

# 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

A. C. Lopes<sup>1</sup>, J. E. Ribeiro<sup>2</sup>, M. G. Fernandes<sup>3</sup>, E. M. M. Fonseca<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mestrado em Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança.

<sup>2</sup>Departamento de Tecnologia Mecânica, LAETA, INEGI, Instituto Politécnico de Bragança.

<sup>3</sup>INEGI, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

<sup>4</sup>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, há um aumento de temperatura nos tecidos ósseos adjacentes. 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 variação da velocidade de rotação e do diâmetro da broca no aumento de temperaturas no tecido ósseo, durante o processo de furação. A realização dos ensaios foi baseada no método de Taguchi, para obtenção da combinação ótima dos parâmetros de furação. 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.*

### ABSTRACT

*During the drilling process, often used for implant fixation, there is a temperature rise in bone adjacent tissue. 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 bone temperature increasing during the drilling 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.*

## 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. Este processo é realizado através de um movimento principal, ou de cor-

te, que representa a rotação da broca, medido em 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 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 conhecer os parâmetros de furação que podem minimizar a temperatura obtida no osso. Para tal, recorreu-se a uma técnica de otimização que permite definir os parâmetros de furação adequados para alcançar esse objetivo. Nas últimas décadas foram implementadas várias técnicas de otimização, tais como: a Lógica de Fuzzy (*Fuzzy Logic*), introduzida em 1920 por 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 inicialmente desenvolvido para aplicações de engenharia da qualidade (Ross, 1996). No entanto, no meio académico e na investigação, o método de *Taguchi* tornou-se popular no âmbito de

trabalhos experimentais (Roy, 2001). Existem diferentes publicações científicas relativas a processos de fabrico (Nalbant, Gokkaya, & Sur, 2007; Pal, 2009), aplicações médicas em geral (Taner & Antony, 2000), e na medicina dentária em particular (Pandey & Panda, 2015).

A fixação de implantes é hoje em dia comum na medicina, especialmente na medicina dentária, exigindo operações de furação óssea. 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 com elevada 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 sugere o procedimento necessário a seguir, de acordo com uma determinada ordem. Uma possível metodologia ou 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, decidir qual a característica de qualidade que melhor se adapta tanto à resposta selecionada como ao estudo a concretizar. Existem três tipos de características relativas à qualidade: quanto maior melhor (*the-higher-the-better*), quanto menor melhor (*the-lower-the-better*) e no-

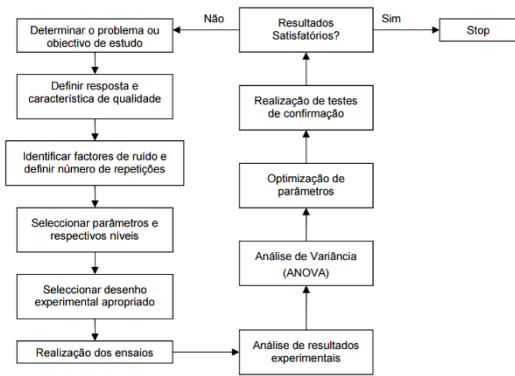


Fig. 1 - Metodologia de Taguchi (Moita, 2007).

minal 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 relativos ao rendimento ou à 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, podendo ser causado por fricção ou por desgaste; e o ruído unidade a unidade, referindo-se às diferenças entre produtos com imperfeições no processo de fabrico (Wu & Wu, 2000).

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 no procedimento 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 respetivos níveis. É possível escolher uma matriz proposta por Taguchi e 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, dependente da característica de qualidade escolhida, e ainda escolher a configuração para que os parâmetros de ruído apresentem os 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 mesmos à 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 a medição da temperatura desenvolvida no osso, 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 às 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 Yuehwei e Robert (Yuehwei & Robert, 2000). Todas as amostras foram mantidas hidratadas em soro fisiológico com compressas de gaze e armazenadas em sacos de plástico a  $-4^{\circ}\text{C}$  até à data de realização dos ensaios (Maria G. et al., 2016), (Ana L. et al., 2016).

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

Os furos nas amostras foram efetuados 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 no osso, durante o processo de furação. Para isso, foram identificados dois parâmetros de furação para controlo: a velocidade de rotação e o diâmetro da broca, para uma velocidade de avanço constante em todos os ensaios 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 níveis selecionados, a matriz L9 (Taguchi & Konishi, 1987) 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 pelas restantes colunas, o que permite estudar os principais efeitos. A matriz ortogonal L9, é por isso a matriz recomendada para planear experiências com uma combinação de 2 parâmetros e 3 níveis (Taguchi & Konishi, 1987).

Neste 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.

### 3.3 Ensaios experimentais

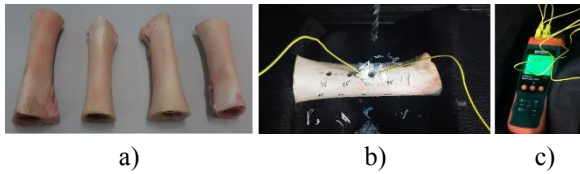
Os ensaios experimentais de furação foram realizados numa CNC de acordo com a matriz L9 definida. Cada um dos nove ensaios foi repetido três vezes, o que dá um total de 27 furos.

As amostras de osso foram fixas 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 Fig. 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 medição da temperatura em cada furo foi realizada utilizando dois termopares do

**Tabela 1** - Parâmetros de furação e respetivos níveis utilizados nos ensaios experimentais.

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



**Fig. 2** - Materiais: a) diáfises de bovino; b) amostra nº 1, furo nº 3; c) *Data logger*.

tipo K colocados em orifícios de 2 mm de diâmetro a 4 mm de profundidade, e a uma distância de 2 mm da extremidade do furo a realizar. As temperaturas foram registadas ao longo da furação utilizando um sistema de aquisição de dados (Extech SDL200: 4-Channel Datalogging Thermometer).

