



ANÁLISE DE TENSÕES EM MATERIAIS SÓLIDOS DE ESPUMAS DE POLIURETANO RÍGIDAS SOB FURAÇÃO

LUCAS D. AZEVEDO¹, MARIA G. A. FERNANDES^{1,2}, ELZA M. M. FONSECA^{1,2}, RENATO M. NATAL^{2,3}

¹ Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
Campus de Santa Apolónia
5300-253 Bragança, Portugal

² LAETA, INEGI

³ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

(Recibido 5 de julio de 2016, para publicación 14 de septiembre de 2016)

Resumo – Em diferentes áreas da medicina existem processos cirúrgicos que envolvem a furação de tecido ósseo, dependendo o seu sucesso da conjugação de diversos parâmetros. A previsão e o controlo dos parâmetros envolvidos são fundamentais para a redução do dano no tecido ósseo. Este trabalho de investigação tem como objetivo avaliar o estado de tensão gerado durante o processo de furação utilizando materiais sólidos de espumas de poliuretano rígidas com características similares ao osso humano. Durante a furação dos materiais sólidos são utilizados métodos experimentais, baseados na extensometria e na termografia, para análise das deformações e da temperatura na broca. Os parâmetros envolvidos na furação são a velocidade de rotação e a geometria da broca constantes em diferentes testes, sendo variável a velocidade de avanço. Em simultâneo, foi desenvolvido um modelo numérico de formulação explícita, com recurso ao método de elementos finitos, através do programa LS-DYNA. Os resultados permitem obter o campo de tensões nos materiais sólidos em função dos diferentes parâmetros de furação. Para a mesma velocidade de rotação e geometria da broca, a diminuição na velocidade de avanço provoca o aumento do nível de tensão. Em relação à resistência mecânica da espuma de poliuretano rígida utilizada, e para a zona de medição instrumentada, não há registo de dano material. O dano é provocado na zona de furação pela remoção do material.

Palavras-chave – Furação, Tensão, Termografia, Elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

A furação óssea é uma operação mecânica largamente realizada em procedimentos cirúrgicos ortopédicos diferentes [1, 2]. O processo de furação pode ser definido como o corte através de arranque de apara, com base em dois movimentos simultâneos, movimento de rotação e translação. Com o avanço tecnológico, as ferramentas utilizadas em procedimentos cirúrgicos que envolvem furação óssea têm sido aprimoradas, no entanto, uma vez que é realizada manualmente, o sucesso de uma furação ainda depende bastante da experiência do cirurgião [3, 4]. Em ambiente cirúrgico é importante o controlo da velocidade de avanço tendo em conta a qualidade e a densidade do tecido ósseo. Apesar da precisão e da exatidão na execução do furo, existem diversos fatores relacionados com o processo de furação que podem induzir dano no tecido ósseo. O principal desafio em furação óssea é obter os furos pretendidos sem causar dano térmico e mecânico ao osso [5]. Por isso, é importante compreender os efeitos das condições de furação, geometria da ferramenta e do comportamento do material quando solicitado pelos esforços de corte.

Durante o processo de furação existe um aumento de temperatura que pode resultar em necrose óssea, isto é, morte celular quando a temperatura atinge determinados valores. Um aumento de temperatura no osso cortical acima de 50°C implica redução na capacidade regenerativa do tecido ósseo, ocorrendo necrose óssea se o tecido estiver exposto a uma temperatura de 50°C durante 30 segundos [6, 7].

A aplicação de grandes esforços durante a furação óssea pode resultar em dano para o tecido ósseo, promovendo a formação de fissuras, o que diminui significativamente a resistência do tecido ósseo [8]. A

velocidade de rotação, a velocidade de avanço e a geometria da broca são os principais parâmetros estudados, mas que ainda suscitam dúvidas nos resultados obtidos. Para o estudo destes parâmetros e a verificação da sua influência em processos de furação óssea, têm sido realizadas diversas investigações numéricas e experimentais [2], [9-12]. O aumento da velocidade de avanço reduz os esforços de corte e a energia específica de corte durante processos de furação óssea. Este efeito é atribuído à mudança no coeficiente de atrito que ocorre entre a broca e o osso quando a velocidade de avanço aumenta [9].

