

Otimização dos parâmetros de furação utilizando o método de Taguchi

Ana Catarina Oliveira Lopes, 21298

Relatório da Dissertação Final apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
Área de especialização em Engenharia Mecânica

Trabalho realizado sob a orientação de
Professor João Ribeiro
Professora Elza Fonseca

Novembro de 2017

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família:

à minha mãe, a melhor pessoa que eu conheço e aquela que mais merece ver este trabalho no fim, pela dedicação à minha formação ao longo de tantos anos. Pelo amor e pelos valores que me inculuiu que de certo fizeram de mim uma pessoa melhor;

aos meus irmãos, por serem umas pestes, mas sem os quais eu não seria a mesma;

ao meu pai, por ter deixado em mim marcas e traços que nem o tempo conseguiu apagar.

Agradecimentos

Neste espaço gostaria de deixar o meu muito obrigada àqueles que estiveram envolvidos na minha vida acadêmica e pessoal durante este percurso.

Em primeiro lugar, quero agradecer à minha mãe. A supermulher que foi mãe e pai ao longo de tantos anos, e que fez de tudo para garantir que concluísse os estudos e assim assegurar o meu futuro.

Ao Professor João Ribeiro pela excelente orientação, ajuda e persistência ao longo do desenvolvimento deste trabalho e ainda, pela força e por acreditar em mim e no meu trabalho quando eu própria não fui capaz.

À Professora Elza Fonseca, pela disponibilidade e ajuda sempre que necessária, e também responsável por garantir os materiais sem os quais não teria sido possível realizar este estudo.

À Doutora Goretí Fernandes, que além de amiga foi uma ajuda preciosa e indispensável na realização dos ensaios práticos, e que sempre se mostrou disponível para me ajudar em qualquer altura deste percurso.

Ao Engenheiro Jorge Paulo pela disponibilidade para realizar os ensaios práticos no Laboratório de Tecnologia Mecânica.

Um agradecimento especial aos meus irmãos, avós, tios e primos, que sempre acompanharam o meu percurso tanto académico como na vida e que todos eles serão um pedacinho de mim.

Ao Wilson, por mesmo ao longe, me dar força e saber sempre que eu iria conseguir.

Ao Bruno, amigo e colega que me fez sair de casa em dias menos bons e me obrigou a finalizar aquilo para que tanto trabalhei.

Por último, mas não menos importante, aos meus amigos, em especial aos *Discípulos de Miyagi*, por saberem ser isso mesmo, amigos.

Um sentido muito obrigada a todos.

Resumo

Ao longo do processo de furação, muitas vezes utilizado na fixação de implantes, é gerado um aumento de temperatura. Se essa temperatura for muito elevada pode ocorrer a necrose do tecido ósseo com a consequente diminuição da eficiência do sistema de fixação. No presente estudo foram utilizados dois materiais distintos (espumas rígidas de poliuretano e ossos de fêmur de bovino *ex-vivo*) com o objetivo de estudar o efeito dos parâmetros de furação ao longo do processo. Os parâmetros definidos para a realização dos ensaios foram baseados no método de *Taguchi*, para encontrar a combinação ótima desses parâmetros. Foram realizados três casos práticos diferentes, onde foram utilizadas matrizes ortogonais no planejamento de experiências a partir das quais foi analisada a relação sinal-ruído, a variância (ANOVA) e a proporção de *Pareto*, de forma a obter o efeito e a interação de cada parâmetro no processo de furação. Nos estudos realizados foi encontrada a combinação ótima dos parâmetros de furação e confirmada através de um ensaio laboratorial de verificação.

Palavras-chave: *Taguchi*, furação, temperatura, osso.

Abstract

During the drilling process often used for implant fixation, it is generated an increasing temperature. If this temperature is too high, necrosis of the bone tissue may occur, with consequent decrease of efficiency in the fixation system. In the present study, two different materials (rigid polyurethane foams and *ex-vivo* bovine bone femurs) were used to study the effect of drilling parameters during the process. The parameters defined for the tests were based on the *Taguchi* method, to find the optimal combination of these parameters. Three different practical cases were used, where orthogonal matrices were applied from which the signal-to-noise ratio, the variance (ANOVA) and the *Pareto's* ratio were analysed in order to obtain the effect and the interaction between parameter in the drilling process. In these three cases, the optimal combination of the drilling parameters was found and confirmed through a new laboratory test.

Keywords: Taguchi, drilling, temperature, bone.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Estado da arte	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização dos Capítulos	3
2	Introdução teórica	5
2.1	Materiais	5
2.1.1	Materiais compósitos de matriz polimérica	5
2.1.1.1	Diferentes aplicações dos materiais compósitos	6
2.1.1.2	Espuma rígida de poliuretano, bloco da Sawbones	7
2.1.2	Osso cortical, fémur de bovino ex-vivo	8
2.2	Processo de furação.....	9
2.2.1	Cinemática do processo de furação	9
2.2.2	Broca	10
2.3	Método de Taguchi	11
3	Minimização da temperatura de furação em espumas rígidas de poliuretano	15
3.1	Aplicação prévia do método de Taguchi	15
3.1.1	Materiais e equipamentos.....	16
3.1.2	Resultados experimentais e análise de dados	18
3.1.3	Conclusões	21
3.2	Planeamento de experiências com o método de Taguchi	21
3.2.1	Materiais e equipamentos.....	23
3.2.2	Ensaio experimentais	24
3.2.3	Análise de Resultados	26
3.2.3.1	Razão S/N	27
	Análise da ANOVA.....	29

3.2.4	Conclusões	30
4	Minimização da temperatura de furação em ossos de bovino ex-vivo.....	31
4.1	Materiais e equipamentos	31
4.2	Plano de experiências.....	32
4.3	Ensaio experimentais.....	33
4.4	Análise de Resultados	34
4.4.1	Razão S/N.....	35
4.4.2	Análise de Pareto.....	35
4.5	Conclusões	37
5	Conclusões e propostas para trabalhos futuros	39
5.1	Conclusões	39
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	40
	Referências bibliográficas.....	41
	Anexos	45
	Anexo I – Propriedades da espuma de poliuretano da Sawbones.....	45
	Anexo I – Dados técnicos da máquina CNC Deckel Maho DMC 63V	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros de furação e respectivos níveis.	15
Tabela 2 - Matriz ortogonal de Taguchi, L18 [43].....	16
Tabela 3. Resultados experimentais.	18
Tabela 4. Razão S/N.	19
Tabela 5. Média da razão S/N.	20
Tabela 6. Análise ANOVA.	21
Tabela 7. Parâmetros de furação e respectivos níveis.....	22
Tabela 8. Matriz ortogonal de Taguchi (L18) adaptada ao problema.	25
Tabela 9. Resultados experimentais.	27
Tabela 10. Média da razão S/N'.	28
Tabela 11. Combinação ótima de parâmetros de entrada que minimizam a temperatura.....	29
Tabela 12. Temperaturas medidas no ensaio de confirmação do método.....	29
Tabela 13. Análise ANOVA.	30
Tabela 14. Parâmetros de furação e respectivos níveis.....	32
Tabela 15. Resultados experimentais.	34
Tabela 16. Média da razão S/N'.	35
Tabela 17. ANOVA de Pareto para três níveis.	36
Tabela 18. Dados técnicos da máquina CNC Deckel Maho DMC 63V.	46

Lista de Figuras

Figura 1. Osso longo [[27], adaptada].....	8
Figura 2. Cinemática do processo de furação [29].....	10
Figura 3. Metodologia de Taguchi [40].	14
Figura 4. Bloco Sawbones.....	16
Figura 5. Posição dos termopares [44].	17
Figura 6. Modelo CAD do bloco da Sawbones.....	17
Figura 7. Broca de aço com haste cilíndrica, laminada [45].	18
Figura 8. Gráfico da razão S/N'.	20
Figura 9. Bloco demonstrativo da localização dos termopares.	22
Figura 10. Matriz ortogonal de Taguchi, L18 [43].	23
Figura 11. Sistema de aquisição de dados [46].	24
Figura 12. Pormenor de furação do ensaio 11.....	26
Figura 13. Gráfico da média da razão S/N'.	28
Figura 14. Diáfises do fémur de bovinos.	31
Figura 15. Matriz ortogonal de Taguchi, L9 [43].	33
Figura 16. Pormenor da furação da amostra nº1, furo nº3.	34
Figura 17. Diagrama de Pareto.....	36

Abreviaturas

AdjMS – Média dos quadrados

AdjSS – Soma dos quadrados

CAD – Projeto assistido por computador (Computer aided design)

CNC – Controlo numérico computadorizado (Computer numerical control)

D – Diâmetro

dB – Decibéis

DF – Graus de liberdade (degrees of freedom)

HSS – Aço rápido (High-speed steel)

m/min – Metros por minuto

m/mm – Metros por milímetro

máx – Máximo

mín – Mínimo

mm – Milímetros

mm/min – Milímetros por minuto

mm/rot – Milímetros por rotação

r.p.m. – Rotações por minuto

S/N – Razão de sinal-ruído (signal-to-noise ratio)

S/N' – Razão de sinal-ruído +35 (signal-to-noise ratio +35)

T – Temperatura

T_máx – Temperatura máxima

T_mín – Temperatura mínima

T_méd – Temperatura média

V – Volt

Símbolos

y_i – Dados observados

\bar{y} – Média dos dados observados

n – Número de observações

n' - Número de rotações da broca por minuto

S_y^2 – Variância de y

V_c – Velocidade de corte

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Estado da arte

A furação de osso é utilizada desde sempre, e é conhecida por ser a cirurgia mais antiga da história da medicina. A primeira cirurgia que envolveu a furação óssea foi a chamada trepanação craniana, que consiste na abertura de um ou dois furos no crânio com o objetivo de drenar um hematoma intracraniano ou de inserir um cateter cerebral. Este procedimento foi implementado em 1865 por *E. George Squier* e tornou-se uma prática comum em diversas civilizações [1, 2]. Com o desenvolvimento da medicina ao longo dos séculos XIX e XX, a furação óssea tornou-se um procedimento comum, como por exemplo nas cirurgias ortopédicas, na odontologia, neurologia e em cirurgias maxilofaciais [3].

A recuperação de uma dessas cirurgias depende do nível da lesão provocada no tecido ósseo durante a furação, que é sabido nos dias de hoje ser provocada pelos esforços de corte e pelo calor gerado durante o processo de furação. Estes problemas estão diretamente relacionados com os parâmetros de furação [4 – 6].