#### 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Como referido, cada ensaio foi repetido três vezes para a medição da temperatura em cada furo. Na Tabela 2 está indicada a temperatura para cada um dos furos, e da sua análise pode verificar-se que a combinação que originou a temperatura mais baixa foi com a menor velocidade de rotação (520 rpm) e broca de menor diâmetro (4 mm), com um valor médio de 24.6 °C. Por outro lado, a temperatura média mais elevada ocorreu nas 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 inte-

ressa 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 2, onde na coluna identificada por S/N’ estão presentes os valores de S/N somados a uma constante igual a 35. A razão para essa alteração é facilitar a compreensão e a interpretação dos resultados. As tabelas seguintes serão apresentadas com os valores de S/N’.

O valor médio da relação S/N para cada nível de parâmetros, pode observar-se na Tabela 3, bem como a diferença entre o valor máximo e o mínimo.

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 Tabela 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 2 que é o ensaio que apresenta as temperaturas mais baixas e, por consequência, o valor de S/N mais elevado.

**Tabela 2** - Resultados experimentais.

Nº do ensaio	Velocidade de rotação [rpm]	Diâmetro da broca [mm]	Furo 1 [°C]	Furo 2 [°C]	Furo 3 [°C]	S/N [dB]	S/N’ [dB]
1	520	4	23.80	25.50	24.60	-27.83	7.17
2	520	5	28.10	27.85	27.55	-28.89	6.11
3	520	6	26.25	25.90	27.15	-28.44	6.56
4	900	4	26.20	24.65	28.40	-28.45	6.55
5	900	5	32.65	31.15	32.65	-30.15	4.85
6	900	6	30.10	29.25	30.80	-29.56	5.44
7	1370	4	31.60	30.65	27.20	-29.51	5.49
8	1370	5	32.30	30.55	33.35	-30.13	4.87
9	1370	6	32.30	33.15	34.45	-30.45	4.55

**Tabela 3** - Média da razão S/N'.

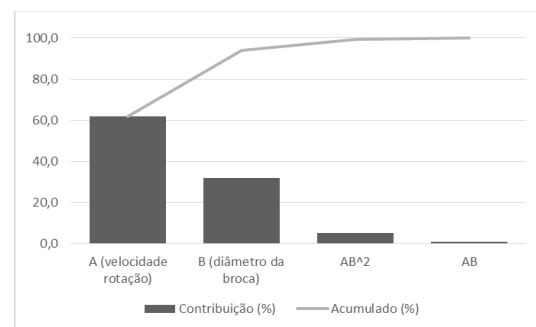
Símbolo	Parâmetros de entrada	Média razão S/N [dB]			Máx-mín
		Nível 1	Nível 2	Nível 3	
A	Velocidade de rotação [rpm]	6,61	5,61	4,97	1,00
B	Diâmetro da broca [mm]	6,40	5,28	5,51	0,24

## 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 realizado 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 4 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 4 é possível desenhar um diagrama, Fig. 3, onde se conclui 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 influência de 32%. As colunas representadas por AB e AB<sup>2</sup> correspondem às interações entre a velocidade de rotação (A) e o 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 está relacionada com o número de graus de liberdade. 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. 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 AB<sup>2</sup>, correspondendo às colunas 3 e 4, respetivamente. De acordo com a Tabela 4 e Fig. 3, verifica-se que interação entre A e B tem uma influência muito baixa na variação da temperatura ocorrida durante a furação.

**Fig. 3** - Diagrama de Pareto.**Tabela 4** - ANOVA de Pareto para três níveis.

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



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 o 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 minimizarem a temperatura durante o processo de furação em osso. Após os ensaios, as temperaturas mais baixas foram obtidas nas três repetições do ensaio nº1, respectivamente, 23.8, 25.5 e 24.6 °C (Tabela 2). Calculando a razão S/N (Tabela 2) verificou-se que foi máxima no 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 influencia 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%.

## 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., Vedrına, 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.
- Maria G. Fernandes, Elza M. M. Fonseca, Renato N. Jorge (2016). Influence of bone drilling parameters on the thermal stress distribution. *Proceedings of the 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure IRF2016*, J.F.Silva Gomes and S.A. Meguid (Eds.); ISBN: 978-989-98832-5-3, pp.517-528, Porto.
- M. G. Fernandes, E. M. M. Fonseca, R. J. Natal, M. I. Dias (2016). Temperature Assessment in the Drilling of Ex vivo Bovine and Porcine Cortical Bone Tissue. in *BioMedWomen: Clinical and BioEngineering for Women's*, Editors: Natal Jorge et al., CRC PRESS Taylor & Francis Group, London, ISBN 9781138029101, pp.159-163.
- Maria G. Fernandes, Lucas Azevedo, Renato Natal Jorge, Elza M. M. Fonseca, João E. P. C. Ribeiro (2016). Effect of drill speed on bone damage during drilling. *IV International Conference on Biodental Engineering*, Book of Abstracts, pp.5.
- Ana C. Lopes, Maria G. A. Fernandes, João E. Ribeiro, Elza M.M. Fonseca (2016). Determination of optimal parameters in drilling composite materials to minimize the machining temperature using the Taguchi method. *IV International Conference on Biodental Engineering*, Book of Abstracts, pp.7.
- 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 Edi). McGraw-Hill.
- Roy, R. K. (2001). *Design of experiments using the Taguchi 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)
- Yuehwei, A., & Robert, D. (2000). *Mechanical testing of bone and the bone-implant interface*. (C. Press, Ed.). New York.