

# **Comportamento do osso cortical submetido a processos de furação**

Hugo Alexandre Simão Lúcio

Relatório Final do Trabalho de Projeto apresentado à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do Grau de Mestre em

**Tecnologia Biomédica**

Orientador: Professora Elza Maria Morais Fonseca

novembro 2015

# Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas que me acompanharam ao longo do meu percurso académico.

Em particular, à minha orientadora, Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca pelo apoio, disponibilidade, dedicação e organização durante a realização da dissertação. Agradeço também todos os conhecimentos que me transmitiu no decorrer deste trabalho.

À engenheira Luísa Barreira, ao engenheiro Jorge Meireles e a engenheira Goreti Fernandes deixo aqui os meus agradecimentos pelo apoio e disponibilidade durante os ensaios experimentais e toda a dedicação.

Finalmente quero agradecer aos meus pais por todo o apoio que me deram ao longo desta fase da minha vida.



# Resumo

O principal objetivo deste estudo é avaliar o desenvolvimento da necrose térmica e/ou desgaste ósseo durante um processo de furação em materiais compósitos com estrutura similar ao tecido ósseo cortical. As fases de trabalho contemplam a leitura do campo de temperaturas nos modelos biomecânicos através de um processo de furação, o campo de deformações através da utilização da extensometria, leitura da temperatura gerada na broca após o processo de furação através de imagens termográficas e análise térmica e mecânica a partir de um modelo de elementos finitos. Foram tomadas considerações sobre a escolha dos biomateriais, dimensões do modelo e do processo de furação tendo em conta diversas variáveis, como a velocidade, diâmetro e comprimento da broca. Com este trabalho, utilizando um procedimento experimental e numérico, pretende-se verificar a interação entre a alteração da velocidade de avanço com a mesma velocidade de rotação e diâmetro de broca, no aumento da temperatura e de deformações no tecido cortical em estudo. Os métodos experimentais utilizados em laboratório são baseados nas técnicas de termografia, extensometria e aplicação de termopares durante a furação dos materiais compósitos. Numericamente, são utilizados modelos teóricos, mecânico e térmico, com o recurso à técnica de elementos finitos, para a discussão de resultados.

Após a elaboração do presente trabalho conclui-se que a temperatura na broca é superior para uma menor velocidade de avanço. O aumento da velocidade de avanço provoca um decréscimo da temperatura, ou seja, as temperaturas no material são mais elevadas para uma velocidade de avanço inferior. Verificou-se ainda que as temperaturas nos termopares a uma mesma distância da furação são inferiores às temperaturas registadas em distâncias diferentes. Com a diminuição da temperatura as tensões também diminuem, isto é, para uma velocidade de avanço superior as tensões à superfície do material e próximas da furação são inferiores.

**Palavras-Chave:** Temperatura, Deformações, Termografia, Extensómetros, Termopares, Elementos finitos.



# Abstract

The primary main objective of this study is to assess the development of thermal necrosis and / or bone wear during a drilling process in composite materials with similar structure to the cortical bone. The working steps include the reading of the temperature field in the biomechanical models through a drilling process, the strain field by using strain gages, temperature reading generated in the drill after drilling the process through and thermographic images collected by thermal analysis and a mechanical analysis using from a finite element model. Considerations have been taken on the choice of biomaterials, model dimensions, and drilling process taking into account several variables such as speed, diameter and length of the drill. This work intends to verify, experimental and numerically, the interaction between the same feed rate and different rotational speeds, with the same cut drill, in the tissue temperature and strain field formation. To this end, composite materials are used with similar characteristics to the cortical bone, with equal densities. The experimental methods used in the laboratory are based on thermography techniques, thermocouples and strain gages used during the drilling of different composite materials. Numerically, theoretical models are used with the finite element technique for the discussion of results.

After the preparation of this work is concluded that the temperature in the drill is higher to a lower feed rate. The increase in feed rate causes a decrease in the temperature, i.e., temperatures of the material are higher to a lower feed rate. The temperatures in the thermocouples at the same distance from the hole are lower than the temperatures recorded at different distances. It was found that with decreasing temperature, the stress also decreases, i. e., to a higher feed rate, the surface and the hole surrounding have lower stresses.

