realizaram-se 32 furações verticais (16 furações no cortical normal e 16 furações no cortical osteoporótico) com diâmetro de 4mm, e uma profundidade de 30mm, Fig. 4. A broca apresentava um ângulo de 135º. Em todas as furações ponderou-se um conjunto de parâmetros considerados aceitáveis neste tipo de procedimeos. A tabela 2 ilustra todos os parâmetros considerados (Fonseca et al. 2012).

Tabela 2 - Parâmetros para a furação óssea.

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)	45s + 55s

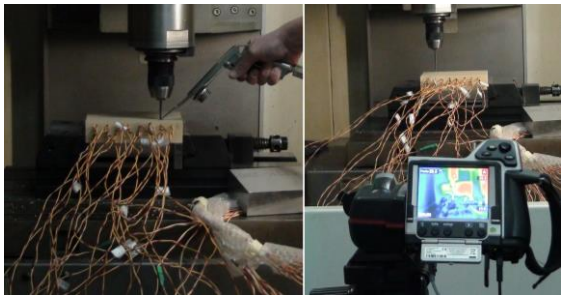


Fig. 4 – Furações e câmara termográfica.

A utilização de irrigação durante o processo de furação foi efetuada com ar comprimido e apenas para alguns furos do bloco cortical normal. O cortical osteoporótico apesar de apresentar um volume anatómico igual ao do cortical normal contém uma porosidade aumentada (Santos 2007). Este fato faz com que o uso de irrigação não produza diferenças no registo das temperaturas, uma vez que o calor dissipa para fora do furo mais facilmente.

A distância entre as furações efetuadas, bem como o tempo de espera de arrefecimento da broca para cada furação também foi tido em conta, garantindo que o aquecimento de cada furo não interferira nos valores de temperatura do furo seguinte. A Fig. 5 ilustra a geometria dos blocos utilizados no estudo e a distância entre os furos efetuados.

2.2. Modelo de Elementos Finitos

Neste trabalho desenvolveu-se um modelo numérico tridimensional representativo de metade de um bloco da *Sawbones*, com as respetivas oito furações representadas na Fig. 6. Este modelo respeita

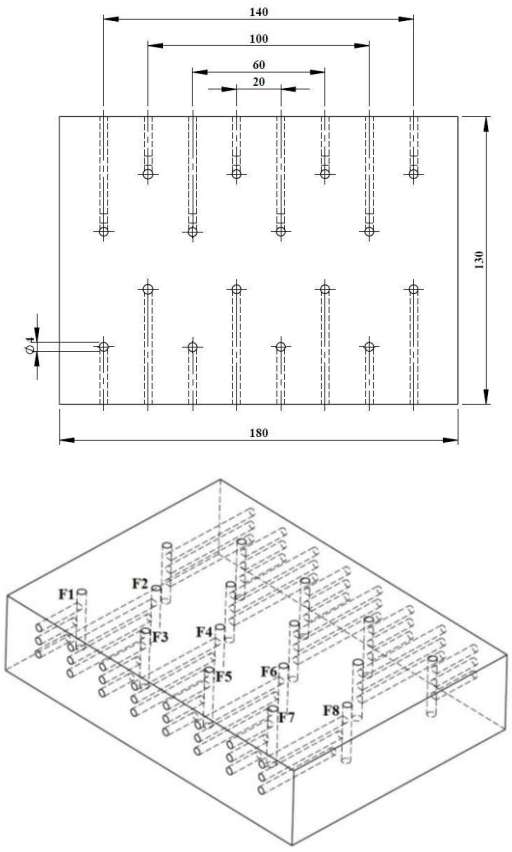


Fig. 5 – Modelo CAD dos blocos em estudo.

as dimensões dos blocos reais utilizados neste estudo e todas as variáveis envolvidas no processo de furação. Atendendo às características térmicas do osso cortical e da broca utilizada no modelo experimental utilizou-se um conjunto de propriedades térmicas, apresentadas na tabela 3 (Magalhães et al. 2013, The European Union 2005).

