





cnme

10º Congresso Nacional
de Mecânica Experimental

2016

Lisboa • LNEC • 12 a 14 de outubro de 2016

LNEC

LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

FUNDIC

Fundo para o Desenvolvimento
das Ciências da Construção

APAET

Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões



[Comissões](#)

[Conferências Plenárias](#)

[Comunicações](#)

[Programa](#)

[Patrocínios](#)

[Ficha Técnica](#)

Este ciclo de conferências teve início em 1986, com a realização do 1º Encontro Nacional de Análise Experimental de Tensões no LNEC, tendo-se seguido mais 8 encontros nacionais e 2 internacionais (10th e 15th International Conference on Experimental Mechanics) realizados em Portugal.

Este evento comemora os 30 anos deste ciclo de conferências sempre sob a égide da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET). Nesta edição do CNME2016 foram abordados os seguintes temas:

- Análise experimental e numérica em infraestruturas de transportes
- Desafios e Oportunidades na Experimentação em Hidráulica e Ambiente
- Experimentação em Termofluidos
- Métodos Experimentais em Dinâmica de Estruturas e Engenharia Sísmica
- Acústica e Vibrações
- Biomecânica e Biomateriais
- Caracterização de Materiais
- Comportamento de Estruturas
- Dinâmica de Estruturas
- Geotécnica e Geologia
- Mecânica de Fluidos
- Métodos Computacionais e Simulação Numérica
- Monitorização Estrutural
- Nanotecnologia
- Tribologia

Neste suporte digital estão incluídos os artigos que, após terem sido sujeitos a um processo de revisão, foram aprovados pela Comissão Científica para apresentação no CNME2016.

Uma palavra final de agradecimento a todos os que permitiram a realização do congresso, com votos de um seminário proveitoso para a comunidade técnica e científica.

Editores

Carlos Pina, Jorge Gomes, Iara Pereira, Jorge Patrício, Mariana Carvalho, Paulo Morais, Simona Fontul, Teresa Gonçalves e Teresa Reis

[Comissões](#)[Conferências Plenárias](#)[Comunicações](#)[Programa](#)[Patrocínios](#)[Ficha Técnica](#)

Comissão Organizadora

- Carlos Pina, Chairman
- Jorge Gomes, Co-Chairman
- Iara Pereira
- Jorge Patrício
- Mariana Carvalho
- Paulo Morais
- Simona Fontul
- Teresa Gonçalves
- Teresa Reis

Comissão Científica

- A. Torres Marques (FEUP)
- Abílio de Jesus (FEUP)
- Aldina Santiago (FCTUC)
- Alexandre Costa (ISEP)
- Alfredo Campos Costa (LNEC)
- Álvaro Cunha (FEUP)
- Álvaro Ribeiro (LNEC)
- António Arêde (FEUP)
- António Batista (LNEC)
- António Bettencourt (LNEC)
- António Gomes Correia (UM)
- Carlos Chastre Rodrigues (UNL)

- Cristina Costa (IPTomar)
- Cristina Oliveira (IPSetúbal)
- Daniel Cardoso Vaz (UNL)
- Eduardo Fortunato (LNEC)
- Elsa Caetano (FEUP)
- Elsa Pereira (LNEC)
- Elza Fonseca (IPB)
- Francisco Taveira Pinto (FEUP)
- Graça Vasconcelos (UM)
- Humberto Varum (FEUP)
- J.C. Reis Campos (FMDUP)
- João Estêvão (UALg)
- João G. Ferreira (IST)
- João Lanzinha (UBI)
- João Palma (LNEC)
- João Viegas (LNEC)
- Joaquim Barros (UM)
- Joaquim Infante Barbosa (ISEL)
- Joaquim Silva Gomes (FEUP)
- Jorge de Brito (IST)
- Jorge Saldanha Matos (IST)
- José Falcão de Melo (LNEC)
- José M. Cirne (FCTUC)
- José Muralha (LNEC)
- Julieta António (FCTUC)

- Júlio Montalvão (IST)
- Laura Caldeira (LNEC)
- Luís Simões da Silva (FCTUC)
- Maria Rosário Veiga (LNEC)
- Mário Santos (LNEG)
- Mário Vaz (FEUP)
- Marques da Silva (LNEC)
- Miguel Matos Neves (IST)
- Nuno Nunes (IPSetúbal)
- Óscar Ferreira (UALg)
- Paulo Bártolo (IPL)
- Paulo Fernandes (IST)
- Paulo Flores (UM)
- Paulo Lourenço (UM)
- Paulo Mendes (ISEL)
- Paulo Piloto (IPB)
- Paulo Tavares de Castro (FEUP)
- Paulo Vila Real (UA)
- Pedro Delgado (IPVianaCastelo)
- Rogério Mota (LNEC)
- Rui Calçada (FEUP)
- Rui Viegas (LNEC)
- Teresa Freitas (IST)
- Victor Neto (UA)