No presente estudo, a componente experimental foi desenvolvida recorrendo à utilização de materiais sólidos de espumas de poliuretano rígidas da *Sawbones*, considerados como materiais ideais e alternativos dado as suas propriedades mecânicas serem similares ao osso humano [13]. Cada material sólido foi instrumentado com extensómetros à superfície para o registo das deformações durante o processo de furação. Para a comparação dos resultados, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional (3D) de dinâmica explícita para a simulação do processo de furação. Este modelo permite o cálculo das tensões geradas no material sólido em função das condições de furação impostas, das propriedades e do comportamento material, bem como da geometria da ferramenta de corte. O contacto entre a ferramenta e o material sólido, assim como o esquema de remoção de elementos durante a furação, são tidos em consideração, possibilitando a penetração da ferramenta de corte e a remoção do material. O principal objetivo deste estudo é avaliar as tensões geradas na superfície dos materiais sólidos, em furações com o aumento da velocidade de avanço e velocidade de rotação imposta como constante.

2. COMPONENTE EXPERIMENTAL

Para a realização da componente experimental foram utilizados dois blocos sólidos de espuma de poliuretano rígida com propriedades mecânicas similares ao osso humano cadavérico. A dimensão do bloco (em forma de paralelepípedo) é de 130x180x40 mm, com massa volúmica de 800 kgm^{-3} [13]. Os blocos foram instrumentados com 9 extensómetros para um total de 18 furos a realizar. Posteriormente foram efetuadas as furações verticais para obtenção dos valores das deformações à superfície dos materiais e simultaneamente a temperatura na ferramenta de corte. Os furos foram realizados a 3,5 mm do centro do extensómetro, conforme representado na Fig. 1.

Foram utilizados extensómetros lineares (1-LY18-6/120, $120\Omega \pm 0,35\%$, HBM) colados à superfície e conectados a um sistema de aquisição de dados (Vishay Micro Measurements P3 Strain Indicator Recorder) com ligação a um computador. A furação foi efetuada numa máquina CNC (DMC 63V), tendo sido utilizada uma broca de aço rápido sinterizado com 4mm de diâmetro, 30 mm de comprimento e ângulo de ponta 118° . A Fig. 2 representa o *setup* experimental utilizado durante as furações.

Nos parâmetros de furação foram utilizadas diferentes velocidades de avanço para uma velocidade de rotação constante, conforme definido na tabela 1.

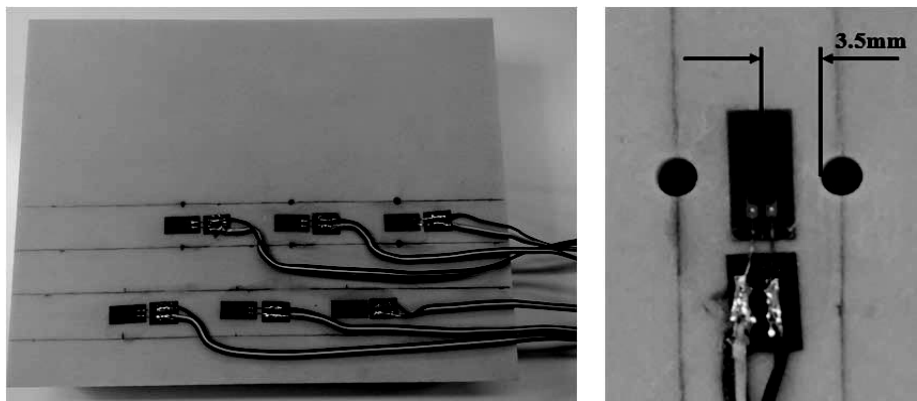


Fig. 1. Disposição dos extensómetros à superfície dos blocos.

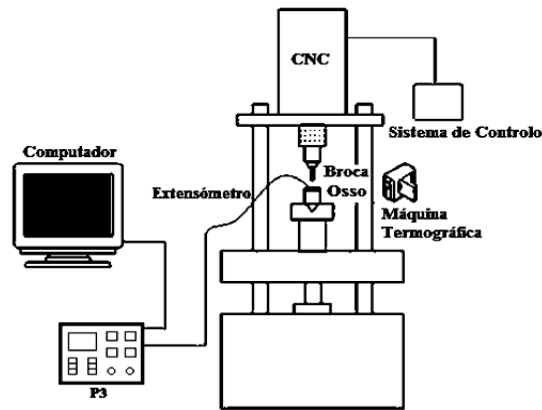


Fig. 2. Setup experimental.