A furação é um processo por arranque de apra, ou seja, remove todo o material dentro do furo sob a forma de apra helicoidal com o auxílio de uma broca [7]. Este processo é realizado através de um movimento principal, ou de corte, que representa a rotação da broca, medido em [r.p.m.] 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] [7].

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 [8, 9]. 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 [10].

No presente trabalho 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 uma técnica de otimização que permita definir os valores adequados para alcançar esse objetivo, bem como, encontrar o parâmetro mais dominante 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 [11]; o Algoritmo Genético baseado em mecanismos de seleção natural, um método robusto e confiável para localizar um ótimo global [11]; a técnica *Scatter Search* que considera cada meta separadamente e procura um conjunto de soluções eficientes em vez de uma solução ideal única, baseada em estratégias para a combinação de regras, decisões e restrições substitutas [11]; a metodologia da Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology*) que é dividida em três métodos diferentes (inferências a partir de observações, recolha de dados, e utilização de técnicas de planeamento para uma interpretação adequada de resultados substitutos) [11].

O método de *Taguchi* é uma técnica de otimização utilizada em diferentes áreas, embora tenha sido desenvolvido para aplicações de engenharia da qualidade [12]. No entanto, no meio académico e em investigação o método de *Taguchi* é muito popular em trabalhos experimentais [13], existindo diversas publicações científicas com abordagem aos processos de fabrico [14], [15] aplicações médicas [16], e utilização em medicina dentária [17]. 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 de temperatura causado pela fricção entre a superfície de corte da broca em contacto com os fragmentos de osso formados durante a perfuração [18]. Para evitar a necrose óssea durante a furação, a temperatura no osso deve ser inferior a 47 [°C] [19]. O método *Taguchi* é baseado na conceção estatística de ensaios que podem satisfazer economicamente o processo para otimização do fabrico de uma peça. A principal vantagem do método é considerar vários fatores de uma só vez, incluindo os fatores de ruído [12]. O método de *Taguchi* é uma ferramenta poderosa, mas

é necessário combiná-la com outras ferramentas estatísticas como, por exemplo, a análise de variância (ANOVA), de forma a avaliar os resultados obtidos com o método. A técnica ANOVA como ferramenta para análise estatística do projeto experimental foi desenvolvida e utilizada pela primeira vez por *Ronald Fisher*, passando a ser amplamente utilizada na análise estatística de dados de experiências [20].

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se otimizar alguns dos parâmetros controláveis da furação, de forma a encontrar a combinação ótima que minimiza a temperatura, bem como a influência da interação entre os diferentes parâmetros.

Para efetuar este estudo utilizou-se o método de *Taguchi* de forma a definir os parâmetros a regular e respetivos níveis, assim como as matrizes ortogonais para a realização dos ensaios experimentais. A análise estatística dos dados foi feita pela análise da variância (ANOVA).

1.3 Organização dos Capítulos

Este trabalho está organizado em 5 capítulos distintos, sendo os primeiros dois relativos à introdução, estado da arte e alguns conceitos teóricos acerca do tema. Os restantes capítulos referem-se ao trabalho realizado e às conclusões obtidas.

Assim, no capítulo 1 é feita uma contextualização teórica do estado da arte, são apresentados os objetivos e a organização do trabalho.

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos relativos ao método utilizado, ao processo de furação e aos materiais em que foram efetuados os testes.

Os capítulos 3 e 4 contém o trabalho prático efetuado, a otimização da temperatura em espumas rígidas de poliuretano e em osso de bovino *ex-vivo*, respetivamente.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo e referidas algumas aplicações possíveis no futuro para este método.

Capítulo 2

2 Introdução teórica

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos teóricos considerados necessários à melhor compreensão do trabalho efetuado, bem com a descrição da metodologia de *Taguchi*.

2.1 Materiais

Para esta dissertação foram feitas várias experiências executadas em dois matérias diferentes, uma espuma rígida de poliuretano e o osso cortical de bovino *ex-vivo* (fémur).

2.1.1 Materiais compósitos de matriz polimérica

Conhece-se por material compósito um qualquer material que resulte da combinação de dois ou mais materiais distintos, ou seja, com composição química diferente [21]. No compósito, os materiais constituintes conservam as suas identidades em separado, mas a sua combinação possui propriedades e características tão diferentes como os seus componentes [22]. Segundo *Jean-Marie Berthelot*, um compósito consiste na associação de dois materiais de naturezas diferentes, que permite obter um material cujo conjunto de características de desempenho é superior ao dos dois materiais em separado [23]. Um exemplo são os materiais que resultam da dispersão de fibras num material aglomerante (compósitos fibrosos), que se designa por matriz. A incorporação de fibras nos materiais tradicionais, para melhoria das propriedades, teve início nos primórdios da humanidade, tendo sido um dos primeiros exemplos referido no *Antigo Testamento*, os tijolos de argila reforçados com palha [21].

O critério mais relevante para a classificação dos materiais compósitos é o tipo de matriz, e esta pode ser polimérica, metálica, cerâmica ou cimentosa, sendo que os mais importantes a nível

de desempenho e de aplicações são os de matriz polimérica, devido à sua facilidade de processamento e à baixa densidade dos polímeros. Os restantes são de utilização mais limitada devido ao seu custo elevado, altas temperaturas de processamento e maior complexidade dos processos de fabrico [21, 22].

2.1.1.1 Diferentes aplicações dos materiais compósitos

Devido às vantagens sobre os materiais tradicionais como, a facilidade de processamento, a elevada rigidez, elevada resistência mecânica e baixa massa volúmica, os materiais compósitos de matriz polimérica estão presentes ativamente na indústria desde meados do século XX. Os compósitos ocupam atualmente um lugar destacado entre os materiais de engenharia, estando presentes no nosso quotidiano, como no betão armado, até às aplicações em estruturas e componentes para a indústria aeronáutica e aeroespacial, como alguns compósitos de elevado desempenho à base de resinas de epóxido reforçadas com fibras contínuas de carbono [21].

Em seguida são apresentadas algumas aplicações de materiais compósitos em diversas áreas:

- Na indústria aeroespacial as fibras de carbono epoxídicas são muito utilizadas devido à baixa densidade (redução de peso dos componentes) e ao baixo coeficiente de expansão térmica (estabilidade dimensional da estrutura). Este material é utilizado no fabrico de antenas, apoios, suportes das estruturas dos refletores, telescópios, painéis solares e componentes de satélites e estações espaciais [24]. Um exemplo de utilização diversificada de materiais compósitos é o *Space Shuttle Atlantis* [21].
- Na indústria aeronáutica o desenvolvimento de compósitos reforçados com boro, carbono e outras fibras começou em 1950 [24]. Fibras de carbono epoxídicas são utilizadas na construção de aviões militares, *ailerons*, estabilizadores de aviões comerciais e helicópteros, como o modelo 430 da Bell que utiliza materiais compósitos nas pás e no garfo que as sustenta [21, 24]. Nas estruturas de aviões e helicópteros são utilizadas fibras reforçadas com polímeros, que podem reduzir em 30% o peso relativamente a estruturas metálicas [24].
- Na indústria automóvel o material compósito mais utilizado é a fibra de vidro reforçada com polímeros como o nylon, o ABS e o polipropileno, materiais de baixo custo, curto tempo de fabrico e grande resistência à corrosão. Alguns exemplos são barras de apoio, suportes do radiador, painéis das portas e até painéis laterais e *capôs* [24]. A *Ford* inicializou a aplicação destes materiais nos seus modelos nos anos 30 no entanto, o maior sucesso tenha sido a construção de uma estrutura em fibra de vidro para o

Chevrolet Corvette, em 1953 [21]. Outros exemplos são o *Aston Martin V12 Vanquish* e o *MacLaren MP4-1* de 1981 [21].

- Em equipamento desportivo, raquetes de ténis, tacos de golfe, canas de pesca, quadros de bicicleta, esquis e pranchas de esqui são alguns dos exemplos de utilização de materiais compósitos de matriz polimérica contendo vidro, carbono e *Kevlar* utilizados em equipamento desportivo devido a promoverem a redução de peso e vibrações, o que traz vantagens a nível de maior velocidade e menor exaustão física do utilizador [24].
- Nas aplicações marítimas, cascos de barcos, coberturas e o interior de componentes estruturais são fabricados com recurso à fibra de vidro reforçada com poliéster, já em barcos de competição são utilizadas as fibras de vidro reforçadas com resina epóxi, devido à maior necessidade de minimizar o peso [24].
- Em aplicações ortopédicas, as próteses ortopédicas são necessárias para substituir osso fraturado ou uniões destruídas no corpo humano. Próteses em materiais metálicos como aço austenítico 316L tornar-se-ão obsoletas devido a serem muito rígidas comparativamente ao osso humano e a libertarem iões metálicos para o organismo, o que pode levar à rejeição do implante. O material compósito escolhido para o fabrico de próteses médicas deve ser insensível à salina aquosa produzida pelo corpo humano, apresentar alta resistência à água e ser biocompatível. Um exemplo, e que está a ser utilizado para este fim, são as fibras de carbono reforçado com éter de poliéster de acetona [24].
- Em aplicações na construção, estruturas de betão e aço começam, em alguns casos, a ser substituídas por compósitos de matriz polimérica pela sua resistência à corrosão, diminuindo os custos de reparação e aumentando o tempo de vida da estrutura, e menor peso, tornando o transporte mais fácil e mais barato. Estes materiais são mais dispendiosos que os materiais tradicionais usados na construção, mas o tempo de vida do polímero e o baixo custo na sua manutenção pode tornar viável a sua utilização [24].

2.1.1.2 Espuma rígida de poliuretano, bloco da *Sawbones*

Na área médica, a utilização de materiais compósitos pode permitir o estudo do comportamento do osso. No presente estudo, e aplicando processos de furação, foi possível desta forma obter resultados *in vitro*. Existe já uma vasta gama de materiais ósseos sintéticos, sendo um dos mais utilizados a espuma rígida de poliuretano, produzida através uma reação de polimerização com uma geração simultânea de dióxido de carbono pela reação da água e isocianato [25]. Este

material permite simular as características estruturais do osso e, hoje em dia, tem sido cada vez mais usado na investigação, nomeadamente em testes a implantes ortopédicos [26].

No presente estudo foram utilizados blocos de espuma sintética de poliuretano da *Sawbones*, com as características apresentadas no Anexo I. Estes blocos artificiais podem ser compostos em estruturas compósitas à base de fibra de vidro curta embebida em resina de epóxico, numa das suas camadas externas (para simular osso cortical), e internamente preenchidos com espuma de poliuretano, assumindo este a forma de osso esponjoso. Estes modelos são, normalmente, usados em estudos de biomecânica *in vitro*. Nos ensaios realizados na presente dissertação, utilizaram-se blocos com a composição única em espuma rígida de poliuretano, com elevada massa volúmica.