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS NA FURAÇÃO DO TECIDO ÓSSEO COM RECURSO AO MÉTODO DE TAGUCHI

DETERMINATION OF DRILLING OPTIMAL PARAMETERS TO DRILL BONE TISSUE USING THE TAGUCHI METHOD

AC Lopes

Mestrado em Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança

JE Ribeiro

Departamento de Tecnologia Mecânica, LAETA, INEGI, Instituto Politécnico de Bragança

MG Fernandes

INEGI, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

EMM Fonseca

Departamento de Mecânica Aplicada, LAETA, INEGI, UMNMEE, Instituto Politécnico de Bragança



RESUMO

Ao longo do processo de furação, muitas vezes utilizado para a fixação de implantes, é gerado um aumento de temperatura. Se o aumento da temperatura for acima dos 47° pode ocorrer a necrose do tecido ósseo com a consequente diminuição da eficiência do sistema de fixação. No presente estudo foram utilizados fêmures de bovino *ex-vivo* com o objetivo de estudar o efeito da velocidade de rotação e diâmetro da broca no aumento de temperaturas durante o processo de furação. Os parâmetros definidos para a realização dos ensaios foram baseados no método de Taguchi, para encontrar a combinação ótima desses parâmetros. Foi utilizada uma matriz ortogonal L9 e analisada a relação sinal/ruído, bem como a proporção de Pareto para obter o efeito e a interação de cada parâmetro no processo.

Palavras-chave: Taguchi / Furação / Temperaturas / Osso

ABSTRACT

During the drilling process often used for implant fixation, it is generated an increasing temperature. If the temperature rises too high (above 47°) can occur bone necrosis with consequent decrease of efficiency in the anchoring system. In this study, it was used *ex-vivo* bovine femurs for the purpose of studying the effect of drill speed and drill bit diameter in the temperature increasing during the process. The parameters achieved for the experimental tests were obtained based on the Taguchi method, which is applied to find the optimal combination of these parameters. It was used an orthogonal matrix L9 and analysed the S/N ratio and the Pareto proportion, to obtain the effect and the interaction of each parameter in the process.

Key Words: Taguchi / Drilling process / Temperature / Bone

1. INTRODUÇÃO

A furação é um processo por arranque de apara, ou seja, remove todo o material dentro do furo sob a forma de apara helicoidal com o auxílio de uma broca (Davim, 2008). Este processo é realizado através de um movimento principal, ou de corte, que representa a rotação da broca, medido em rpm (rotações por minuto) e dois movimentos auxiliares: o movimento de avanço, que reproduz o deslocamento da broca em linha reta contra a peça fixa em mm/min e a penetração axial da broca na peça, em mm/min (Davim, 2008).

Em geral, nos processos de maquinagem é necessário definir os parâmetros ótimos para maximizar a vida útil da ferramenta, minimizar a rugosidade da superfície e garantir a precisão do diâmetro do orifício (Ghani, Choudhury, & Hassan, 2004; Kurt, Bagci, & Kaynak, 2009). Contudo, no caso particular da furação de tecidos biológicos, como como por exemplo o osso, é essencial garantir que a temperatura gerada durante o processo de maquinagem seja inferior à temperatura que provoca a necrose dos tecidos (Augustin *et al.*, 2008). No presente estudo o objetivo é minimizar a temperatura obtida no osso e, como existem vários parâmetros que influenciam a geração de calor durante o processo de furação, foi necessário recorrer a técnica de otimização que permita definir os valores adequados para alcançar esse objetivo, bem como, encontrar o parâmetro mais influente para o controlo da temperatura. Nas últimas décadas foram implementadas várias técnicas de otimização, tais como: a Lógica de Fuzzy (*Fuzzy Logic*), introduzida em 1920 por um filósofo e lógico polaco; Jan Luassiewick, que visa modelar a ordem aproximada do raciocínio humano, tentando imitar a capacidade humana de tomar decisões racionais em

ambientes de incerteza e imprecisão (Aggarwal & Singh, 2005); o Algoritmo Genético baseado em mecanismos de seleção e genética natural, um método robusto e confiável para localizar um ótimo global (Aggarwal & Singh, 2005); a técnica *Scatter Search* considera cada meta separadamente e procura um conjunto de soluções eficientes em vez de uma solução ideal única, decorre de estratégias para a combinação de regras, decisões e restrições substitutas (Aggarwal & Singh, 2005); a metodologia da Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology*) que é dividida em três métodos diferentes: efetuar inferências a partir de observações, recolha de dados e técnicas de planeamento de experiências para uma interpretação adequada de resultados substitutos (Aggarwal & Singh, 2005).