Tabela 1. Parâmetros de furação.

Velocidade de avanço	25 mm/min	50 mm/min	75 mm/min
Tempo de furação	75s + 55s	36s + 55s	25s + 55s
Velocidade de rotação	600 rpm		
Diâmetro da broca	4 mm		
Ângulo de ponta	118°		

Tabela 2. Parâmetros de aquisição das imagens termográficas.

Emissividade do aço	0,70
Temperatura ambiente	20°C
Humidade relativa	50%
Distância	1,5m

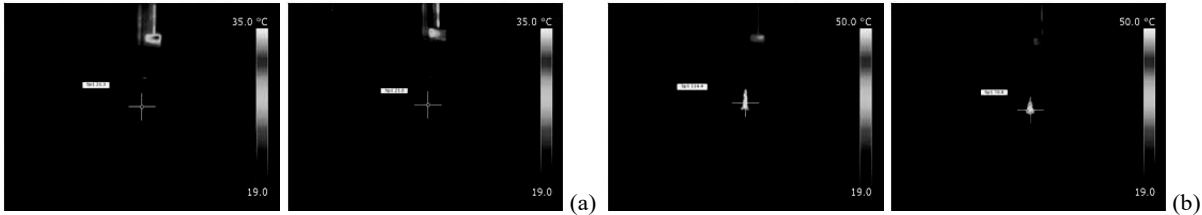


Fig. 3. Imagens termográficas registradas (a) antes e (b) após a furação.

As temperaturas na ferramenta foram registradas, com uma câmara termográfica FLIR®T365, imediatamente antes e após a furação. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente da sala. Os parâmetros utilizados para a aquisição das imagens termográficas são apresentados na tabela 2.

Na Fig. 3 é possível observar algumas imagens termográficas obtidas imediatamente antes e após cada furação.

3. COMPONENTE NUMÉRICA

O método de elementos finitos possibilita o desenvolvimento de modelos numéricos que conseguem prever razoavelmente os esforços gerados nos materiais. Para problemas que envolvam grandes deforma-

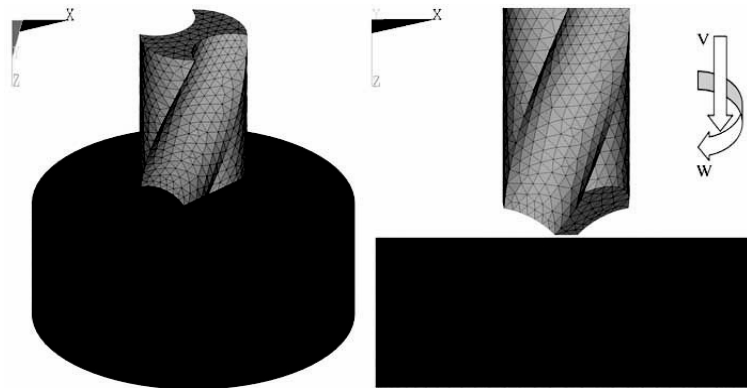


Fig. 4. Modelo numérico 3D.

ções há diferentes métodos que podem ser utilizados, sendo neste estudo utilizado o método de elementos finitos com erosão de elementos. Neste contexto, foram desenvolvidos modelos numéricos tridimensionais para simular os processos de furação. A análise numérica foi realizada com recurso a um código de elementos finitos explícito, ANSYS LS-DYNA (LSTC, Livermore). O modelo numérico 3D consiste num modelo reduzido da broca e do material sólido com configuração circular, conforme se apresenta na Fig. 4. A ferramenta de corte foi desenvolvida através de um *software* CAD, o SolidWorks®, com geometria semelhante à da broca utilizada na componente experimental ($\varnothing 4$ mm e ângulo de ponta de 118°). O material sólido tem 5 mm de espessura e $\varnothing 12$ mm, representando uma zona circular envolvente num furo real.