**Keywords:** Temperature, Strain, Thermography, Extensometers, Thermocouples, Finite elements.



# Conteúdo

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iii</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vii</b>
<b>Conteúdo .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de abreviaturas.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução .....	1
1.1 Contextualização e Objetivos .....	1
1.2 Organização dos Capítulos .....	2
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>3</b>
Revisão Bibliográfica .....	3
2.1 Tecido ósseo .....	3
2.2 Propriedades térmicas do osso cortical.....	4
2.3 Comportamento mecânico do osso.....	5
2.4 Envelhecimento do osso .....	6
2.5 Processo de furação .....	6
2.5.1 Geração de calor no osso devido à deformação plástica.....	6
2.5.2 Geração de calor no osso devido a fricção .....	7
2.6 Fatores que afetam a geração de calor.....	8
2.6.1 Tempo de exposição.....	8
2.6.2 Temperatura inicial da broca.....	8
2.6.3 Efeito da velocidade de avanço .....	9

2.6.4	Efeito da velocidade de rotação .....	9
2.6.5	Efeito do arrefecimento com irrigação .....	10
2.6.6	Efeito da condição da broca .....	11
2.6.7	Efeito do ângulo da hélice da broca .....	11
2.7	Extensometria.....	12
2.7.1	Extensómetros .....	12
2.7.2	Tipos de extensómetros .....	14
2.7.3	Critério de seleção dos extensómetros .....	15
2.7.4	Sistema de medição .....	15
2.7.5	Definições das grandezas utilizadas na extensometria.....	16
2.7.5.1	Deformação .....	16
2.7.5.2	Tensão.....	17
2.7.5.2.1	Tensão de corte .....	18
2.7.5.2.2	Tensões residuais e térmicas .....	18
2.7.6	Circuitos elétricos utilizados na extensometria.....	18
2.7.6.1	Circuito potenciómetro .....	19
2.7.6.2	Ponte de Wheatstone .....	19
2.7.7	Lei de Hooke para a determinação das tensões mecânicas .....	21
<b>Capítulo 3</b>	.....	<b>23</b>
	Desenvolvimento de um modelo experimental .....	23
3.1	Material e métodos .....	23
3.2	Resultados.....	29
3.2.1	Análise da temperatura na broca .....	29
3.2.2	Análise da temperatura no material.....	31
3.2.3	Análise das deformações no material.....	32
3.2.4	Comparação das deformações com a temperatura .....	34

<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>35</b>
Desenvolvimento de um modelo numérico .....	35
4.1 Propriedades térmicas dos materiais.....	35
4.2 Parâmetros da furação .....	36
4.3 Análise térmica .....	37
4.4 Análise mecânica .....	39
4.5 Análise dos resultados numéricos vs. experimentais.....	40
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>43</b>
Conclusões e trabalhos futuros .....	43
5.1 Conclusões.....	43
5.2 Trabalhos Futuros .....	44
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>45</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>49</b>
Anexo A: Desenho SolidWorks.....	49
Anexo B: Imagens termográficas da componente experimental, Bloco 3.....	51
Anexo B: Imagens termográficas da componente experimental, Bloco 4.....	52
Anexo C: Dados dos termopares durante as furações, Bloco 3 .....	53
Anexo C: Dados dos termopares durante as furações, Bloco 4 .....	55
Anexo D: Tensões obtidas com os extensômetros, Bloco 3 .....	57
Anexo D: Tensões obtidas com os extensômetros, Bloco 4 .....	58
Anexo E: Relação Tensão/Profundidade, Bloco 3.....	59
Anexo E: Relação Tensão/Profundidade, Bloco 4.....	60
Anexo F: Componente térmica e mecânica para diferentes tempos, Bloco 3 .....	61
Anexo F: Componente térmica e mecânica para diferentes tempos, Bloco 4 .....	62



## Lista de Abreviaturas

<i>BL3</i>	Bloco 3
<i>BL4</i>	Bloco 4
CNC	Máquina de Controlo Numérico Computorizada
<i>d</i>	diâmetro
<i>F<sub>fw</sub></i>	Força de corte
<i>J</i>	Joule
<i>K</i>	Kelvin
<i>kg</i>	Quilograma
<i>m</i>	Metros
<i>mm</i>	Milímetros
<i>min</i>	Minutos
<i>mV</i>	Milivoltes
<i>M<sub>w</sub></i>	Momento torsor
<i>n</i>	velocidade de rotação
<i>N</i>	Newton
<i>P<sub>c</sub></i>	Potência total de corte
<i>P<sub>f</sub></i>	Potência derivada da força de corte
<i>P<sub>M</sub></i>	Potência derivada da torção ao corte
<i>q</i>	Fluxo de calor
<i>rot</i>	rotações
<i>rpm</i>	rotações por minuto
<i>s</i>	Segundos
<i>V</i>	Volume
<i>V<sub>f</sub></i>	Velocidade de corte
<i>W</i>	Watt
<i>3D</i>	Tridimensional