O método de Taguchi é uma técnica de otimização utilizada em diferentes áreas, embora tenha sido desenvolvido para aplicações de engenharia da qualidade (Ross, 1996). No entanto, no meio académico e nos campos de investigação o método de Taguchi é muito popular no planeamento de trabalhos experimentais (Roy, 2001) e existem publicações científicas em abundância que vão desde os processos de fabrico (Nalbant, Gokkaya, & Sur, 2007; Pal, 2009) às aplicações médicas (Taner & Antony, 2000), como na medicina dentária (Pandey & Panda, 2015). A fixação de implantes é hoje comum na medicina, especialmente na medicina dentária, e exige uma operação de furação prévia do osso. Um dos principais problemas na furação do osso é o aumento da temperatura causado pela fricção entre a superfície de corte da broca em contacto com os fragmentos de osso formados durante a perfuração (Abagge, 1998). Para evitar a necrose óssea durante a furação, esta temperatura deve ser inferior a 47°C (Eriksson RA, 1983).

2. MÉTODO DE TAGUCHI

O método de Taguchi é uma ferramenta poderosa no projeto de sistemas de alta qualidade. A fim de otimizar os projetos, qualidade e custo, o método de Taguchi fornece uma abordagem simples, eficiente e sistemática (Yang & Tang, 1998). Este método é classificado como um método de qualidade *off-line*, ou seja, fora da linha de produção, e pode ser aplicado logo na fase de conceção do produto (Roy, 2001). É um método de planeamento de experiências, em que apenas uma fração do número total de combinações das variáveis de entrada é contabilizado, a fim de otimizar o tempo e os recursos utilizados nos testes (Wu & Wu, 2000). Taguchi não definiu uma estratégia fixa de aplicação do método, apenas deu os vários passos necessários a seguir de acordo com uma determinada ordem. Uma possível ordem que satisfaz o método é a apresentada na Fig. 1. Inicialmente, foi necessário determinar qual o objetivo de estudo, bem como a resposta a ser otimizada. Em seguida, foi

necessário decidir qual a característica de qualidade que melhor se adapta tanto à resposta selecionada como ao estudo a concretizar. Existem três tipos de características de qualidade: quanto maior melhor (*the-higher-the-better*), quanto menor melhor (*the-lower-the-better*) e nominal o melhor (*the-nominal-the-better*). A etapa seguinte consiste em identificar os fatores de ruído (fatores impossíveis de controlar) que possam ter no sistema um impacto negativo no rendimento ou na qualidade. Existem três tipos de ruído: o ruído externo, refere-se a fatores ambientais como a temperatura ou a humidade, que podem prejudicar as funções do produto; o ruído interno entende-se como as alterações que ocorrem na deterioração do produto durante o armazenamento, pode ser causado por fricção ou por desgaste; e o ruído unidade a unidade que se refere às diferenças entre produtos devido a imperfeições no processo de fabrico (Wu & Wu, 2000).

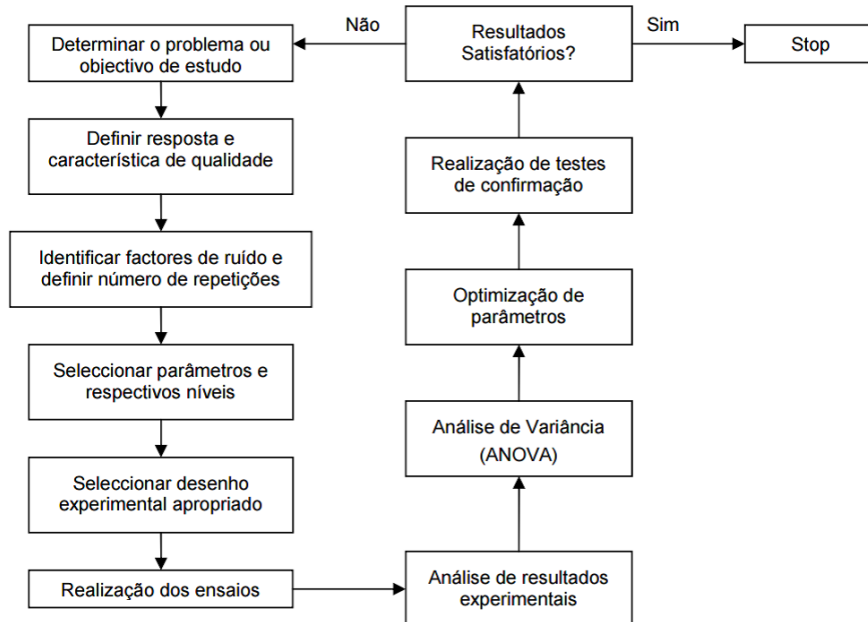


Fig. 1 – Metodologia de Taguchi (Moita, 2007)

Depois da identificação dos fatores de ruído, é importante identificar os parâmetros de funcionamento com um efeito significativo sobre a resposta. Os parâmetros de controlo são aqueles que serão alterados e controlados. É necessário definir níveis para cada um destes parâmetros, níveis esses que irão definir o número de ensaios a realizar (Moita, 2007).