Foi realizado um estudo de convergência de malhas de forma a encontrar um equilíbrio entre a discretização da malha e a distribuição de tensões na superfície do bloco circular. Foi adotada uma malha com elementos de dimensão de 0,5mm em todo o modelo geométrico. O elemento finito utilizado para o modelo 3D foi o *Solid 164* (8 nós com três graus de liberdade), apenas disponível em análises dinâmicas explícitas. O modelo do bloco é constituído por 38613 elementos e a broca por 5445 elementos. A base do bloco circular foi constrangida segundo todos os graus de liberdade. A broca foi modelada como um corpo rígido, de forma a reduzir o tempo e esforço computacional, com imposição da velocidade de rotação (W) no eixo longitudinal e velocidade de avanço (V) sobre o bloco. De forma a garantir a furação total do bloco circular e a posterior comparação de resultados no final da furação, cada análise computacional tem um tempo de simulação em função das velocidades de avanço utilizadas. A análise numérica foi realizada com os mesmos parâmetros utilizados no modelo experimental, representados na tabela 2.

3.1. Modelo Constitutivo Material

No presente trabalho o comportamento do material sólido foi considerado elástico-plástico dependente da taxa de deformação e do critério de cedência do material. Foi utilizado o modelo de Cowper-Symonds (equação 1), em que para análise linear isotrópica ($\beta=1$), cinemática ($\beta=0$), ou mista ($0<\beta<1$) em que se considera o endurecimento por deformação plástica e o efeito da velocidade de deformação plástica. Para o cálculo da tensão de cedência, no modelo de Cowper-Symonds com comportamento material cinemático plástico [12], a relação de potência é a seguinte:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (1)$$

onde:

σ_y - tensão de cedência, MPa;

β - é o parâmetro de endurecimento por deformação plástica;

σ_0 - tensão de cedência inicial, MPa;

$\dot{\epsilon}$ - a intensidade da velocidade de deformação plástica, s^{-1} ;

C – parâmetro do material definindo o efeito da intensidade da velocidade de deformação plástica, s^{-1} ;
 $1/P$ – constante do material definindo a sensibilidade da velocidade de deformação plástica;

ε_p^{eff} - intensidade da deformação plástica;

E_p – parâmetro do material dependente do módulo de endurecimento de deformação plástica, designado por módulo tangente E_{tan} , e do módulo de Young E , obtido conforme a equação 2.

$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}} \quad (2)$$

A remoção do material no processo de furação ocorre pela erosão de elementos, durante a deformação plástica quando este atinge o seu limite através de um critério pré-definido. Quando um elemento é removido do processo de cálculo, a sua massa é distribuída pelos nós adjacentes de outros elementos. No entanto, a erosão causa perda de energia interna, resistência e possivelmente massa, pelo que os limites de erosão devem ser estabelecidos de forma a que os elementos não sejam eliminados se não atingirem o máximo de deformação estabelecido para não afetarem os resultados da solução [14]. Há diferentes critérios de erosão definidos na literatura, sendo classificados de acordo com o tipo de variável utilizada no controlo da erosão [14], baseados: na deformação, na tensão, no dano, na falha, ou no intervalo de tempo. No presente estudo foi utilizado o critério de erosão por falha de deformação, sendo que a erosão se inicia quando o limite de deformação geométrico instantâneo é alcançado, conforme a equação 3:

$$\frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) + 5(\varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \varepsilon_1 + \varepsilon_3 \varepsilon_2) - 3(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{13}^2)} \gg \varepsilon_{lim}^{eff} \quad (3)$$

onde:

ε_{lim}^{eff} - critério limite por deformação;

$\varepsilon_i - \varepsilon_{ij}$ componentes de deformação ($i, j = 1, 2, 3$).

O contacto entre o bloco cilíndrico e a broca foi efetuado através de um algoritmo de contacto disponível no código LS-DYNA (*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE). Este algoritmo é utilizado quando a superfície de um corpo penetra a superfície de outro corpo, e atendendo ao tipo de simulação (processo de furação com remoção de elementos) este algoritmo é o mais indicado [12].