Através do programa *Ansys*® criou-se uma malha de elementos finitos, Fig. 6. Foi utilizado um elemento térmico 3D de 8 nós com capacidade de condução de calor, *Solid 70*, (Ansys Mechanical APDL Thermal Analysis Guide, 2015).

Tabela 3 – Propriedades térmicas.

Material	Massa específica kg/m^3	Condutividade W/mK	Calor específico J/kgK
Broca	7850	53,3	440
Cortical normal	800	0,4	1260
Cortical osteop.	80	0,4	1260

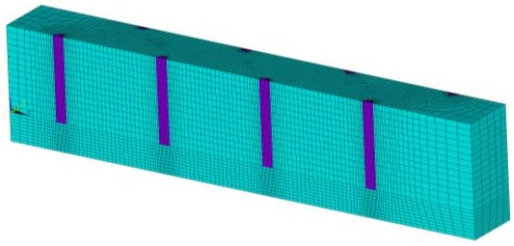


Fig. 6 - Malha de elementos finitos.

Para a simulação da fonte de calor no interior do bloco recorreu-se ao registo de curvas de temperatura no tempo obtidas com a câmara termográfica, referentes à broca durante o processo de furação óssea. Essas curvas foram impostas como condição térmica de temperatura prescrita nos modelos numéricos à superfície da broca.

As figuras 7 e 8 representam a evolução da temperatura registada na broca, ao longo da furação num processo sem irrigação, para o osso cortical normal e osteoporótico, respetivamente.

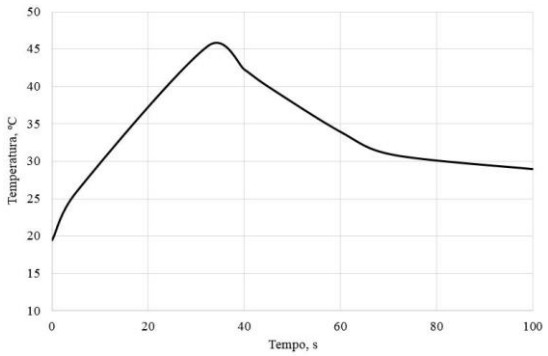


Fig. 7 - Curva de calor da broca para cortical normal.

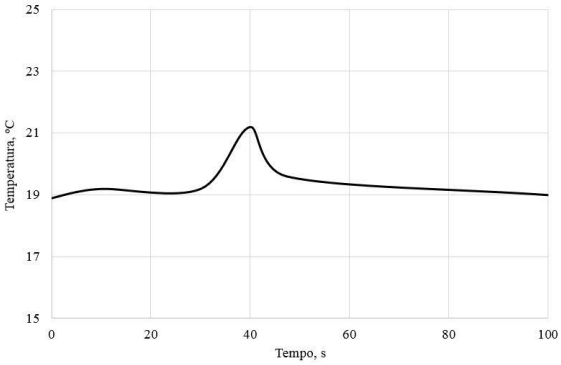


Fig. 8 - Curva de calor da broca para cortical osteoporótico.

As furações efetuadas com o acompanhamento de irrigação mantiveram uma

temperatura constante na ferramenta de corte, com valores que rondam os 19ºC. Para estas furações também foram impostos nos modelos numéricos valores de temperatura prescrita à superfície da broca, mas constantes.

Em todas as simulações efetuou-se uma análise térmica em regime transiente. Considerou-se uma temperatura inicial em todo o modelo de 19ºC e uma convecção natural na superfície superior do osso. Respeitando os tempos de furação do modelo experimental, estabeleceu-se no modelo numérico um tempo de furação total de 800 segundos, 45 segundos de furação seguidos de 55 segundos de arrefecimento para cada um dos 8 furos.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Como já foi referido anteriormente, são várias as variáveis que podem influenciar a geração de calor durante a furação do tecido ósseo. Neste estudo avaliou-se a influência do uso de irrigação durante a furação óssea e a influência da densidade do osso, através de duas metodologias diferentes (experimental e numérica).