2.1.2 Osso cortical, fémur de bovino *ex-vivo*

O osso cortical, ou compacto, é formado por lâminas ósseas paralelas e muito próximas entre si, o que o torna uma substância dura e compacta que concede resistência ao osso. É responsável pela criação de uma camada exterior de espessura variável revestida por uma membrana resistente (perióstio) [27]. No presente estudo foi utilizado o osso cortical do fémur de bovinos *ex-vivo*. Às amostras recolhidas, foi retirado o perióstio e o canal medular, sobrando apenas a diáfise do osso. A diáfise é a haste longa do osso e é constituída principalmente por tecido ósseo compacto, o que proporciona uma resistência considerável ao osso longo [28]. Na Figura 1 percebem-se facilmente as diferentes partes constituintes do osso cortical.

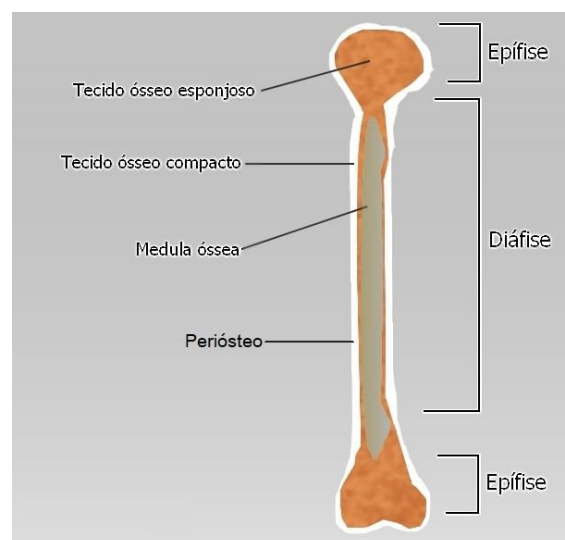


Figura 1. Osso longo [[27], adaptada].

2.2 Processo de furação

A furação é provavelmente, o processo de maquinagem mais popular nos dias de hoje. É um dos processos mais antigos utilizado pelo homem, e foi uma das primeiras operações a ser executada em metal. O processo de furação é uma das operações de maquinagem mais importantes, e fundamental na indústria, uma vez que grande parte das peças ou componentes de construção mecânica necessitam de furos [29].

A furação é um processo mecânico através do qual uma broca roda sobre o seu próprio eixo (eixo de perfuração), aplicando uma carga axial que cria uma cavidade cilíndrica no material. Este processo gera esforços mecânicos e temperaturas elevadas, devido ao atrito existente entre a broca e o material, que colocam em perigo a integridade do material e a qualidade do processo. Os parâmetros mais estudados são a velocidade de rotação, a velocidade de avanço e a geometria da broca [30]. Quando a furação é feita em tecidos vivos, é necessário utilizar técnicas que minimizem a agressividade do processo, para que este não leve ao dano mecânico e térmico da estrutura óssea, conduzindo à necrose [30].

2.2.1 Cinemática do processo de furação

O processo de furação consiste no corte por arranque de aparas, ou seja, remove todo o material compreendido no volume do furo sob a forma de aparas helicoidais, através da utilização de uma ferramenta de aresta múltipla, a broca.

Na Figura 2 verifica-se que esta operação é conseguida com a execução de dois movimentos simultâneos, o movimento de rotação e o movimento de translação. O primeiro constitui o movimento principal, ou de corte, e o segundo o movimento de avanço, ou penetração axial de aproximação da ferramenta à peça.

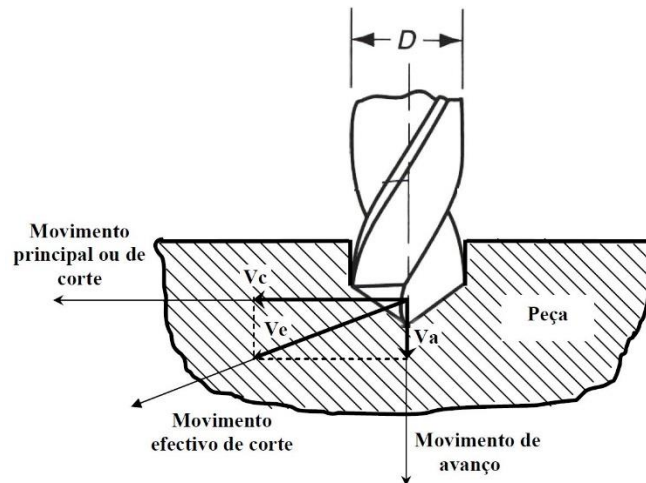


Figura 2. Cinemática do processo de furação [29].

Em relação à broca, está munida de um movimento de rotação, ou corte, e de um movimento retilíneo (translação) segundo o seu eixo (movimento de avanço). O movimento principal caracteriza-se pela velocidade de corte, expressa em [m/min] e é calculada em função da velocidade de rotação da broca e do diâmetro, pela equação 1.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n'}{1000} \quad (1)$$

Onde: V_c – Velocidade de corte [m/min]; D – Diâmetro da broca [mm]; n' – [r.p.m.].

A combinação do movimento de corte e de avanço, origina a formação de uma apara contínua ou descontínua e exprime-se em [mm/rot] [29].

2.2.2 Broca

A broca, também designada por ferramenta de corte de aresta múltipla, possui uma ou mais arestas (navalhas) helicoidais ou retas, e cavidades ou canais ao longo do seu corpo que permitem a extração do material removido (apara). Além de variar na sua forma, dimensão e tolerância, a broca é classificada em função do seu material, comprimento, geometria de corte, número de arestas de corte e tipo de cabo [31]. Na escolha da broca a utilizar é necessário averiguar vários fatores, de forma a adequar a ferramenta a determinada aplicação. Assim, é necessário ter em conta o material a maquinar, a geometria de corte, o material da broca, a dimensão do furo, o tipo de furo, características de entrada e saída da broca na peça, a qualidade do furo pretendida, as características da máquina e sistema de aperto, a utilização, se necessário, de fluido de corte e os parâmetros processuais (velocidade de corte e de avanço). A escolha

inadequada da broca pode influenciar a vida útil da ferramenta e a qualidade do furo, principalmente para brocas de diâmetro inferior a 4 [mm] [31].

Em operações de furação são utilizados três tipos de brocas, as brocas de lâmina, as brocas de pastilhas e as brocas reafiáveis, tendo estas, características diferentes [31–33]. Dentro da tipologia das brocas reafiáveis, ainda existe a broca helicoidal, a broca escalonada, a broca de pontear e a broca de ponto, sendo a mais conhecida a broca helicoidal visto executar 80% dos trabalhos de furação [31, 32, 34].

Nos ensaios experimentais efetuados foram utilizadas brocas helicoidais para a execução dos furos. A broca helicoidal é a ferramenta de corte de aresta múltipla mais comum, nos dias de hoje, nos trabalhos correntes de furação. Em relação aos outros tipos de broca, a broca helicoidal apresenta grandes vantagens: elevada produtividade, robustez, facilidade de saída da apanha, geometria e, principalmente, o facto de permitir um reafiamto consecutivo. Geralmente, apresenta diâmetros entre 0.15 [mm] e 80 [mm] e é constituída pelo cabo (ou haste), corpo e ponta [35–37].

2.3 Método de *Taguchi*

Genichi Taguchi (Tokamachi, Japão, 1924-2012) foi um engenheiro e estatista que despendeu grande parte da sua vida profissional no estudo de formas de melhoria na qualidade dos produtos. Após a Segunda Guerra Mundial desenvolveu uma metodologia de melhoria de qualidade que posteriormente foi adotada por empresas como a Toyota, a Fuji Film, entre outras empresas japonesas. Durante as décadas de 1960 e 1970, *Taguchi* saiu diversas vezes do Japão com o intuito de passar os seus conhecimentos, mas apenas no início de 1980 a sua técnica foi introduzida nos Estados Unidos da América [13].

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 [38]. 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 [13]. 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 [39]. *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 Figura 3. Inicialmente, é necessário determinar qual o objetivo de estudo, bem

como a resposta a ser otimizada (passo 1). O segundo passo é decidir qual a característica de qualidade que melhor se adequa tanto à resposta selecionada como ao estudo a concretizar.

Existem três tipos de características relativas à qualidade:

- quanto maior melhor (*the-higger-the-better*);

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

- quanto menor melhor (*the-lower-the-better*);

$$S/N_S = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

- nominal o melhor (*the-nominal-the-better*).

$$S/N_t = 10 \times \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (4)$$

Onde: \bar{y} – Média dos dados observados; s_y^2 – Variância de y ; n – Número de observações; y_i – Dados observados.

O terceiro passo consiste em identificar os fatores de ruído (fatores impossíveis de controlar) que possam ter no sistema um impacto negativo relativo 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 atrito ou por desgaste; e o ruído unidade a unidade, referindo-se às diferenças entre produtos devido a imperfeições no processo de fabrico [39].

Depois da identificação dos fatores de ruído, é importante identificar os parâmetros de funcionamento com um efeito significativo sobre a resposta (passo 4). 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 [40].

O próximo passo, e quinto, 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 [40].

Neste ponto 6 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 [40].

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 (passo 7). 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 [39].

O oitavo passo 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 (passo 9), é necessário efetuar um ensaio de confirmação (passo 10) [41].

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 [41]. Na Figura 3, está representado um organograma do método de Taguchi que apresenta, de forma mais sistemática e simplificado, o descrito nos parágrafos anteriores.