O próximo passo é a seleção da matriz ortogonal de experiências e a definição do processo de análise de dados. Esta matriz deve satisfazer o número de graus de liberdade suficiente para todos os parâmetros em estudo e os seus níveis. É possível escolher uma matriz já fornecida por Taguchi que satisfaça as necessidades do problema (Moita, 2007).

Neste ponto do desenvolvimento do método efetuam-se os ensaios determinados pela matriz ortogonal e é feito o registo dos resultados. Se possível, as condições de ensaio devem ser feitas aleatoriamente de forma a evitar a influência das condições da configuração da montagem experimental. Havendo repetições de experiências é necessário escolher uma das seguintes opções: replicação ou repetição (Moita, 2007).

Após a realização dos ensaios, pode determinar-se a regulação paramétrica ótima. O método de Taguchi utiliza uma medida estatística, chamada quociente ou razão de sinal ruído (S/N), para analisar os resultados. Este quociente só é utilizado quando existem repetições no planeamento de ensaios, o que permite encontrar os parâmetros de controlo que maximizam, minimizam ou centram os resultados num valor alvo que depende da característica de qualidade escolhida, assim como escolher a configuração perante a qual variações de parâmetros de ruído apresentem melhores resultados. Quanto maior for o sinal de ruído, melhor o resultado (Wu & Wu, 2000).

O passo seguinte consiste na aplicação da análise de variância, que permite conhecer qual o peso de cada um dos parâmetros de entrada na variação dos parâmetros de saída. Após encontrada a configuração paramétrica ideal e a previsão da resposta a essa configuração, é necessário efetuar um ensaio de confirmação (Montgomery, 1997).

Finalmente, se os resultados forem satisfatórios dá-se por terminada a análise com o método de Taguchi. Caso contrário, é necessário voltar ao primeiro passo da metodologia.

Em geral, o método de Taguchi ganhou muita popularidade na engenharia e na comunidade científica devido à sua fácil implementação por utilizadores com pouco conhecimento estatístico (Montgomery, 1997).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais e equipamentos

Para medir a variação de temperatura durante o processo de furação foram utilizadas 4 amostras de fémur *ex-vivo* de bovino. Foi escolhido o osso de bovino por ter características próximas do osso humano (Vashishth & Tanner, 2000). As amostras foram cedidas pelo Hospital Veterinário da Universidade de Trás-os-Montes. Para efetuar os ensaios utilizaram-se apenas as diáfises dos ossos de fémur *ex-vivo*. O canal medular e o perióstio de cada amostra foram removidos, de modo a obter apenas a parte cortical de cada osso como se representa na Fig.2 (a). De forma a reter as propriedades mecânicas, térmicas e físicas do osso, as amostras foram preparadas de acordo com as diretrizes estabelecidas por Yuehuei e Robert (Yuehuei & Robert, 2000). Todas as amostras foram mantidas hidratadas em soro

fisiológico com compressas de gaze e armazenadas em sacos de plástico a -4°C até à data de realização dos ensaios.

As amostras de osso têm entre 120 e 150 mm de comprimento e entre 5 e 10 mm de espessura da parede cortical ao longo de toda a sua extensão.

Os furos foram feitos no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Instituto Politécnico de Bragança recorrendo a uma máquina CNC (*Computer Numerical Control*) Deckel Maho, modelo DMC 63V. As temperaturas obtidas ao longo do processo de furação foram medidas através de um sistema de aquisição de dados de 4 canais (Fig.2 (c)), modelo Extech SDL200 (“Extech SDL200: 4-Channel Datalogging Thermometer,” n.d.) e posterior registo num computador através do programa Excel e Minitab 17 para o tratamento dos dados.

3.2. Plano de experiências

O objetivo deste estudo foi determinar qual a melhor combinação de parâmetros de furação que resulta na menor temperatura atingida durante o processo de furação óssea. Para isso, foram identificados dois parâmetros de furação possíveis de controlar neste estudo: a velocidade de rotação e o diâmetro da broca a utilizar, enquanto que a velocidade de avanço se manteve constante para todos os ensaios experimentais com um valor de 18 mm/min. A cada um destes parâmetros foram atribuídos três níveis, apresentados na Tabela 1. Para definir quais os ensaios a realizar foi escolhido o método de Taguchi que fornece matrizes ortogonais para o planeamento de ensaios. Considerando o número de parâmetros e de níveis selecionados, a matriz L9, representada na Tabela 2, é a mais adequada para o caso em estudo. A L9 é uma matriz que considera a interação entre as duas primeiras colunas sem sacrificar qualquer outra coluna. As interações entre as restantes colunas de três níveis são distribuídas quase uniformemente por todas as outras colunas de três níveis, o que permite estudar quais os principais efeitos. Isto faz da matriz ortogonal L9 uma matriz altamente recomendada para planear experiências com uma combinação de 2 parâmetros e 3 níveis (Taguchi & Konishi, 1987).