# Lista de tabelas

Tabela 1: Parâmetros de furação utilizados.....	25
Tabela 2: Etiquetagem dos termopares .....	26
Tabela 3: Etiquetagem dos extensómetros. ....	27
Tabela 4: Parâmetros da câmara termográfica. ....	28
Tabela 5: Temperaturas na broca antes e após o processo de furação. ....	29
Tabela 6: Tensões normais médias (MPa) obtidas experimentalmente .....	33
Tabela 7: Tensões normais máximas (MPa) obtidas experimentalmente.....	33
Tabela 8: Propriedades térmicas do osso.....	36
Tabela 9: Propriedades térmicas dos materiais ósseos e do aço. ....	36
Tabela 10: Propriedades mecânicas dos materiais ósseos e do aço. ....	36
Tabela 11: Parâmetros utilizados na furação.....	37
Tabela 12: Fluxo de calor e temperatura inicial do modelo. ....	37
Tabela 13: Tensões normais médias (MPa) obtidas experimentalmente e numericamente. .....	42



# Lista de figuras

Figura 1 - Representação da localização do tecido ósseo cortical e esponjoso, [1].	3
Figura 2 - Esquema representativo da distribuição e localização na matriz óssea das células da linha osteoblástica, [2].	4
Figura 3 - Curva tensão-deformação no osso, [8].	5
Figura 4 - Diagrama de dois corpos em contacto, com a fricção e forças normais, [17].	7
Figura 5 - Variação da temperatura com o tempo para várias temperaturas de broca iniciais, [20].	8
Figura 6 - Formato da broca e a sua zona de folga, [22].	11
Figura 7 - representação esquemática de um extensómetro, [28].	13
Figura 8 - Diagrama do sistema de medição de deformações através de extensómetros, [27].	16
Figura 9 - Mudança absoluta positiva e negativa do comprimento, [29].	17
Figura 10 - Tensões normais de compressão e tração, [31].	188
Figura 11 - Formação da tensão de corte, [32].	18
Figura 12 - O circuito potenciométrico, [34].	19
Figura 13 - O circuito da ponte de Wheatstone, [27].	20
Figura 14 - Blocos da <i>Sawbones</i> , da esquerda para a direita: BL3 e BL4.	23
Figura 15 - Termopares tipo K e extensómetro.	23
Figura 16 - Sistema de aquisição de dados (MGC Plus e Spider 8).	24
Figura 17 - Esquema experimental.	24
Figura 18 - Caixa das brocas utilizadas e determinação do ângulo da broca.	24
Figura 19 - Esquema do procedimento de furação.	25
Figura 20 - Máquina CNC e monitor.	26
Figura 21 - Termopares ligados ao bloco.	26
Figura 22 - Posicionamento dos extensómetros no bloco e distância entre o extensómetro e o furo.	27
Figura 23 - Câmara termográfica (Flir® T365).	28
Figura 24 - Temperatura na broca antes (imagem da esquerda) e após (imagem da direita) a furação do material.	29
Figura 25 - Resultados comparativos da temperatura da broca entre o bloco 3 e o bloco 4.	30
Figura 26 - Variação de temperatura no osso com os dados dos termopares para o bloco 3 lado A e B (25mm/min).	31
Figura 27 - Variação de temperatura no osso obtidos com os termopares para o bloco 4 lado A e B (75mm/min).	32
Figura 28 - Variação da tensão em relação à profundidade para o extensómetro EF1 de ambos os blocos (BL3 e BL4).	34
Figura 29 – Elemento Solid 70 e Solid 185, [35].	35
Figura 30 - Modelo numérico de um furo com a respetiva malha.	37

Figura 31 – Resultados das temperaturas: a) Bloco 3 Lado A e B; b) Bloco 4 Lado A e B. ....	38
Figura 32 - Variação de temperatura no osso obtidos com os dados numéricos no bloco 3 lado A e B (25mm/min). .	38
Figura 33 - Variação de temperatura no osso obtidos com os dados numéricos no bloco 4 lado A e B (75mm/min). .	39
Figura 34 – Resultados das tensões: a) Bloco 3 Lado A e B; b) Bloco 4 Lado A e B. ....	40
Figura 35 - Resultados experimentais e numéricos da temperatura no material para o bloco 3 lado A.....	40
Figura 36 - Resultados experimentais e numéricos da temperatura no material para o bloco 3 lado B.....	41
Figura 37 - Resultados experimentais e numéricos da temperatura no material para o bloco 4 lado A.....	41
Figura 38 - Resultados experimentais e numéricos da temperatura no material para o bloco 4 lado B.....	41