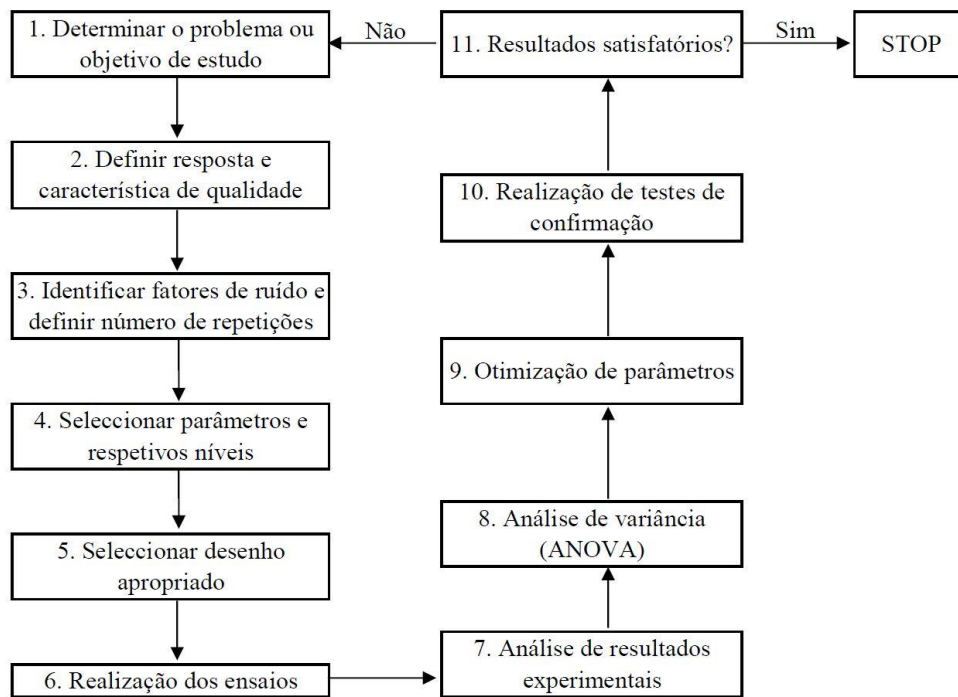


Figura 3. Metodologia de Taguchi [[40], adaptada].

Capítulo 3

3 Minimização da temperatura de furação em espumas rígidas de poliuretano

3.1 Aplicação prévia do método de *Taguchi*

Numa fase preliminar do trabalho desenvolvido, aplicou-se a metodologia de *Taguchi* a um estudo previamente desenvolvido [42]. Nesse sentido, foi proposto um método de otimização para minimizar a temperatura durante o processo de furação óssea. Assim, foram utilizados dados experimentais do referido estudo (Tabela 1) de forma a encontrar a combinação ótima de alguns parâmetros de furação.

Tabela 1 - Parâmetros de furação e respectivos níveis.

Símbolo	Parâmetros de furação	Nível 1	Nível 2	Nível 3
A	Refrigeração	Sim	Não	-
B	Velocidade de rotação [r.p.m.]	600	800	1200
C	Posição [mm]	7	14	21

Com base nos dados fornecidos foi possível agrupá-los numa matriz ortogonal de *Taguchi*, mais especificamente uma matriz L18 (Tabela 2). Esta matriz tem uma característica interessante, pois permite combinar diferentes parâmetros com níveis distintos, isto é, permite uma combinação de dois e três níveis, o que se adequa com os dados recolhidos no estudo efetuado. A L18 é uma matriz ortogonal especialmente projetada que considera a interação apenas entre as duas primeiras colunas, que podem ser obtidas sem sacrificar qualquer outra coluna. As interações entre as restantes colunas de três níveis são distribuídas de forma quase uniforme para todas as outras colunas de três níveis, o que permite a investigação dos principais efeitos, e que torna a matriz recomendada para diferentes experiências [43].

Tabela 2 - Matriz ortogonal de Taguchi, L18 [43].

Ensaio n.º	Fatores							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

3.1.1 Materiais e equipamentos

As temperaturas utilizadas neste estudo foram as observadas por Fernandes *et. al.*, com base em testes num bloco de espuma de poliuretano [44].

Para medir a variação da temperatura durante o processo de furação óssea, utilizou-se um bloco *Sawbones* com uma dimensão de 130x180x40 [mm], (Figura 4).



Figura 4. Bloco Sawbones.

A temperatura dentro do bloco foi medida e registada através de termopares tipo K, colocados na face lateral do bloco e em posições adjacentes à broca. Esses termopares foram ligados a um sistema de aquisição de dados, o MGCplus. Os termopares foram instalados em orifícios

efetuados nas faces laterais do bloco, com um diâmetro de 3.5 [mm], à mesma distância da broca e profundidades de 7, 14 e 21 [mm] (Figura 5). Todos os termopares foram devidamente identificados, bem como as respectivas ligações ao sistema de aquisição de dados.

Para efetuar a furação utilizou-se uma fresadora CNC (*Computer Numerical Control*) Deckel Maho, modelo DMC 63V (características no Anexo II) no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Instituto Politécnico de Bragança.

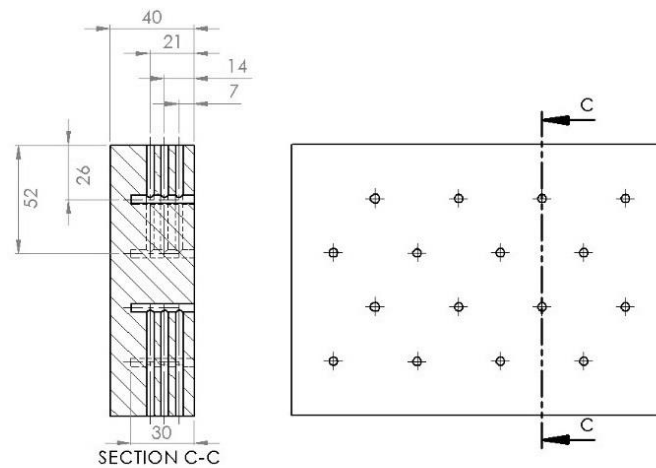


Figura 5. Posição dos termopares [44].

O tratamento estatístico dos dados foi realizado no *software* estatístico Minitab 17 e Microsoft Excel. Foram realizados furos verticais com um diâmetro de 4 [mm] e profundidade de 30 [mm] (Figura 6), em dois blocos idênticos, registando a temperatura com e sem refrigeração durante o processo. Na perfuração com refrigeração foi utilizado ar comprimido à temperatura ambiente.

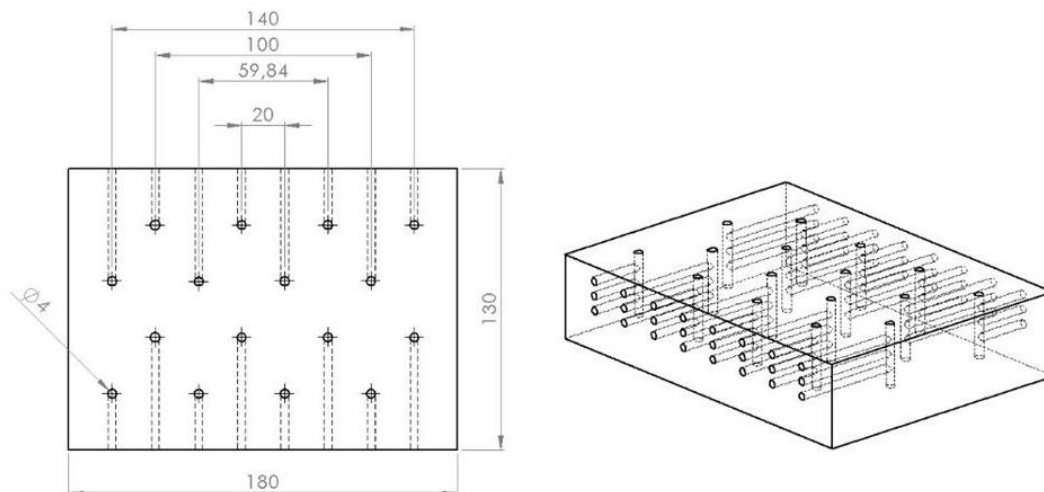


Figura 6. Modelo CAD do bloco da Sawbones.

Em cada furo foram registadas três temperaturas dentro do bloco, considerando a distância entre o termopar, a broca e a profundidade do furo. Nestes testes foi utilizada uma broca convencional HSS (*High-speed steel*) com 4 [mm] de diâmetro, 30 [mm] de comprimento e um ângulo superior de 118° (Figura 7).



Figura 7. Broca de aço com haste cilíndrica, laminada [45].

3.1.2 Resultados experimentais e análise de dados

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos para cada ensaio experimental. T1, T2 e T3 representam as 3 repetições de cada ensaio.

Tabela 3. Resultados experimentais.

Ensaio n.º	A	B [r.p.m.]	C [mm]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T_média [°C]
1	S	600	7	24,47	24,02	25,14	25,14
2	S	600	14	25,34	24,46	24,69	24,69
3	S	600	21	24,54	23,95	24,43	24,43
4	S	800	7	24,68	21,87	29,33	29,33
5	S	800	14	22,47	25,10	26,25	26,25
6	S	800	21	23,11	22,88	23,99	23,99
7	S	1200	7	23,04	21,08	21,70	21,70
8	S	1200	14	23,47	24,36	23,10	23,10
9	S	1200	21	22,10	21,51	23,50	23,50
10	N	600	7	31,63	35,91	34,11	34,11
11	N	600	14	33,56	29,79	35,05	35,05
12	N	600	21	31,13	28,65	30,05	30,05
13	N	800	7	27,72	30,79	31,91	31,91
14	N	800	14	28,36	30,22	30,20	30,20
15	N	800	21	28,36	28,34	28,34	28,34
16	N	1200	7	24,13	27,32	27,71	27,71
17	N	1200	14	29,73	21,09	21,88	21,88
18	N	1200	21	27,44	20,64	24,06	24,06

No método de *Taguchi*, quando o número de parâmetros é inferior ao número de colunas da matriz ortogonal, é possível eliminar as últimas colunas [12]. Portanto, como foram escolhidos apenas três parâmetros controláveis, usamos apenas as três primeiras colunas da matriz.

A Tabela 3 mostra a matriz L18 simplificada, já adaptada ao problema, com T1, T2 e T3 a representarem as 3 temperaturas nos furos. Na coluna da refrigeração (símbolo A) são apresentadas as letras S e N com o significado com (S) se sem (N) refrigeração, respectivamente. 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*), equação 3. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Razão S/N.

Ensaio n.º	A	B [r.p.m.]	C [mm]	Razão SN [dB]
1	S	600	7	-27,75
2	S	600	14	-27,90
3	S	600	21	-27,71
4	S	800	7	-28,12
5	S	800	14	-27,84
6	S	800	21	-27,36
7	S	1200	7	-26,83
8	S	1200	14	-27,48
9	S	1200	21	-27,00
10	N	600	7	-30,61
11	N	600	14	-30,34
12	N	600	21	-29,53
13	N	800	7	-29,60
14	N	800	14	-29,43
15	N	800	21	-29,05
16	N	1200	7	-28,44
17	N	1200	14	-27,80
18	N	1200	21	-27,68

Na Tabela 5 pode observar-se o valor médio da razão S/N para os diferentes níveis dos parâmetros de entrada e a diferença entre o valor máximo e o mínimo.