Tabela 1 – Parâmetros de furação e respetivos níveis utilizados nos ensaios experimentais

Símbolo	Parâmetros de furação	Nível 1	Nível 2	Nível 3
A	Velocidade de rotação [rpm]	520	900	1370
B	Diâmetro da broca [mm]	4	5	6

Para este trabalho foram utilizadas as colunas 1 e 2 da matriz L9 para os três níveis dos parâmetros de entrada, e as colunas 3 e 4 para calcular as interações entre estes. A Tabela 3 foi adaptada ao problema e apresenta as duas primeiras colunas da matriz L9, onde os

índices 1, 2 e 3 foram substituídos pelos respectivos valores dados aos parâmetros de furação para uma melhor compreensão.

Tabela 2 – Matriz ortogonal de Taguchi L9 (Taguchi & Konishi, 1987)

Nº do ensaio	Nº / nome da coluna			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tabela 3 – Matriz ortogonal de Taguchi L9 adaptada ao problema

Nº do ensaio	Nº / nome da coluna	
	1	2
1	520	4
2	520	5
3	520	6
4	900	4
5	900	5
6	900	6
7	1370	4
8	1370	5
9	1370	6

3.3. Ensaios experimentais

Os ensaios experimentais de furação foram realizados num centro de maquinagem CNC de acordo com a matriz L9 definida pela tabela 3. Cada um dos nove ensaios foi repetido três vezes, o que dá um total de 27 furos.

As amostras de osso foram presas pela prensa de apertos e o processo de furação foi executado com os três diâmetros de broca e as três velocidades de furação, combinadas de acordo com matriz de ensaios referida anteriormente. Na figura 2 (b) pode observar-se o pormenor da furação do osso. Para a furação foi realizado um programa CNC em que se definiu a posição do furo, garantindo uma distância mínima entre furos de 20 mm, a

velocidade de rotação e posição da ferramenta no armazém correspondente a um diâmetro de broca específico para cada ensaio. A velocidade de avanço manteve-se constante.

A medição da temperatura em cada foi realizada utilizando um termopar tipo k colocado próximo do furo. As temperaturas medidas durante a furação foram enviadas para um sistema de aquisição de dados.

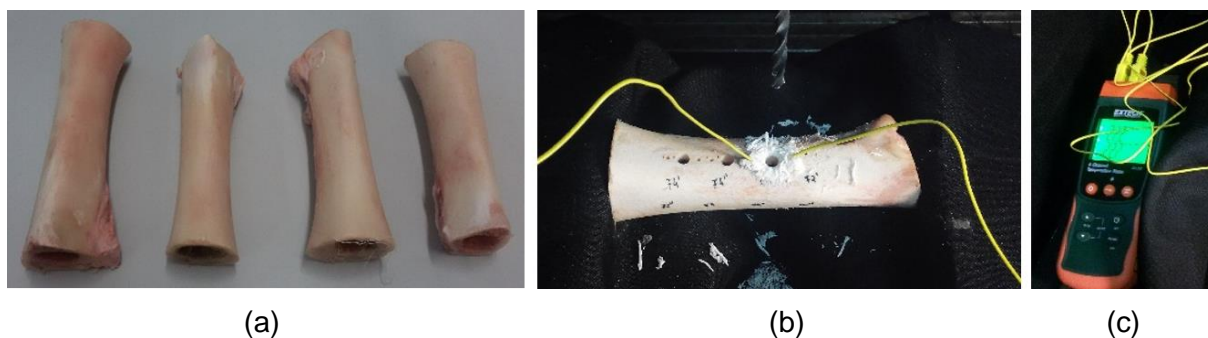


Fig. 2 – Materiais: a) fêmures de bovino preparados; b) amostra nº1, furo nº3; c) Data logger

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tal como referido anteriormente, cada ensaio foi repetido três vezes e, como tal, foi medida a temperatura para cada furo. Na Tabela 4 está indicada a temperatura para cada um dos furos, bem como, a média das temperaturas para combinação dos diferentes parâmetros e níveis.