As propriedades mecânicas do bloco cilíndrico e da broca consideradas nesta análise numérica são apresentadas na tabela 3 [10, 12].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados foram obtidos experimentalmente, através da medição do estado de deformação durante a furação de material sólido, e dos resultados obtidos numericamente com os mesmos parâmetros envolvidos na componente experimental.

Tabela 3. Propriedades materiais do modelo numérico.

Propriedades	Broca	Bloco cilíndrico
Massa volúmica [kg/m^3]	7850	800
Módulo de Young [MPa]	200000	987,1567
Coeficiente de Poisson	0,3	0,3
Tensão de cedência inicial [MPa]		22,59
Módulo tangente [MPa]		0,91
Parâmetro de endurecimento		0,1
Parâmetro do material (C)		2,5
Constante do material (P)		7
Critério de erosão, falha por deformação (ε_{lim}^{eff})		0,0504

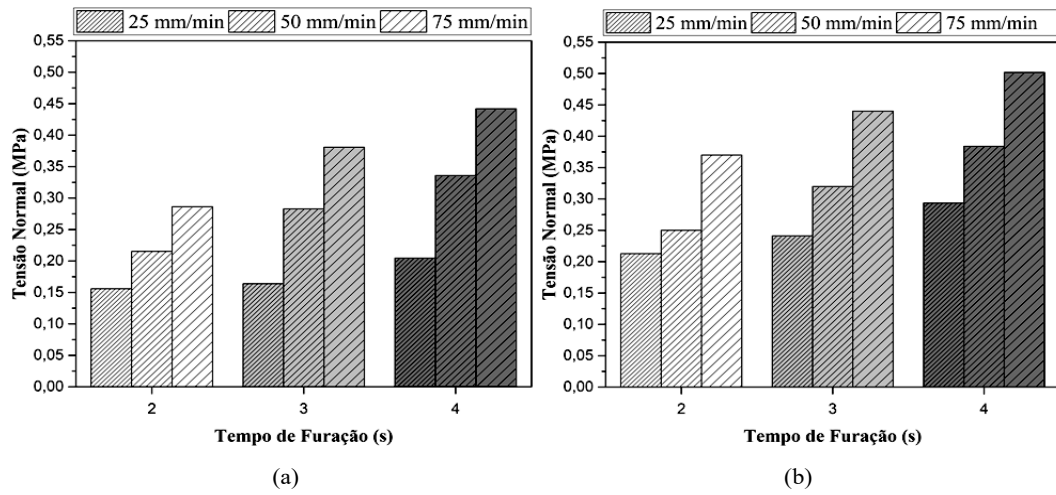


Fig. 5. Resultados experimentais (a) e numéricos (b) para diferentes tempos de furação.