A representação gráfica dos valores médios obtidos para a razão S/N pode observar-se na Figura 8. Os valores mais altos de S/N identificam as configurações de parâmetros de entrada que

minimizam os efeitos de ruído. Assim, da Figura 8 pode afirmar-se que a combinação ótima deverá ser A1B3C3, isto é, com refrigeração, velocidade de rotação de 1200 [r.p.m.] e posição de 21 [mm].

Tabela 5. Média da razão S/N.

Parâmetros de furação	Média da razão S/N [dB]			máx - mín
	Nível 1	Nível 2	Nível 3	
A	-27,56	-29,16	-	1,61
B [r.p.m.]	-28,98	-28,57	-27,54	1,44
C [mm]	-28,57	-28,46	-28,06	0,51

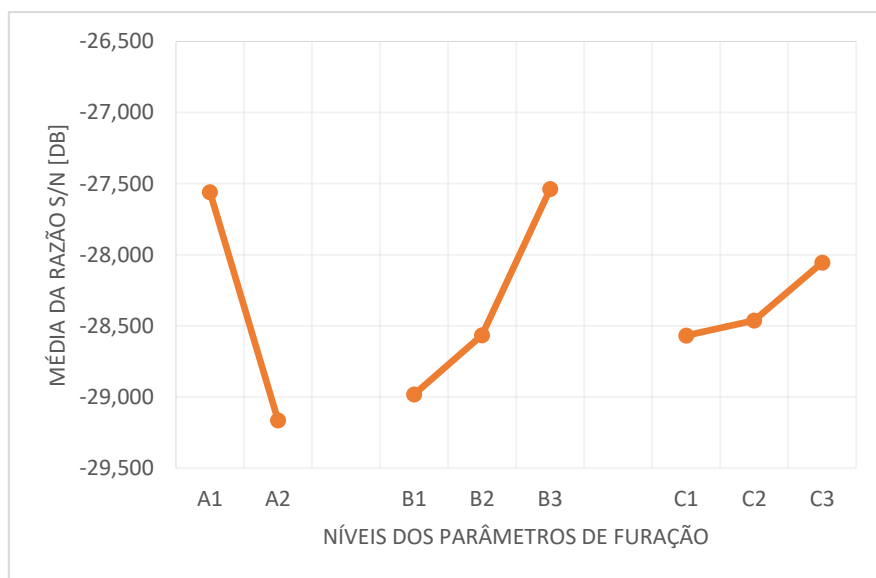


Figura 8. Gráfico da razão S/N'.

A ANOVA é uma ferramenta que auxilia a tomar uma decisão objetiva com base estatística, capaz de detetar quaisquer diferenças de desempenho [15].

Neste estudo, a análise da ANOVA foi realizada utilizando as variáveis impostas pelo método de *Taguchi* e os valores da razão S/N da temperatura.

Os parâmetros de entrada são mostrados na Tabela 4, onde pode ver-se que o valor ideal para a razão S/N é -26,83 e corresponde ao ensaio número 7.

A Tabela 6 contém um resumo dos resultados obtidos na análise da ANOVA.

Tabela 6. Análise ANOVA.

Fonte	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Val	Contribuição [%]
A	1	13,246	13,2458	80,58	52,6
B	2	8,384	4,1918	25,50	33,3
C	2	1,599	0,7995	4,86	6,3
Erro	12	1,973	0,1644		7,8
Total	17	25,202			

DF é o número de graus de liberdade, Adj SS é a soma dos quadrados, Adj MS é a média dos quadrados e o F-Val é uma ferramenta estatística que verifica que parâmetros afetam a qualidade de forma mais significativa. A análise de F-Val revela que a refrigeração é o parâmetro mais significativo com uma contribuição de 52,6% e a posição do furo (6,3%) é o parâmetro menos importante.

3.1.3 Conclusões

O método de *Taguchi* provou que pode ser usado como ferramenta de otimização para determinar a combinação de parâmetros ótimos que minimizam a temperatura no processo de furação. Segundo a razão sinal-ruído, a combinação ótima de parâmetros seria num ensaio com refrigeração, velocidade de rotação de 1200 [r.p.m.] e a temperatura medida a 21 [mm] (ensaio nº9). Contudo, esta combinação deveria ser verificada com um ensaio experimental de confirmação. Através da análise da ANOVA foi possível verificar que a refrigeração é o parâmetro de entrada mais influente na temperatura de furação, com uma contribuição de cerca de 53%.

3.2 Planeamento de experiências com o método de *Taguchi*

Sempre com o objetivo de otimizar os parâmetros de furação que minimizam temperatura, foram efetuados testes num bloco de espuma rígida de poliuretano (Figura 4), sendo que desta vez o método de *Taguchi* foi implementado do início ao fim. Desta forma, estando já o objetivo definido e sabendo que a resposta a ser otimizada é a temperatura, é necessário saber qual a

característica de qualidade que melhor se adequa. Para este estudo usou-se a característica de qualidade “*the-lower-the-better*” (equação 3). Não foram considerados os fatores de ruído. Em seguida, foi necessário identificar os parâmetros de funcionamento e respectivos níveis, com efeito sobre a resposta:

- a refrigeração, feita com ar comprimido à temperatura ambiente (cerca de 20 [°C]), pode adotar apenas dois níveis, ou seja, pode haver refrigeração, ou não;
- a velocidade de rotação, considerando três níveis: 600 [r.p.m.], 800 [r.p.m.] e 1200 [r.p.m.];
- a velocidade de avanço, sendo os três níveis de 25 [mm/min], 50 [mm/min] e 75 [mm/min];
- o diâmetro da broca, utilizando três brocas com tamanhos: 4 [mm], 5 [mm] e 6 [mm];
- a posição do termopar, ou seja, a profundidade a que foi medida a temperatura em cada furo, com os três níveis identificados por 7 [mm], 14 [mm] e 21 [mm] (Figura 9).

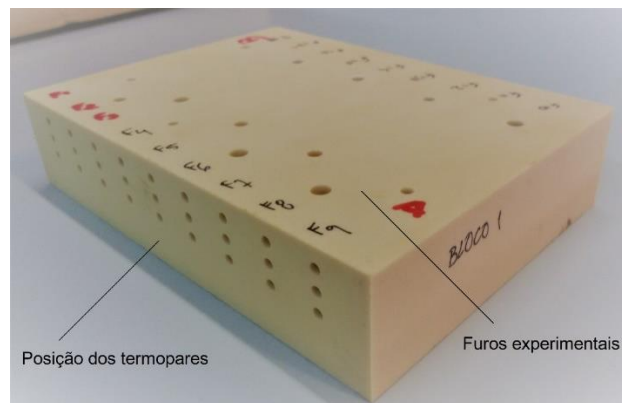


Figura 9. Bloco demonstrativo da localização dos termopares.

Para uma melhor percepção dos níveis de cada um dos parâmetros de controlo, pode observar-se a Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros de furação e respetivos níveis.

Símbolo	Parâmetros de furação	Nível 1	Nível 2	Nível 3
A	Refrigeração	Sim	Não	-
B	Vel. Rotação [r.p.m.]	600	800	1200
C	Vel. Avanço [mm/min]	25	50	75
D	Diâmetro da broca [mm]	4	5	6
E	Posição [mm]	7	14	21

O próximo passo no procedimento é a seleção de uma matriz ortogonal de experiências que satisfaça o número de graus de liberdade suficiente para todos os parâmetros em estudo e os níveis selecionados. Foi escolhida uma matriz já proposta por *Taguchi*, a L18 (Figura 9), que está entre um grupo de matrizes especialmente concebidas para permitirem ao utilizador concentrar-se nos principais efeitos, o que aumenta a eficiência e a reprodutibilidade em pequena escala, como pretendido por *Taguchi* [33].

$L_{18} (2^1 \times 3^7)$

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	
Group	1	2	3						


(1) 

Figura 10. Matriz ortogonal de *Taguchi*, L18 [43].

3.2.1 Materiais e equipamentos

Para a medição da temperatura desenvolvida, durante o processo de furação, foram utilizados 2 blocos *Sawbones* com dimensão de 130x180x40 [mm] (Figura 4).

A temperatura dentro dos blocos foi medida durante o processo de furação recorrendo a um sistema de aquisição de dados de 4 canais (Figura 11), modelo Extech SDL200 (“Extech SDL200: 4-Channel Datalogging Thermometer,” n.d.), registada num computador através do *software* Microsoft Excel, e tratada estatisticamente com recurso ao *software* Minitab 17.

No Laboratório de Tecnologia Mecânica do Instituto Politécnico de Bragança foi desenvolvido um programa CNC, que facilitou a execução dos furos efetuados numa fresadora CNC (*Computer Numerical Control*) Deckel Maho, modelo DMC 63V.



Figura 11. Sistema de aquisição de dados [46].

3.2.2 Ensaios experimentais

Os ensaios experimentais de furação foram realizados na fresadora CNC referida anteriormente, de acordo com a matriz L18 (Tabela 8). Cada ensaio foi repetido duas vezes, o que dá um total de 36 furos.

Tabela 8. Matriz ortogonal de Taguchi (L18) adaptada ao problema.

Ensaio	A Refrigeração	B Vel. Rotação [r.p.m.]	C Vel. Avanço [mm/min]	D Diâmetro da broca [mm]	E Posição [mm]
F1	Sim	600	25	4	7
F2	Sim	600	50	5	14
F3	Sim	600	75	6	21
F4	Sim	800	25	4	14
F5	Sim	800	50	5	21
F6	Sim	800	75	6	7
F7	Sim	1200	25	5	7
F8	Sim	1200	50	6	14
F9	Sim	1200	75	4	21
F10	Não	600	25	6	21
F11	Não	600	50	4	7
F12	Não	600	75	5	14
F13	Não	800	25	5	21
F14	Não	800	50	6	7
F15	Não	800	75	4	14
F16	Não	1200	25	6	14
F17	Não	1200	50	4	21
F18	Não	1200	75	5	7

Os blocos foram fixos pela prensa de apertos e o processo de furação foi executado de acordo com a matriz de ensaios referida anteriormente.

Na Figura 12 pode observar-se o pormenor da furação dos blocos. Para efetuar a operação de furação foi realizado um programa CNC onde se definiu a posição de cada furo, garantindo uma distância mínima entre furos de 20 [mm] e os parâmetros de maquinagem definidos para cada um dos ensaios. Os termopares foram colocados a uma distância constante, no interior de furo com 1 [mm] de diâmetro.