Tabela 4 – Resultados experimentais

Nº do ensaio	Velocidade de rotação [rpm]	Diâmetro da broca [mm]	Furo 1 [°C]	Furo 2 [°C]	Furo 3 [°C]	Temp. média [°C]
1	520	4	23.80	25.50	24.60	24.63
2	520	5	28.10	27.85	27.55	27.83
3	520	6	26.25	25.90	27.15	26.43
4	900	4	26.20	24.65	28.40	26.42
5	900	5	32.65	31.15	32.65	32.15
6	900	6	30.10	29.25	30.80	30.05
7	1370	4	31.60	30.65	27.20	29.82
8	1370	5	32.30	30.55	33.35	32.07
9	1370	6	32.30	33.15	34.45	33.30

Da análise da Tabela 4 pode verificar-se que a combinação que originou a temperatura mais baixa foi a de menor velocidade de rotação (520 rpm) com a broca de menor diâmetro (4 mm), tendo sido medida uma temperatura média de 24.6°C. Por outro lado, a temperatura

média mais elevada ocorreu para as condições opostas, isto é, velocidade de rotação mais elevada (1370 rpm) associada ao diâmetro da broca mais elevada (6 mm).

4.1. Razão S/N

Uma vez que se pretende minimizar a temperatura no osso durante o processo de furação, a razão sinal-ruído (*signal-to-noise*) que interessa para este caso é a referida “quanto menor melhor” (*the-lower-the-better*), determinada pela Equação 1.

$$S/N_s = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (1)$$

onde, y_i representa os dados observados e n o número de repetições efetuadas.

Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5, onde na coluna identificada por S/N' estão presentes os valores de S/N somados a uma constante igual 35, a razão para essa alteração tem a ver a penas para facilitar a compreensão e interpretação dos resultados. A partir deste ponto, as tabelas serão apresentadas com os valores de S/N'.

Tabela 5 – Relação S/N

Nº do ensaio	Velocidade de rotação [rpm]	Diâmetro da broca [mm]	S/N [dB]	S/N' [dB]
1	520	4	-27.83	7.17
2	520	5	-28.89	6.11
3	520	6	-28.44	6.56
4	900	4	-28.45	6.55
5	900	5	-30.15	4.85
6	900	6	-29.56	5.44
7	1370	4	-29.51	5.49
8	1370	5	-30.13	4.87
9	1370	6	-30.45	4.55

Foi calculado o valor médio da relação S/N para cada nível de parâmetros, que pode observar-se na Tabela 6, bem como a diferença entre o valor máximo e o mínimo. O gráfico dos valores médios para esta relação pode ser observado na Fig. 3.

Os valores mais elevados de S/N identificam as configurações dos parâmetros de entrada que minimizam os efeitos de ruído, ou seja, os valores mais elevados da relação S/N são relativos aos valores mais baixos de temperatura.

Através da Fig. 3 é possível concluir que a melhor combinação de parâmetros para minimizar a temperatura no osso ao longo do processo de furação é A1B1. Não foi necessário efetuar o furo de verificação, uma vez que A1B1 é a combinação do ensaio nº1,

verificando-se na Tabela 4 que é o ensaio que apresenta as temperaturas mais baixas e, por consequência, o valor de S/N mais elevado.

Tabela 6 – Média da razão S/N'

Símbolo	Parâmetros de entrada	Média razão S/N [dB]			Máx-mín
		Nível 1	Nível 2	Nível 3	
A	Velocidade de rotação [rpm]	6,61	5,61	4,97	1,00
B	Diâmetro da broca [mm]	6,40	5,28	5,51	0,24

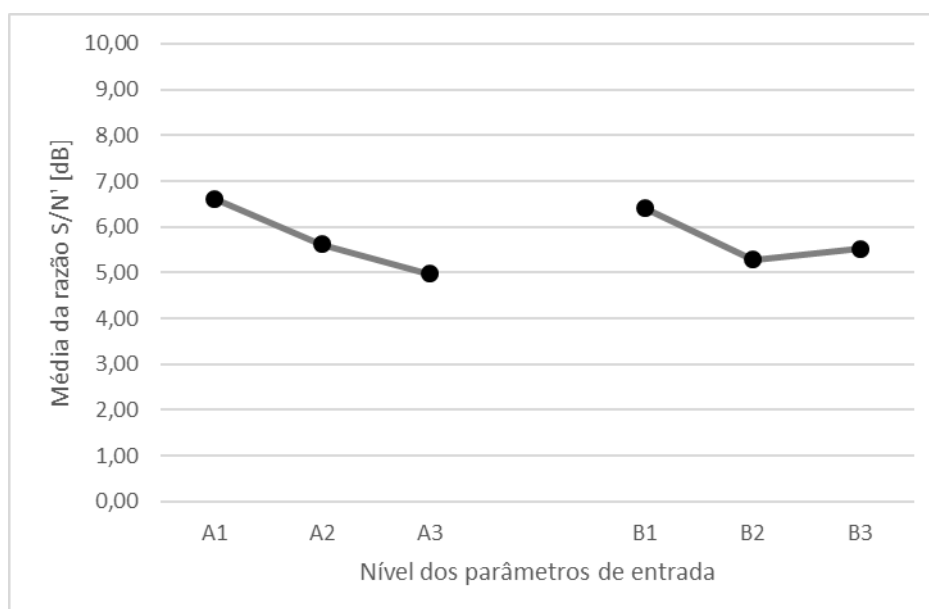


Fig. 3 – Gráfico da relação S/N' “low-is-the-better”