Para avaliar a influência da irrigação considerou-se apenas o osso cortical normal. Os resultados finais são apresentados graficamente com base na comparação das temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente. No modelo numérico o registo das temperaturas é efetuado em diferentes posições nodais, respeitando as posições dos termopares como descrito na Fig. 2.

As Figuras 9, 10 e 11 representam as temperaturas obtidas ao longo do tempo de furação e arrefecimento para dois furos do bloco, com irrigação e sem irrigação. Utilizou-se a legenda descrita na tabela 1 e designou-se E como experimental e N numérico.

Os resultados obtidos esclarecem a influência significativa que o uso de irrigação produz na distribuição de temperaturas obtidas no interior do osso. Tanto no modelo experimental como no modelo numérico verifica-se que a utilização de refrigeração na zona de corte diminuiu a agressão ao tecido ósseo, uma vez que as temperaturas atingidas

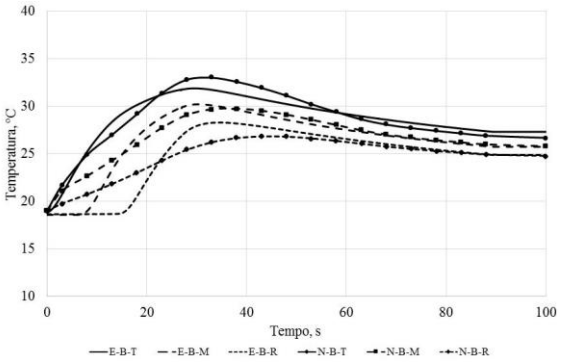


Fig. 9 – Cortical Normal: Lado A, sem irrigação.

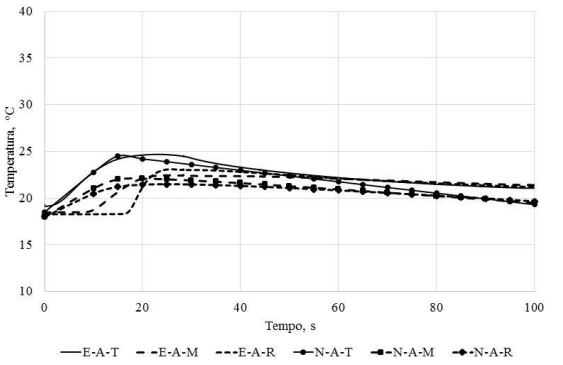


Fig. 10 - Cortical Normal: Lado A, com irrigação.

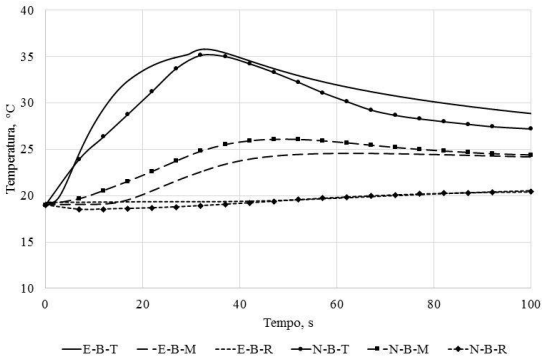


Fig. 11 - Cortical Normal: Lado B, sem irrigação.

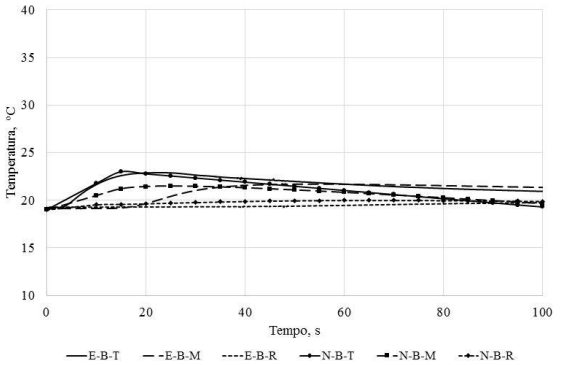


Fig. 12 - Cortical Normal: Lado B, com irrigação.

nestas circunstâncias não ultrapassam os 25ºC. Quando realizadas furações sem recurso à

irrigação observa-se um acentuado aumento da temperatura para valores entre 30 a 40ºC.