Figura 12. Pormenor de furação do ensaio 11.

3.2.3 Análise de Resultados

Como referido, cada ensaio foi repetido duas vezes e as temperaturas medidas foram registadas e agrupadas de acordo com cada ensaio, correspondendo a diferentes combinações de parâmetros.

Na Tabela 9 estão indicadas as duas temperaturas medidas para cada furo e, da sua análise, pode verificar-se que a temperatura mais baixa foi medida durante o ensaio F6, com um valor médio de 24,70 [°C].

Na Tabela 8, verifica-se que a combinação que originou a temperatura mais baixa (F6) foi com refrigeração, velocidade de rotação de 800 [r.p.m.], velocidade de avanço de 75 [mm/min], broca de 6 [mm] de diâmetro, medida a 7 [mm] da superfície. Por outro lado, a temperatura mais elevada, valor médio de 42,75 [°C], foi medida no ensaio F15 com a seguinte combinação de parâmetros: sem refrigeração, velocidade de rotação de 800 [r.p.m.], velocidade de avanço de 75 [mm/min], 4 [mm] de diâmetro da broca, com o termopar colocado a 14 [mm] da superfície.

Tabela 9. Resultados experimentais.

Ensaio	T_Bloco 1	T_Bloco 2	Média	Razão S/N [dB]	Razão S/N' [dB]
F1	24,85	29,96	27,41	-28,80	6,20
F2	28,05	30,95	29,50	-29,41	5,59
F3	30,10	30,50	30,30	-29,63	5,37
F4	25,77	28,73	27,25	-28,72	6,28
F5	25,14	27,60	26,37	-28,43	6,57
F6	24,23	25,18	24,70	-27,86	7,14
F7	34,52	35,08	34,80	-30,83	4,17
F8	26,93	24,39	25,66	-28,20	6,80
F9	26,48	25,69	26,09	-28,33	6,67
F10	28,88	29,91	29,40	-29,37	5,63
F11	31,20	31,73	31,47	-29,96	5,04
F12	28,86	34,34	31,60	-30,03	4,97
F13	26,17	30,38	28,28	-29,05	5,95
F14	37,06	39,72	38,39	-31,69	3,31
F15	41,50	44,00	42,75	-32,62	2,38
F16	40,24	32,27	36,25	-31,24	3,76
F17	27,12	26,58	26,85	-28,58	6,42
F18	36,17	38,09	37,13	-31,40	3,60

3.2.3.1 Razão S/N

A característica utilizada para calcular a razão sinal-ruído é a referida “*the-lower-the-better*”, dada pela Equação 3. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 9, onde na coluna identificada por S/N’ estão presentes os valores S/N somados a uma constante igual a 35 para uma melhor compreensão e interpretação dos resultados. As tabelas seguintes serão apresentadas com os valores de S/N’. Na Tabela 10 pode observar-se o valor médio da razão S/N’ para cada nível de parâmetros, bem como a diferença entre o valor máximo e o mínimo. O valor mais elevado de S/N’ identifica o ensaio com a configuração de parâmetros de entrada que minimiza os efeitos de ruído, ou seja, o valor mais elevado da razão S/N’ é relativo ao ensaio com valor mais baixo de temperatura.

Tabela 10. Média da razão S/N'.

Símbolo	Parâmetros de furação	Média da razão S/N'			máx-mín
		Nível 1	Nível 2	Nível 3	
A	Refrigeração	6,09	4,56	-	1,53
B	Vel. Rotação [r.p.m.]	5,47	5,27	5,24	0,23
C	Vel. Avanço [mm/min]	5,33	5,62	5,02	0,60
D	Diâmetro da broca [mm]	5,50	5,14	5,34	0,36
E	Posição [mm]	4,91	4,97	6,10	1,19

A partir da Tabela 10 foi possível criar o gráfico da Figura 13, onde os valores mais altos de S/N' identificam as configurações de parâmetros de entrada que minimizam os efeitos de ruído, ou seja, o gráfico permite verificar que a combinação ótima de parâmetros de entrada é A1-B1-C2-D1-E3.

Segundo o método de *Taguchi*, e consultando a Tabela 7, a configuração de parâmetros de entrada no processo de furação que minimiza a temperatura é a apresentada na Tabela 11.

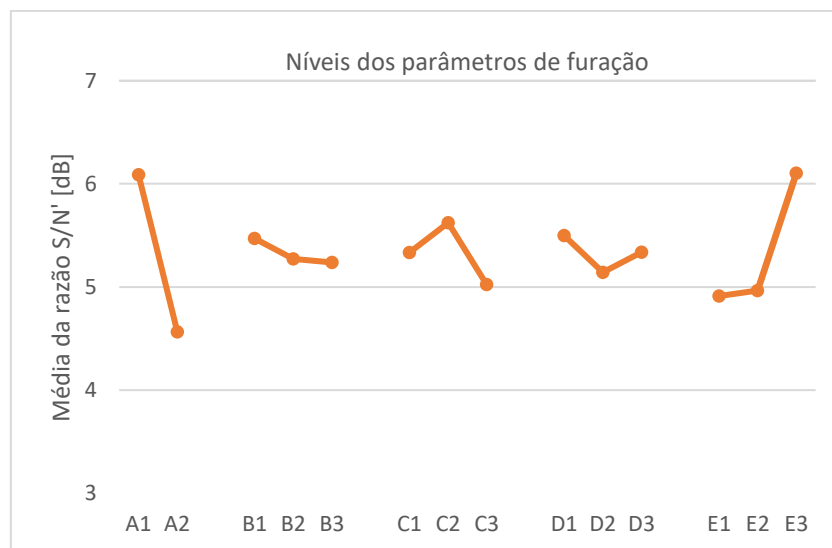


Figura 13. Gráfico da média da razão S/N'.

Tabela 11. Combinação ótima de parâmetros de entrada que minimizam a temperatura.

Símbolo	Parâmetro	Nível	Descrição
A	Refrigeração	1	Sim
B	Vel. rotação [r.p.m.]	1	600
C	Vel. avanço [mm/min]	2	50
D	Diâmetro da broca [mm]	1	4
E	Posição [mm]	3	21

Uma vez que a combinação ótima de parâmetros de entrada (A1-B1-C2-D1-E3) não consta da matriz L18, foi necessário efetuar um teste de confirmação utilizando essa mesma combinação. O teste de confirmação do método de *Taguchi* foi efetuado duas vezes, medindo a temperatura a 0,2 [mm] e a 1 [mm] do furo. Os resultados são os apresentados na Tabela 12, onde podemos ver que a temperatura média medida a 0,2 [mm] do furo foi de 21,07 [°C] e a 1 [mm] do furo foi de 20,61 [°C].

Tabela 12. Temperaturas medidas no ensaio de confirmação do método.

	Combinação ótima (0,2 [mm])	Combinação ótima (1 [mm])
T_máx [°C]	23,00	20,70
T_mín [°C]	20,10	20,60
T_méd [°C]	21,07	20,61
Variação [°C]	2,90	0,10

Análise da ANOVA

A análise da ANOVA foi realizada utilizando as variáveis impostas pelo método de *Taguchi* e os valores da razão S/N da temperatura.

Na Tabela 13 pode observar-se que o parâmetro mais significativo é a refrigeração com cerca de 37% e o parâmetro menos importante, com uma contribuição 1,4%, é a velocidade de avanço.

Tabela 13. Análise ANOVA.

Fonte	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Val	Contribuição [%]
Refrigeração	1	13,72	13,72	8,67	36,97
Vel. Rotação	2	1,05	0,52	0,33	2,82
Vel. Avanço	2	0,53	0,26	0,17	1,42
Diâmetro da broca	2	0,64	0,32	0,20	1,72
Posição	2	8,52	4,26	2,69	22,96
Erro	8	12,66	1,58		
Total	17	37,12			

Onde DF é o número de graus de liberdade, Adj SS é a soma dos quadrados, Adj MS é a média dos quadrados e o F-Val é uma ferramenta estatística e verifica que parâmetros afetam a qualidade de forma mais significativa.

3.2.4 Conclusões

Comparando os resultados da Tabela 9 com os apresentados na Tabela 12 pode afirmar-se que o método de *Taguchi* provou que pode ser usado como ferramenta de otimização para determinar a combinação de parâmetros que minimizam a temperatura no processo de furação, uma vez que a temperatura média medida no ensaio de confirmação (segundo a análise da razão sinal-ruído) a 1 [mm] de distância (20,61 [°C]) é inferior à temperatura média mais baixa dos ensaios projetados pela matriz ortogonal L18 (24,70 [°C]).

Segundo a análise ANOVA, o parâmetro mais significativo na resposta é a refrigeração, com uma contribuição de cerca de 37%, e o menos significativo, com uma contribuição de apenas 1,4%, é a velocidade de avanço.

Capítulo 4

4 Minimização da temperatura de furação em ossos de bovino *ex-vivo*

4.1 Materiais e equipamentos

Para a medição da temperatura desenvolvida no osso, durante o processo de furação, foram utilizadas quatro amostras de fêmur *ex-vivo* de bovino. Foi escolhido o osso de bovino por ter características próximas às do osso humano [47]. 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 fêmur *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 Figura 14. Para reter as propriedades e características físicas do osso, as amostras foram preparadas de acordo com as diretrizes estabelecidas por *Yuehwei* e *Robert* [48]. 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 da realização dos ensaios [49, 50]. 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.



Figura 14. Diáfises do fêmur de bovinos.

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 (Figura 11), modelo Extech SDL200 (“Extech SDL200: 4-Channel Datalogging Thermometer,” n.d.) e posterior registo num computador através do *software* Microsoft Excel e Minitab 17 para o tratamento de dados.

4.2 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 14.

Tabela 14. Parâmetros de furação e respetivos níveis.

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

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 [43] é a mais adequada para o caso em estudo. A L9 (Figura 15) 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.

$L_9 (3^4)$				
No.	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
	a	b	a	a
			b	b ²
Group	1	2		

(1)

Figura 15. Matriz ortogonal de Taguchi, L9 [43].

A matriz ortogonal L9, é por isso a matriz recomendada para planejar experiências com uma combinação de dois parâmetros e três níveis [43]. 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.

4.3 Ensaios experimentais

Os ensaios experimentais de furação foram realizados numa máquina 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 a matriz de ensaios referida anteriormente.

Na Figura 16 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.