4.2. Análise de Pareto

A análise de Pareto é um método simplificado que permite identificar os parâmetros mais influentes na variação dos parâmetros de saída. Este método é uma análise realizada para diminuir o número de parâmetros a serem utilizados no estudo da influência, e permite uma fácil visualização e identificação das causas ou problemas mais importantes (Moita, 2007).

Na Tabela 7 pode observar-se a ANOVA de Pareto, onde foi calculada a soma dos quadrados de cada fator e de cada interação. A técnica da ANOVA de Pareto requer menos conhecimento sobre a ANOVA e é um método adequado para ser utilizado por engenheiros e outros profissionais industriais (Ghani *et al.*, 2004). Para uma melhor percepção dos dados

da Tabela 7 é possível desenhar um diagrama, Fig. 4, onde é fácil concluir que o fator mais importante no aumento da temperatura, durante o processo de furação óssea, é a velocidade de rotação (62%) seguido do diâmetro da broca, com uma influência de 32%. As colunas representadas por AB e AB² correspondem às interações entre a velocidade de rotação (A) e diâmetro da broca (B). De acordo com o método de Taguchi, nas matrizes com três níveis é necessário definir duas colunas para cada interação e a razão para essa necessidade prende-se com o número de graus de liberdade, isto é, cada coluna tem dois graus de liberdade, contudo, a interação entre dois parâmetros com três níveis corresponde a quatro graus de liberdade. Como tal, são necessárias duas colunas para totalizar os quatro graus de liberdade da interação. No caso da matriz L9 utilizada neste trabalho, a primeira e a segunda coluna correspondem aos parâmetros A e B, respetivamente, e a terceira e quarta coluna correspondem às colunas necessárias para avaliar a interação entre A e B, que, por simplificação da notação, definiu-se como AB e AB², correspondendo às colunas 3 e 4, respetivamente. De acordo com a tabela 7 e Fig. 4, verifica-se que interação entre A e B tem uma influência muito baixa na variação da temperatura ocorrida durante a furação.

Tabela 7 – ANOVA de Pareto para três níveis

Fatores e interações		A	B	AB ²	AB	Total
	1	19.83	19.21	16.57	17.48	
Soma para cada nível de fator e interação	2	16.84	15.84	17.04	17.20	51.59
	3	14.91	16.54	17.98	16.90	
Soma dos quadrados (S)		36.80	18.96	3.08	0.50	59.33
Contribuição (%)		62.02	31.95	5.19	0.84	100.00
Acumulado (%)		62.02	93.97	99.16	100.00	

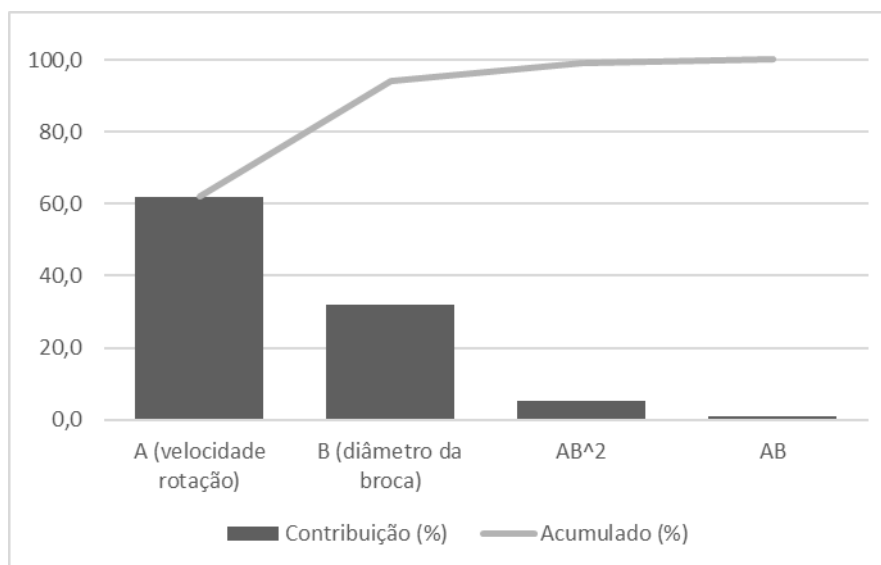


Fig. 4 – Diagrama de Pareto

De acordo com Ghani *et al.* (Ghani *et al.*, 2004) os fatores e interações significativas, representados no diagrama de Pareto, devem contribuir acumulativamente cerca de 90%. Nesse sentido, os fatores significativos para a variação da temperatura gerada pela furação são a velocidade de rotação e diâmetro da broca.