A comparação dos resultados obtidos entre os lados A e B também permitiu verificar e comparar a variação de temperatura no interior do osso para cada posição dos termopares, de acordo com a profundidade e distância da zona de furação. Como seria de esperar, os valores críticos de temperatura são atribuídos aos termopares posicionados na interface da broca-osso e nas profundidades próximas da zona do orifício. As furações efetuadas atingiram os picos máximos de temperatura no intervalo de tempo entre os 20-40s. No geral, os resultados numéricos e experimentais apresentam resultados concordantes.

Considerando os blocos cortical normal e osteoporótico, foi analisada a influência da qualidade e densidade do osso em processos de furação. A Fig. 13 representa os perfis de temperatura obtidos para o mesmo furo do modelo cortical normal e cortical osteoporótico respetivamente, no instante de tempo em que o tecido ósseo regista os valores mais críticos de temperatura nesse mesmo furo.

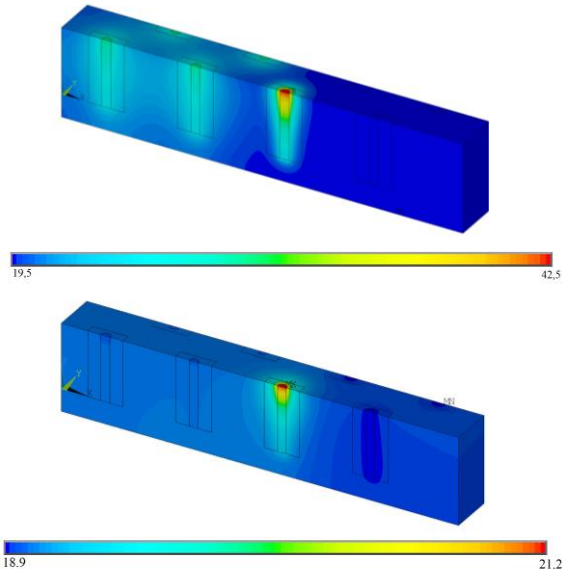


Fig. 13 - Temperatura durante a furação a 440s: cortical normal e cortical osteoporótico.

Através dos modelos é bastante percetível a diferença que a densidade óssea provoca no aquecimento do tecido ósseo. Verificam-se valores de temperatura entre 30-43ºC no cortical normal, enquanto que no cortical osteoporótico não ultrapassam os 22ºC. Como referido anteriormente o osso cortical osteoporótico apresenta uma porosidade bastante maior quando comparado com o cortical normal. Esta situação permite que a furação seja mais fácil quando impostos os mesmos parâmetros que no osso cortical normal, para além disso a formação de fragmentos ósseos na superfície de corte da broca é bastante menor, evitando a obstrução do furo e por sua vez a redução de calor durante a furação. Outro aspeto evidente é o ligeiro aquecimento dos furos realizados anteriormente conforme se representa na Fig. 13. No modelo cortical osteoporótico este acontecimento não é tão evidente, uma vez que o calor se dissipa facilmente ao longo do modelo e para fora do furo, estando o pico de temperatura muito próximo da temperatura inicial do bloco.

Todos os furos realizados no modelo cortical osteoporótico, registam um campo de temperaturas no interior do osso quase contante, que rondam os 18-22ºC. A tabela 4 apresenta a média das temperaturas registadas nos diferentes furos deste bloco, para ambas as metodologias descritas. No modelo numérico foram consideradas diferentes posições nodais para cada furo, respeitando sempre as distâncias mantidas nos termopares no modelo experimental.