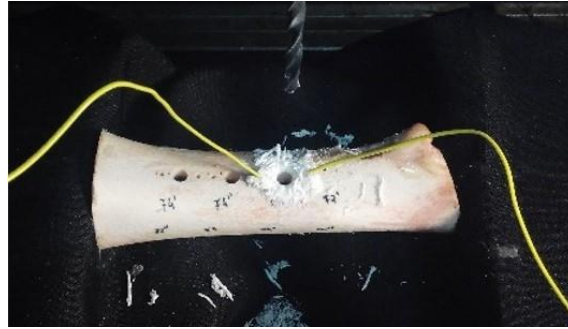


Figura 16. Pormenor da furação da amostra nº1, furo nº3.

A medição da temperatura em cada furo foi realizada utilizando dois termopares do tipo K colocados em orifícios de 2 [mm] de diâmetro, 4 [mm] de profundidade, a uma distância de 2 [mm] da extremidade do furo. As temperaturas foram registadas ao longo da furação utilizando o sistema de aquisição de dados (Extech SDL200: 4-Channel Datalogging Thermometer).

4.4 Análise de Resultados

Cada ensaio foi repetido três vezes para a medição da temperatura em cada furo. Na Tabela 15 estão indicadas as temperaturas medidas em 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 [r.p.m.] e broca de menor diâmetro, 4 [mm], com um valor médio de 24,6 [°C]. Por outro lado, a temperatura mais elevada ocorreu nas condições opostas, isto é, velocidade de rotação mais elevada (1370 [r.p.m.]) associada ao diâmetro da broca mais elevado (6 [mm]).

Tabela 15. Resultados experimentais.

Nº ensaio	Vel. Rotação [r.p.m.]	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

4.4.1 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 neste caso é a referida “quanto menor melhor” (*the-lower-the-better*), determinada pela Equação 3.

Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 15 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 16, 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 16 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 15 que é o ensaio que apresenta as temperaturas mais baixas e, por consequência, o valor de S/N’ mais elevado.

Tabela 16. Média da razão S/N’.

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

4.4.2 Análise de Pareto

A análise de Pareto é um método simplificado que permite identificar os parâmetros mais dominantes 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 [40].

Na Tabela 17 pode observar-se a ANOVA de Pareto, onde foi calculada a soma dos quadrados de cada fator e de cada interação.

Tabela 17. ANOVA de Pareto para três níveis.

Fatores		A	B	AB ²	AB	Total
Soma para cada nível de fator e interação	1	19,83	19,21	16,57	17,48	51,59
	2	16,84	15,84	17,04	17,20	
	3	14,91	16,54	17,98	16,90	
Soma dos quadrados		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	

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 [8]. Para uma melhor percepção dos dados da Tabela 17 é possível desenhar um diagrama, (Figura 17), 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%.

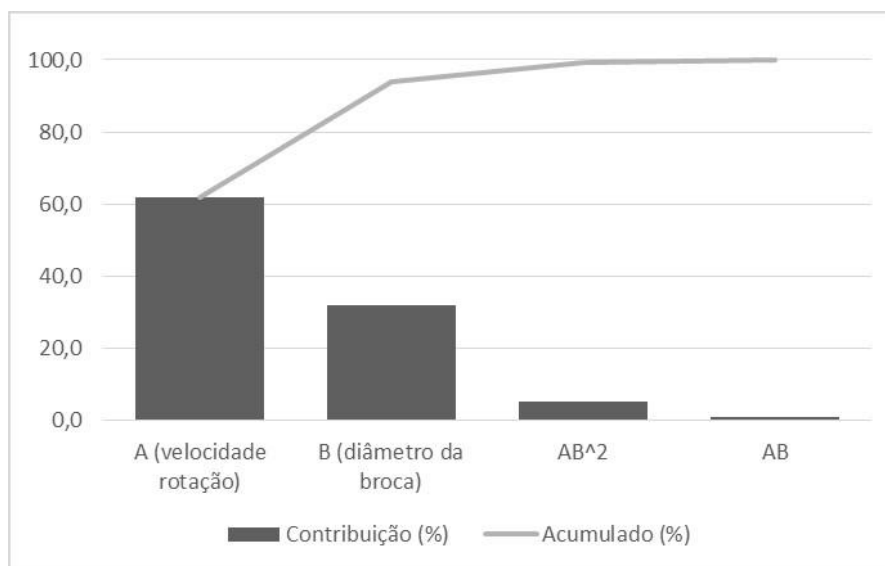


Figura 17. Diagrama de Pareto.

As colunas representadas por AB e AB² 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 com AB e AB², correspondendo às colunas 3 e 4, respetivamente. De acordo com a Tabela 16 e a Figura 17, verifica-se que a interação entre A e B tem uma influência muito baixa na variação da temperatura ocorrida durante a furação.

De acordo com *Gahni et al.* os fatores e interações significativas, representados no diagrama de Pareto, devem contribuir acumulativamente cerca de 90% [8]. Nesse sentido, os fatores significativos para a variação da temperatura gerada pela furação são a velocidade de rotação e o diâmetro da broca.

4.5 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. Após os ensaios, as temperaturas mais baixas foram obtidas nas três repetições do ensaio nº1, respetivamente, 23,8, 25,5 e 24,6 [°C] (Tabela 14). Calculando a razão S/N (Tabela 14) 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 [r.p.m.] 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%. 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%.

Capítulo 5

5 Conclusões e propostas para trabalhos futuros

5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a otimização dos parâmetros de furação, de forma a minimizar a temperatura gerada nos furos. Para isso foi utilizado o método de *Taguchi* de duas formas diferentes, a primeira foi adapta-lo a testes já efetuados em bloco de espuma rígida de poliuretano, a segunda foi implementá-lo logo, desde o planeamento de experiências, para ensaios em espumas rígidas de poliuretano e em osso cortical de bovino *ex-vivo*.

No caso do tratamento de dados com uma experiência realizada anteriormente, não foi possível realizar a verificação da combinação ótima determinada pelo método de *Taguchi*. Já a análise da ANOVA permite afirmar que entre a refrigeração, a velocidade de rotação e a posição do termopar, o parâmetro mais influente na temperatura é a refrigeração, com uma contribuição de cerca de 53%.

No segundo caso, o método de *Taguchi* foi aplicado no planeamento de experiências através da matriz ortogonal L18. Foram efetuados 36 furos (18 testes) e a temperatura mais baixa foi medida no ensaio F6 (24,70 [°C]). Calculando a razão S/N para os diferentes níveis, o método permite verificar que a combinação ótima de parâmetros não é nenhuma das já testadas. Assim, foi feito um ensaio de confirmação onde a temperatura média medida a 1 [mm] do furo foi de 20,6 [°C]. Foi assim confirmado que a combinação de parâmetros que minimiza a temperatura durante o processo de furação é com refrigeração, velocidade de rotação de 600 [r.p.m.], velocidade de avanço de 50 [mm/min], broca de 4 [mm] de diâmetro e medida a 21 [mm] de

profundidade. A análise da ANOVA permite concluir que o parâmetro mais significativo é a refrigeração com uma contribuição de cerca de 37%.

Na furação de osso cortical de bovino *ex-vivo* foi utilizada a matriz ortogonal L9 de *Taguchi* para o planejamento de experiências e a respectiva análise. Este estudo foi feito com dois parâmetros de entrada (velocidade de rotação e diâmetro da broca), com 3 níveis cada um. A temperatura média mais baixa foi medida no ensaio nº1 (24,6 [°C]), ensaio esse que coincide com a parametrização ótima dada pela razão S/N e que conclui que os parâmetros que minimizam a temperatura do processo de furação são uma velocidade de rotação de 520 [r.p.m.] e a broca de 4 [mm] de diâmetro. Desta vez a análise estatística foi feita através da ANOVA de Pareto, a partir da qual foi desenhado um diagrama (Figura 17) onde se pode observar, que o fator que mais influencia tem sobre o aumento de temperatura é a velocidade de rotação, com uma contribuição de 62%, e que o de menor influencia é a interação de A com B (6%). Os fatores significativos são aqueles que, acumulativamente, contribuem com 90% [12]. Pode então concluir-se que neste caso os fatores significativos para a variação da temperatura durante o processo de furação são a velocidade de rotação e o diâmetro da broca que, em conjunto contribuem 94%.

É possível então concluir que o método *Taguchi* provou ser um bom método para a otimização de parâmetros de furação que minimizem a temperatura.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, e na continuação do estudo deste tema, seria interessante aplicar o método de *Taguchi* a uma maior combinação de parâmetros, ou seja, aumentar o número de níveis em estudo, utilizando uma matriz adequada de forma a estudar a contribuição de cada um dos parâmetros durante o processo de furação. Uma outra proposta seria efetuar o mesmo estudo, mas com a gama de níveis utilizada pelos profissionais de saúde aplicada num caso real. Este método poderá ser aplicado em qualquer área em que o objetivo seja a otimização de parâmetros e o estudo da sua influência.

Referências bibliográficas

- [1] V. A. Andrushko and J. W. Verano, “Prehistoric trepanation in the Cuzco Region of Peru: A view into an ancient andean practice,” *Am. J. Phys. Anthropol.*, vol. 137, pp. 4–13, 2012.
- [2] S. Finger and H. R. Fernando, “E. George Squier and the discovery of cranial trepanation: a landmark in the history of surgery and ancient medicine,” *J. Hist. Med. Allied Sci.*, vol. 56, pp. 353–381, 2001.
- [3] G. Augustin *et al.*, “Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis,” *Clin. Biomech.*, vol. 27, pp. 313–325, 2012.
- [4] J. Soriano, A. Garay, P. Aristimuño, L. M. Iriarte, J. A. Eguren, and P. J. Arrazola, “Effects of rotational speed, feed rate and tool type on temperature and cutting forces when drilling bovine cortical bone,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 611–636, 2013.
- [5] E. M. M. Fonseca, K. Magalhães, M. G. Fernandes, M. P. Barbosa, and G. Sousa, “Numerical model of thermal necrosis due a dental drilling process,” *Biodental Eng. II. London Taylor Fr. Group, CRC Press. Porto J. Natal, al. (eds).*, pp. 69–73, 2014.
- [6] M. G. Fernandes, R. Nata, and E. M. M. Fonsec, “Three-dimensional dynamic finite element and experimental models for drilling processes,” *Proc. intitution Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, pp. 1–9, 2015.
- [7] V. P. Astakhov *et al.*, *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, vol. 53, no. 9. British Library Cataloguing, 2013.
- [8] J. A. Ghani, I. A. Choudhury, and H. H. Hassan, “Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 145, no. 1, pp. 84–92, 2004.
- [9] M. Kurt, E. Bagci, and Y. Kaynak, “Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 40, no. 5–6, pp. 458–469, 2009.
- [10] G. Augustin, S. Davila, K. Mihoci, T. Udiljak, D. S. Vedrına, and A. Antabak, “Thermal osteonecrosis and bone drilling parameters revisited,” *Arch. Orthop. Trauma Surg.*, vol. 128, no. 1, pp. 71–77, 2008.
- [11] A. Aggarwal and H. Singh, “Optimization of machining techniques — A retrospective and literature review,” *Sadhana*, vol. 30, no. 6, pp. 699–711, 2005.
- [12] P. J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 2nd ed. McGraw-Hill, 1996.
- [13] R. K. Roy, *Design of experiments using the Taguchi approach*. John Wiley & Sons, inc, 2001.
- [14] M. Nalbant, H. Gökkaya, and G. Sur, “Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning,” *Mater. Des.*, vol.