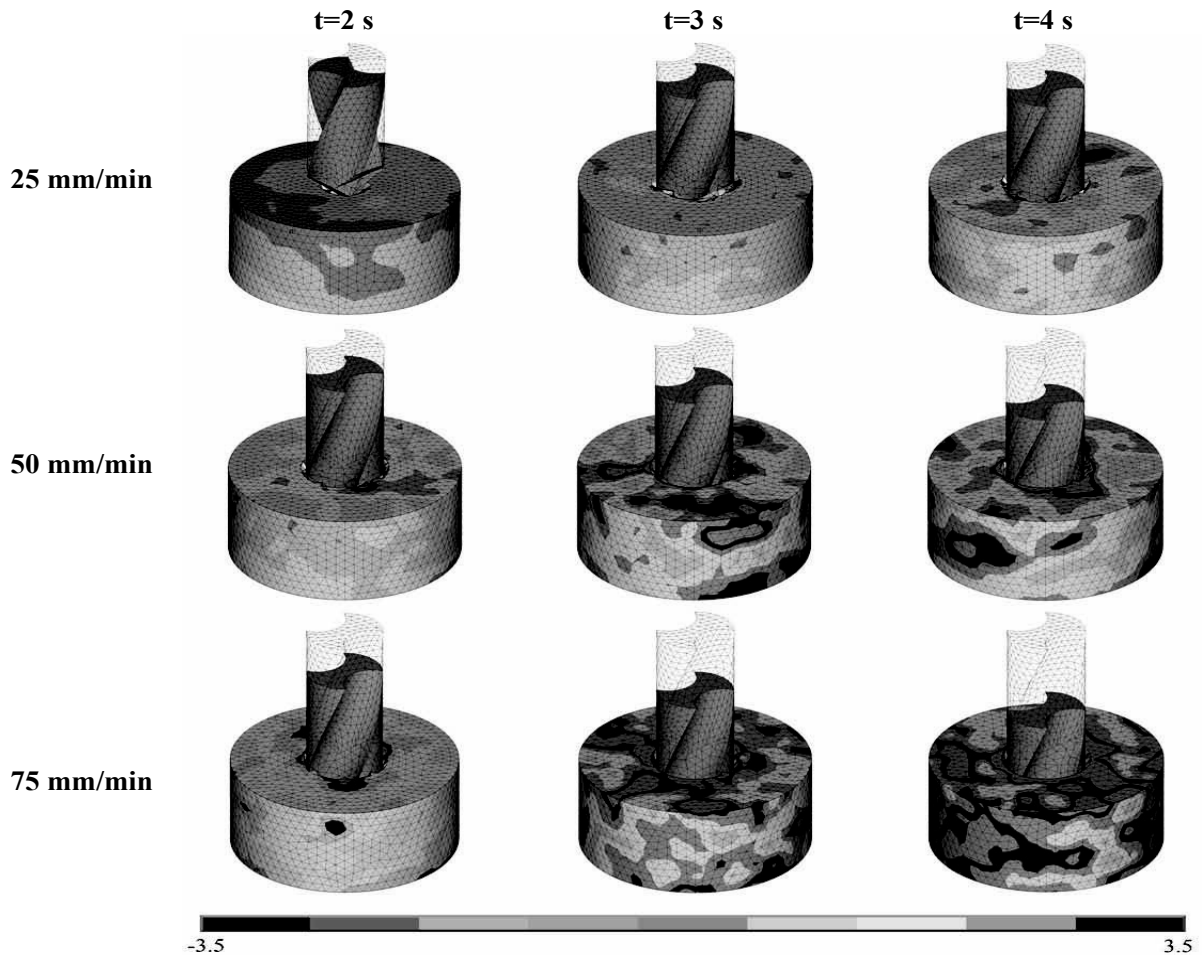


Fig. 6. Distribuição da tensão equivalente de von Mises.

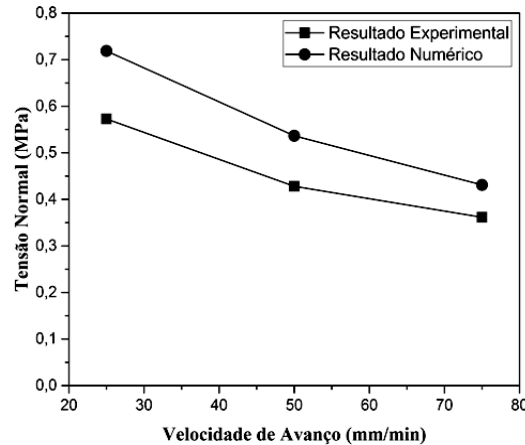


Fig. 7. Tensão normal para 5mm de furação.

4.1. Estado de tensão à superfície do bloco

A tensão normal média obtida experimentalmente é comparada com os resultados numéricos para diferentes instantes da furação (2, 3 e 4 s) e apresentada na Fig. 5.

Os resultados sugerem, que em processos de furação, a tensão normal média aumenta com o aumento da velocidade de avanço para o mesmo instante de furação. Esta tendência verifica-se em todas as situações e é mais evidente para as maiores velocidades de avanço. Para o mesmo instante de furação, velocidades de avanço superiores implicam maior profundidade de furação e consequentemente maiores níveis de tensão. As tensões numéricas são, de forma geral, superiores quando comparados com as tensões experimentais, no entanto existe boa concordância entre estes valores. A distribuição de tensões equivalentes no bloco cilíndrico, considerando os diferentes parâmetros e instantes de furação, está representada na Fig. 6.

A tensão aumenta com a penetração da broca no bloco, logo a tensão máxima é atingida quando o bloco é totalmente furado. A partir deste ponto ocorre diminuição da tensão. Desta forma, o estudo da tensão gerada no final do processo de furação revela-se especialmente importante. A variação da velocidade de avanço no processo de furação é apresentada na Fig. 7.