Analisando as furações realizadas no modelo cortical osteoporótico verifica-se que os resultados experimentais e numéricos apresentam valores muito próximos. Todos os termopares registam uma distribuição de temperaturas constante, com tendência a diminuir conforme o afastamento do termopar da zona de furação. No entanto a diferença de temperatura de termopar para termopar é mínima. Em alguns furos realizados experimentalmente verifica-se que os termopares mais afastados da zona de furação não apresentam valores de temperatura mais baixos quando comparados aos termopares mais próximos da zona de furação. Este acontecimento pode ser explicado por pequenas deslocações do termopar no interior do bloco durante a furação, não garantindo sempre a distância pretendida em relação à zona de corte. Em

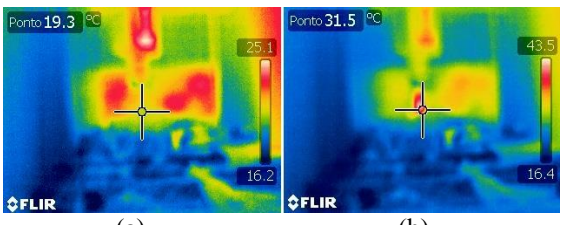
Tabela 4 – Média das temperaturas nos diferentes furos e termopares do cortical osteoporótico.

#	Termopar	Experimental		Numérico	
		Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
F1	T	20,25	19,53	19,34	19,34
	M	20,16	18,61	19,28	19,23
	R	19,89	18,22	19,23	19,11
F2	T	___	19,31	19,34	19,34
	M	21,2	19,00	19,27	19,22
	R	20,45	18,95	19,23	19,09
F3	T	___	18,61	19,34	19,34
	M	19,67	18,59	19,27	19,22
	R	19,27	18,65	19,22	19,12
F4	T	18,96	18,63	19,34	19,34
	M	18,56	18,24	19,27	19,22
	R	18,76	18,35	19,22	19,08
F5	T	19,20	19,07	19,31	19,31
	M	19,06	18,80	19,23	19,17
	R	19,60	18,74	19,17	19,06
F6	T	18,81	19,43	19,34	19,34
	M	18,47	18,75	19,27	19,21
	R	18,50	18,63	19,22	19,08
F7	T	18,23	18,38	19,34	19,34
	M	18,20	18,45	19,27	19,22
	R	18,17	18,42	19,22	19,11
F8	T	18,90	18,69	19,34	19,34
	M	18,87	18,84	19,27	19,23
	R	18,39	18,46	19,23	19,11

blocos desta natureza em que a porosidade do osso é bastante maior quando comparado com o cortical normal, existe também maior facilidade do calor gerado se espalhar dentro do osso.

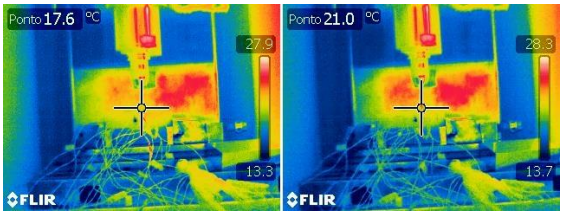
Numericamente todos os parâmetros envolvidos no registo de temperatura estão controlados, permitindo verificar que a tendência em todos os furos é a diminuição da temperatura em posições mais afastadas da zona de furação. Como seria de esperar os resultados encontrados numericamente nos diferentes furos são muito próximos ou até mesmo iguais. Furações realizadas em blocos desta natureza verifica-se que 55s de arrefecimento são suficientes para que não haja interferência dos valores de temperatura de furo para furo.

Para complementar os resultados obtidos também foram retiradas imagens térmicas da broca, antes e após a realização do furo, figuras 14 e 15. Tais imagens mostram novamente a influência que a densidade óssea tem na distribuição de temperaturas em processos de furação.



(a) (b)

Fig. 14 - Imagem termográfica da broca, cortical normal: (a) antes e (b) após a furação.



(a) (b)

Fig. 15 - Imagem termográfica da broca, cortical osteoporótico: (a) antes e (b) após a furação.

Com o objetivo de verificar a distribuição da temperatura, considerando a furação de todos os furos em simultâneo, efetuou-se numericamente a furação dos oito furos no bloco. A figura 16 mostra a distribuição das temperaturas ao longo do bloco cortical normal e cortical osteoporótico, para um tempo de furação de 100s.