5. CONCLUSÕES

O método de Taguchi provou que pode ser utilizado como método de otimização para determinar a melhor combinação de parâmetros de furação, de forma a minimizar a temperatura durante o processo de furação de um osso. Após os ensaios, as temperaturas mais baixas foram obtidas nas três repetições do ensaio nº1 e foram, respectivamente, 23.8, 25.5 e 24.6 °C (Tabela 4). Calculando a razão S/N (Tabela 5) verificou-se que esta foi máxima para o ensaio nº1 ($S/N=7.17$ dB), ou seja, verifica que realmente este possui a combinação ótima dos dois parâmetros de entrada controláveis, A1B1. Assim, é possível concluir que, de entre os parâmetros em estudo, a velocidade de rotação de 520 rpm e a broca de 4 mm de diâmetro garantem a temperatura mínima ao longo do processo de furação óssea. Através do diagrama de Pareto conclui-se que o fator que mais influencia o aumento de temperatura é a velocidade de rotação, com uma contribuição de 62%, e o que menos influência tem é a interação de A com B, com uma contribuição de apenas 6.0%. Do diagrama de Pareto é, também, possível concluir que os fatores significativos para a

variação da temperatura de furação são a velocidade de rotação e o diâmetro da broca que, em conjunto, contribuem 94%.

6. REFERÊNCIAS

- Abagge, M. (1998). *Necrose Térmica do Osso Produzida por Perfuração com Broca Metálica*. Universidade Federal do Paraná, Brasil.
- Aggarwal, A., & Singh, H. (2005). Optimization of machining techniques — A retrospective and literature review. *Sadhana*, 30(6), 699–711. <http://doi.org/10.1007/BF02716704>
- Augustin, G., Davila, S., Mihoci, K., Udiljak, T., Vedrina, D. S., & Antabak, A. (2008). Thermal osteonecrosis and bone drilling parameters revisited. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 128(1), 71–77. <http://doi.org/10.1007/s00402-007-0427-3>
- Davim, J. P. (2008). *Machining*. Springer.
- Eriksson RA, A. T. (1983). Temperature threshold levels for heat induced bone tissue injury: a vital microscopic study in rabbit. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 50(1), 101–107.
- Extech SDL200: 4-Channel Datalogging Thermometer. (n.d.). Retrieved July 27, 2016, from <http://www.extech.com/display/?id=14726>
- Ghani, J. A., Choudhury, I. A., & Hassan, H. H. (2004). Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1), 84–92. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00865-3](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00865-3)
- Kurt, M., Bagci, E., & Kaynak, Y. (2009). Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, 40(5-6), 458–469. <http://doi.org/10.1007/s00170-007-1368-2>
- Moita, N. F. (2007). *Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Montgomery, D. (1997). *Design and analysis of experiments* (4th ed.). New York: Wiley.
- Nalbant, M., Gokkaya, H., & Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials and Design*, 28(4), 1379–1385. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.008>
- Pal, S. et al. (2009). Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(11), 1250–1260.
- Pandey, R. K., & Panda, S. S. (2015). Evaluation of delamination in drilling of bone. *Medical Engineering and Physics*, 37(7), 657–664. <http://doi.org/10.1016/j.medengphy.2015.04.008>
- Ross, P. J. (1996). *Taguchi Techniques for Quality Engineering* (Second Ed). McGraw-Hill.
- Roy, R. K. (2001). *Design of experiments using the Taguvhi approach*. (I. John Wiley & Sons, Ed.).
- Taguchi, G., & Konishi, S. (1987). *Taguchi Methods Orthogonal arrays and linear graphs*. American Supplier Institute, Inc.
- Taner, T., & Antony, J. (2000). The assessment of quality in medical diagnostic tests: a comparison of ROC/Youden and Taguchi methods. *Int. J. of Health Care Quality Assurance*, 13(7), 300–307.
- Vashishth, D., & Tanner, K. (2000). Bonfield W. Contribution, development and morphology of microcracking in cortical bone during crack propagation. *Journal of Biomechanics*, 33, 1169–1174.
- Wu, Y., & Wu, A. (2000). *Taguchi Methods for Robust Design*. Nova Iorque: ASME Press.
- Yang, W. H., & Tang, Y. S. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84(1-3), 122–129. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00079-X](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00079-X)
- Yuehuei, A., & Robert, D. (2000). *Mechanical testing of bone and the bone-implant interface*. (C. Press, Ed.). New York.