- 28, no. 4, pp. 1379–1385, 2007.
- [15] S. Pal, S. K. Malviya, S. K. Pal, and A. K. Samantaray, “Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 11–12, pp. 1250–1260, 2009.
- [16] T. Taner and J. Antony, “The assessment of quality in medical diagnostic tests: a comparison of ROC/Youden and Taguchi methods,” *Int. J. Health Care Qual. Assur.*, vol. 13, no. 7, pp. 300–307, 2000.
- [17] R. K. Pandey and S. S. Panda, “Evaluation of delamination in drilling of bone,” *Med. Eng. Phys.*, vol. 37, no. 7, pp. 657–664, 2015.
- [18] M. Abagge, “Necrose térmica do osso produzida por perfuração com broca metálica,” Federal University of Paraná, Brazil, 1998.
- [19] A. T. Eriksson RA, “Temperature threshold levels for heat induced bone tissue injury: a vital microscopic study in rabbit,” *J. Prosthet. Dent.*, vol. 50, pp. 101–107, 1983.
- [20] M. Anderson and P. Whitcomb, “RSM Simplified, Optimizing processes using response surface methods for design of experiments,” 2005.
- [21] M. F. S. F. de Moura, A. B. de Moraes, and A. G. de Magalhães, *Materiais compósitos - Materiais, fabrico e comportamento mecânico*. Porto: PUBLINDÚSTRIA, EDIÇÕES TÉCNICAS, 2005.
- [22] B. D. Agarwal and L. J. Broutman, *Analysis and performance of fiber composites*, Second edi. John Wiley & Sons, inc, 1990.
- [23] J.-M. Berthelot, *Composite materials - Mechanical behavior and structural analysis*. Springer, 1998.
- [24] P. K. Mallick, *Composites engineering hanbook*. Marcel Dekker, inc., 1997.
- [25] V. Shim, J. Boheme, C. Josten, and I. Anderson, “Chapter 9: Use of polyurethane foam in orthopaedic biomechanical experimentation and simulation,” *Polyurethane*, pp. 171–200, 2012.
- [26] S. F. F. Malak and I. A. Anderson, “Orthogonal cutting of polyurethane foam,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 47, pp. 867–883, 2005.
- [27] M.-C. e serviços de Saúde, [Online]. Available: <https://www.medipedia.pt/home/home.php?module=artigoEnc&id=365>. [Accessed: 05-Oct-2017].
- [28] “Sistema esquelético [Online]. Available: <https://www.auladeanatomia.com/novosite/sistemas/sistema-esqueletico/>. [Accessed: 05-Oct-2017].
- [29] P. E. V. dos Reis, “Furação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica,” Universidade de Aveiro, 2005.
- [30] T. A. Teixeira, “Análise de tensões em materiais compósitos sob furação utilizando diferentes tamanhos de ferramentas de corte,” Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2017.
- [31] D. A. Stephenson and J. S. Agapiou, *Metal cutting theory and practice*. Marcel Dekker,

- 1997.
- [32] R. Edwards, *Cutting Tools*. The Institute of Materials, 1993.
- [33] M. C. Shaw, *Metal cutting principles*. Oxford Science Publications, 1997.
- [34] A. R. Watson, “Geometry of drill elements,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 25, no. 3, pp. 209–227, 1985.
- [35] G. Boothroyd and W. A. Knight, *Fundamental of machining and machine tools*. Marcel Dekker, 1989.
- [36] S. Ema, H. Fujii, E. Marui, and S. Kato, “New type drill with 3 major cutting edges,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 28, no. 4, pp. 461–473, 1988.
- [37] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing - Materials, process and systems*. Prentice-Hall International Editions, 1996.
- [38] W. H. Yang and Y. S. Tarn, “Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 84, no. 1–3, pp. 122–129, 1998.
- [39] Y. Wu and A. Wu, *Taguchi methods for robust design*. New York: ASME Press, 2000.
- [40] N. F. Moita, “Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos,” Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- [41] D. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. New York: Wiley, 1997.
- [42] A. C. Lopes, M. G. A. Fernandes, J. E. Ribeiro, and E. M. M. Fonseca, “Determination of optimal parameters in drilling composite materials to minimize the machining temperature using the Taguchi method,” *IV Int. Conf. Biomedical Eng. Vila Nov. Famalicão*, 2016.
- [43] G. Taguchi and S. Konishi, “Taguchi Methods Orthogonal arrays and linear graphs.” American Supplier Institute, inc, 1987.
- [44] M. G. A. Fernandes, M. Vaz, R. M. J. Natal, and E. M. M. Fonseca, “Avaliação térmica da furação no osso cortical com e sem irrigação,” *Rev. da Assoc. Port. Análise Exp. Tensões*, vol. 24, pp. 71–77, 2015.
- [45] B. P. H. Tools, 2015. [Online]. Available: http://www.beta-tools.com/catalog/articles/view/410/___lang_en/___catlang_en/___catalog_bet.
- [46] Extech, [Online]. Available: www.extech.com/display/?id=14726. [Accessed: 07-Oct-2017].
- [47] D. Vashishth and K. Tanner, “Bonfield W. Contribution, development and morphology of microcracking in cortical bone during crack propagation,” *J. Biomech.*, vol. 33, pp. 1169–1174, 2000.
- [48] A. Yuehuei and D. Robert, *Mechanical testing of bone and the bone implant interface*. New York: C. Press, 2000.
- [49] A. C. Lopes, J. E. Ribeiro, M. G. A. Fernandes, and E. M. M. Fonseca, “Determinação dos parâmetros ótimos na furação do tecido ósseo com recurso ao método de Taguchi,” *10º Congr. Nac. Mecânica Exp. - CNME2016. ISBN 978-972-49-2287-4*, 2016.

- [50] M. G. Fernandes, E. M. M. Fonseca, R. Natal, A. C. Lopes, and J. P. Ribeiro, "Experimental study of temperatures during drilling of ex-vivo bovine bones," *10º Congr. Nac. Mecânica Exp. - CNME2016*, 2016.

Anexos

Anexo I – Propriedades da espuma de poliuretano da Sawbones



SAWBONES WORLDWIDE
LEADER IN ORTHOPAEDIC AND MEDICAL MODELS
WWW.SAWBONES.COM

**BIOMECHANICAL
TEST MATERIALS**

On the following two pages you will find information about:


- Three different types of **block material**:
 - Solid
 - Cellular
 - Open cell
- Two different types of **sheet material**:
 - Solid
 - Short fiber filled epoxy

These materials can be used to **laminate and customize** blocks, see back cover for further information.

SOLID RIGID POLYURETHANE FOAM

Description:

- Alternative test medium for human bone
- Provide consistent and uniform material with properties in a range of human bone (not a replicate structure of human bone).
- Closed cell ranging from 96.0 to 99.9%



SOLID RIGID POLYURETHANE FOAM BLOCK

Block size: 13 cm x 18 cm x 4 cm

#1522-23	5 pcf
#1522-01	10 pcf
#1522-02	15 pcf
#1522-03	20 pcf
#1522-04	30 pcf
#1522-05	40 pcf
#1522-27	50 pcf

SOLID RIGID POLYURETHANE FOAM SHEET

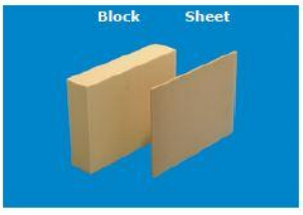
Sheet size: 13 cm x 18 cm x 2 mm

#1522-19	10 pcf
#1522-15	15 pcf
#1522-18	20 pcf
#1522-20	30 pcf
#1522-16	40 pcf
#1522-24	50 pcf

Sheet size: 13 cm x 18 cm x 3 mm

#1522-13	15 pcf
#1522-14	20 pcf
#1522-06	30 pcf
#1522-07	40 pcf
#1522-08	50 pcf

Block dimensions are within ± 2 mm and sheet thickness is within ± 0.3 mm. Foam density may vary +/- 10%.



Block Sheet

Solid Rigid Properties:

DENSITY		COMPRESSIVE		TENSILE		SHEAR	
(pcf)	(g/cc)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)
5 *	0.08	0.60	16	1.0	32	0.59	7.1
10 *	0.16	2.2	58	2.1	86	1.6	19
15 *	0.24	4.9	123	3.7	173	2.8	33
20 *	0.32	8.4	210	5.6	284	4.3	49
30 *	0.48	18	445	12	592	7.6	87
40 *	0.64	31	759	19	1,000	11	130
50 *	0.80	48	1,148	27	1,469	16	178

*Foam meets ASTM F-1839-08 "Standard Specification for Rigid Polyurethane Foam for Use as a Standard Material for Testing Orthopaedic Devices and Instruments" states that "The uniformity and consistent properties of rigid polyurethane foam make it an ideal material for comparative testing of bone screws and other medical devices and instruments". These properties are parallel to the direction of rise.

5

Visit our website for more products and online info @ www.sawbones.com

Anexo II – Dados técnicos da máquina CNC Deckel Maho DMC 63V

Tabela 18. Dados técnicos da máquina CNC Deckel Maho DMC 63V.

Dados técnicos	
Fabricante	Deckel Maho
Modelo	DMC 63V
Tipo CNC	Siemens Sinumerik 810D
Ano	1998
Peso	4200 kg
Medidas	L 2700 x W 1900 x H 2400 mm
Especificações	Sistema de refrigeração
	Sk40
	Digital display
	24 specialized tool change
	380 V
	Feeds X Y Z feed automatically
	Stepless gearbox 0-8000 rev/min
	Processing area x 630 y 500 z 500 mm
	Table size 800 x 500 mm
	Table load 500 kg