Em ambos os blocos, sobretudo no osso cortical normal, observa-se que a realização dos 8 furos, e para o mesmo instante de tempo, origina um aquecimento maior no restante bloco, comprometendo ainda mais os tecidos envolventes.

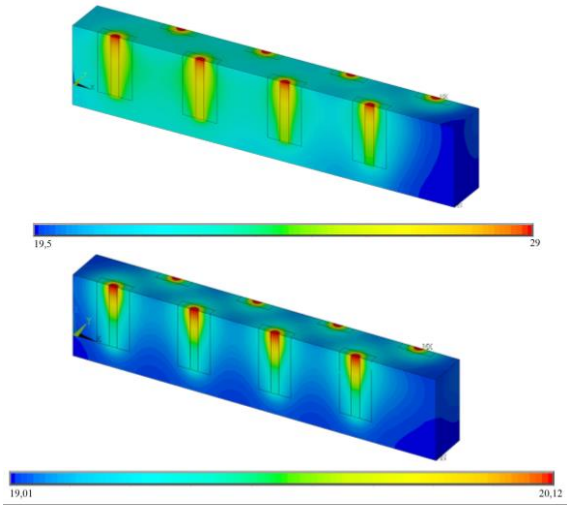


Fig. 16 – Temperatura no cortical normal e cortical osteoporótico.

4. CONCLUSÕES

Nos processos de furação óssea há variáveis que interferem diretamente nos valores de temperatura registados durante a furação óssea. O controlo adequado dessas variáveis e o desenvolvimento de novas metodologias de análise é essencial para perceber como manter a integridade do tecido ósseo neste tipo de processos. O presente estudo apresentou uma metodologia numérica que permitiu obter os campos de temperatura em processos de furação óssea, considerando a influência da irrigação e a densidade do osso envolvido. Os modelos numéricos registam concordância com os resultados experimentais já anteriormente obtidos. No osso cortical normal verificou-se que as furações realizadas com o acompanhamento de refrigeração registam uma temperatura menor quando comparadas com as furações realizadas sem qualquer agente externo. A qualidade e a densidade do osso envolvido é outro aspeto que interfere significativamente no registo de temperaturas. Nas furações realizadas no osso cortical osteoporótico não houve diferença significativa dos valores de temperatura, com valores muito próximos e que não ultrapassaram os 21ºC. Já no osso cortical normal verificaram-se valores entre os 30ºC a 40ºC, sendo notória a diminuição da temperatura com o afastamento da zona de furação. O modelo numérico apresentado neste estudo pode ser aplicado em diversos casos de furação, considerando diferentes variáveis. A obtenção de resultados é rápida e permite um controlo preciso das variáveis envolvidas.

5. 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).

6. REFERÊNCIAS

Ansys Mechanical APDL Thermal Analysis Guide, Realease 15.0, 2015.

Carvalho, D.S., Abrâo, 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.

Eriksson, A.R., Albrektsson, T., Grane, B., Mcqueen, D. 1982. Thermal injury to bone. A vital microscopic description of heat effects, Int J Oral surg 11:115-121.

Eriksson, A.R., Albrektsson, T. 1983. Temperature threshold levels for heat induced bone tissue injury. A vital-microscopic study in the rabit. J Prosthet Dent 50:101-107.

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 Engenireering, R.M. Natal Jorge et al (Eds), CRC PRESS, Taylor & Francis.

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

Lavelle, C., Wedgwood, D. 1980. Effect of internal irrigation on friccional heat generated from bone drilling. J Oral Surg 38: 499-503.

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

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

Matthews, L.S., Hirsch, C. 1972. Temperatures mensured in human cortical bone when drilling, J. Bone Joint Surg. Am., 54: 297-308.

Santos, L.M.F. 2007. Análise Comparativa dos Parâmetros quantitativos do osso osteoporótico – Modelo Computacional de Remodelação Óssea VS Resultados Clínicos de DEXA, pag. 18, Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa, Faculdade de Medicina.

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

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.