Analisando os resultados para a furação completa do bloco, observa-se uma diminuição da tensão normal com o aumento da velocidade de avanço. Nos instantes iniciais da furação, a tensão normal é superior para velocidades de avanço altas (75 mm/min), no entanto, quando considerada a furação total do bloco, verifica-se a diminuição da tensão normal com o aumento da velocidade de avanço. O aumento da tensão normal para baixa velocidade de avanço (25 mm/min) deve-se ao tempo de furação, que é substancialmente superior quando comparado com as restantes velocidades de avanço.

4.2. Temperatura na broca

A temperatura na broca foi registada, com recurso à termografia, imediatamente antes e após cada furação. Na tabela 4 são apresentados os resultados para os diferentes furos em função da velocidade de avanço.

Na tabela 4 verifica-se o efeito da velocidade de avanço na temperatura gerada na broca durante processos de furação. A temperatura média antes da furação é de $21,4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,47$. De forma a facilitar a análise e a compreensão do efeito dos parâmetros envolvidos, apresenta-se na Fig. 8 os valores máximos de temperatura para os vários furos em função da velocidade de avanço.

Para uma velocidade de rotação constante (600 rpm), o aumento na velocidade de avanço provoca diminuição de temperatura gerada na broca. Este efeito deve-se ao tempo de contacto entre o bloco e a broca. No entanto, o registo termográfico na superfície do material sólido da espuma de poliuretano rígida e no local da medição das deformações não evidencia variação em relação à temperatura ambiente.

Tabela 4. Temperatura na broca, °C.

25 mm/min		50 mm/min		75 mm/min	
Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
21,3	114,4	21,0	70,8	21,2	78,2
22,2	102,7	21,0	97,7	21,1	77,1
22,2	114,2	21,3	81,1	21,0	66,7
21,9	106,4	21,4	92,0	21,0	71,1
21,7	110,9	21,3	84,3	21,0	62,4
22,4	112,6	21,3	89,4	20,9	66,9

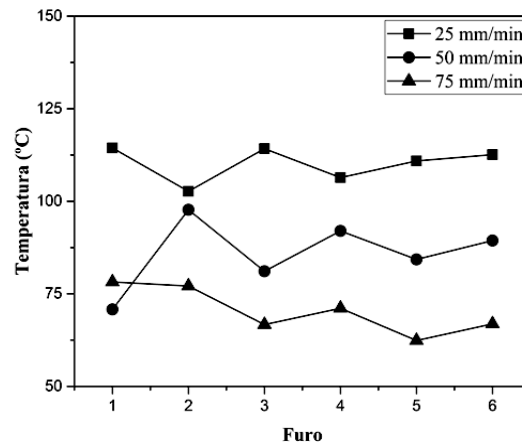


Fig. 8. Temperaturas máximas na broca, °C.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo foram investigados, recorrendo a metodologias experimentais e numéricas, os efeitos da velocidade de avanço na análise do campo de tensões de origem mecânica em materiais sólidos de espumas de poliuretano rígida sob processos de furação. Para simular o processo de furação, foi criado um modelo numérico dinâmico 3D recorrendo ao método de elementos finitos com erosão dos elementos. O modelo numérico inclui todos os parâmetros dinâmicos envolvidos na metodologia experimental.

A modelação numérica de processos de furação permite a avaliação dos diferentes parâmetros envolvidos e a previsão dos esforços gerados no material sem a utilização de tecidos biológicos. De uma forma geral, neste trabalho obteve-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos.

Os resultados mostram que a velocidade de avanço tem impacto significativo no campo de tensões gerado no material e na temperatura da ferramenta, devendo ser cuidadosamente controlada em processos de furação óssea. Para uma velocidade de rotação constante, o aumento na velocidade de avanço provoca diminuição do campo de tensões gerado na superfície do material sólido. O efeito da velocidade de avanço na temperatura gerada na ferramenta de corte é semelhante, correspondendo o aumento da temperatura à diminuição da velocidade de avanço.

REFERÊNCIAS

- [1] Fernandes, M.G.A., Fonseca, E.M.M., Barbosa, M.P., Natal, R.M., “Análise biomecânica das fraturas diafisárias do fêmur (Tipo B) utilizando uma haste intramedular”, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, **19**(1), 41-48 (2015)

- [2] Sampaio, C.S.T., Fonseca, E.M.M., Cerqueira, R., Ferreira, N., “Avaliação térmica provocada pela furação no tecido ósseo”, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, **20**(1) 49-59 (2016)
- [3] Khurshid, A., Riaz, M., Vadim, S., “In-vitro experimental and numerical analysis of forces in plane cutting of cortical bone”, *Applied Mechanics and Materials, Mechanical and Electrical Technology VII*, 799-800, 509-514 (2015)
- [4] Augustin, G., Zigman, T., Davila, S. et al., “Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis”, *Journal of Clinical Biomechanics*, **27**(4), 313-325 (2012)
- [5] Lee, J., Gozen, B.A., Ozdoganlar, Y.R.B., “Modeling and experimentation of bone drilling forces”, *Journal of Biomechanics*, **4**, 1074-1086 (2012)
- [6] Eriksson, R.A., Albrektsson, T., “The effect of heat on bone regeneration: an experimental study in the rabbit using the growth bone chamber”, *Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*, **42**, 705-711 (1984)
- [7] Lundskog, J., “Heat and bone tissue: an experimental investigation of the thermal properties of bone and threshold levels injury”, *Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery*, **9**, 1-80 (1972)
- [8] O’Brien, F.J., Taylor, D., Lee, T.C., “The effects of bone microstructure on the initiation and growth of microcracks”, *Journal of Orthopaedic Research*, **23**(2), 475-480 (2005)
- [9] Soriano, J., Garay, A., Aristimuño, P. et al., “Effects of rotational speed, feed rate and tool type on temperatures and cutting forces when drilling cortical bone”, *Mach Sci Technol: An Int J*, **17**, 611-636 (2013)
- [10] Fernandes, M.G., Natal, R., Fonseca, E.M.M., Analysis of stresses in drilled composite materials. In: IEEE 4th Portuguese meeting in bioengineering (ENBENG), Porto, Portugal. pp. 1-4 (2015)
- [11] Basiaga, M., Paszenda, Z., Szewczenko, J., Kaczmarek, M., “Numerical and experimental analyses of drills used in osteosynthesis”, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, **13**(4) (2011)
- [12] Fernandes, M.G., Natal, R., Fonseca, E.M.M., “Three-dimensional dynamic finite element and experimental models for drilling processes”, *Journal of Materials: Design and Applications*, 1-9 (2015)
- [13] Sawbones- Worldwide Leaders in Orthopaedic and Medical Models. www.sawbones.com. Accessed 01 July 2016.
- [14] Luccioni, B., Aráoz, G., “Erosion criteria for frictional materials under blast load. Asociación Argentina de Mecánica Computacional”, *Mecánica Computacional Vol XXX*, 1809-1831 (2011)

STRESS ANALYSIS IN SOLID RIGID POLYURETHANE FOAMS DUE DRILLING PROCESSES

Abstract – In different fields of medicine there are surgical procedures that involve the drilling of bone tissue, depending on its success of the several parameters combination. The calculation and control of the involved parameters are critical to reducing the bone tissue damage. This research aims to evaluate the level of stress generated during the drilling process, using solid rigid polyurethane foams with similar mechanical properties to the human bone. During drilling of solid materials are used experimental methods, based on strain gauges and thermography, for strain analysis in the solid material and temperature calculation on the drill bit. The involved parameters in drilling are the rotational speed and the drill bit geometry always constants in different tests, with a variable feed-rate. In simultaneous, a numerical explicit dynamics model, using the finite element method, was developed through LS-DYNA program. The results allow to obtain the stress field in solid materials, function of different drilling parameters. To the same rotational speed and the drill bit geometry, the decreasing in the feed-rate, carry out the increasing in the level of stresses. Due the mechanical resistance of the rigid polyurethane foam, for the instrumented measured zone, there is no mechanical tissue damage. The damage is caused in the hole due the perforation by the material removing.

Keywords – Drilling, Stress, Thermography, Finite Elements.