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização e Objetivos

A ciência e a tecnologia aplicadas à saúde são uma área que está sempre em constante desenvolvimento e têm por objetivo melhorar a qualidade de vida dos seres humanos. Ao longo dos anos a tecnologia existente tem evoluído e proporcionado novos estudos e técnicas, *in vivo* e *in vitro*, de forma a melhorar os avanços que a ciência proporciona.

Segundo as leis da termodinâmica, os materiais com diferentes temperaturas transferem energia entre si de maneira a atingirem o equilíbrio térmico. Esta transmissão de calor pode ocorrer de três formas distintas – condução, convecção e radiação. O processo de furação provoca um aquecimento por condução no tecido ósseo adjacente, através de um fluxo de calor gerado pela passagem da broca. Este fluxo de calor é a condição fronteira térmica que será considerada na análise do problema em estudo.

O trabalho apresentado neste estudo tem como objetivo avaliar as temperaturas e as deformações desenvolvidas em materiais compósitos, com propriedades similares ao tecido ósseo, devido a processos de furação. O trabalho apresentado é o seguimento de estudos de investigação nesta área, por Sampaio C. [1], Silva J. [2], Fernandes [3], Fernandes [4], com incidência principal na utilização de diferentes parâmetros de furação, utilização de técnicas experimentais adicionais e ainda modelo numérico térmico e mecânico. Este trabalho será então desenvolvido em contexto experimental e numérico, utilizando-se materiais compósitos. Os resultados obtidos pelos modelos experimentais serão comparados com os resultados teóricos utilizando o método dos elementos finitos.

Os principais objetivos a alcançar com a realização deste trabalho são:

- Avaliação de temperaturas e deformações no osso cortical durante processos de furação;
- Compreender os resultados obtidos pela aplicação de modelos numéricos e experimentais.

## 1.2 Organização dos Capítulos

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos e seis anexos. Os dois primeiros capítulos são introdutórios para integração do tema. Os restantes capítulos tratam do trabalho realizado e das conclusões obtidas.

No **Capítulo 1** é efetuada uma contextualização geral do tema a ser abordado e estão também presentes os objetivos a cumprir.

No **Capítulo 2** está presente o estado da arte, onde é possível ter um enquadramento teórico bem como conhecimento de alguns trabalhos elaborados nesta área.

No **Capítulo 3** encontra-se a componente experimental onde são apresentados os materiais e os diferentes métodos utilizados. Estão também presentes os resultados obtidos experimentalmente.

O **Capítulo 4** refere-se à componente numérica onde estão apresentadas as propriedades térmicas dos materiais, os parâmetros da furação em contexto numérico e a análise térmica e mecânica para os diferentes modelos.

Finalmente, no **Capítulo 5** encontram-se as conclusões retiradas após a elaboração deste trabalho e possíveis trabalhos futuros.

Relativamente aos anexos, no Anexo A está presente o desenho elaborado em SolidWorks, utilizado na furação dos blocos. No Anexo B encontram-se as imagens termográficas obtidas na componente experimental. No Anexo C estão presentes os gráficos referentes aos dados dos termopares durante as furações dos dois blocos. No Anexo D, encontram-se os gráficos referentes as tensões obtidas com os extensómetros. No Anexo E, encontram-se os gráficos referentes a relação tensão/profundidade. Por ultimo, no Anexo F, encontram-se os resultados numéricos das componentes térmica e mecânica.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 Tecido ósseo

O tecido ósseo é o principal componente do esqueleto humano. É dos tecidos mais rígidos e resistentes do corpo humano. O tecido ósseo pode ser classificado como esponjoso ou trabecular e cortical ou compacto, com base na sua organização estrutural, Figura 1 [5].

O tecido ósseo cortical e o tecido ósseo esponjoso possuem os mesmos elementos constitutivos quanto a células e matriz óssea tendo, no entanto, importantes diferenças estruturas funcionais. A superfície de corte do tecido ósseo compacto aparece sólida e bastante homogênea, ao passo que a do tecido ósseo esponjoso tem a aparência de uma esponja, contendo trabéculas, ou seja espaços ociosos [5].

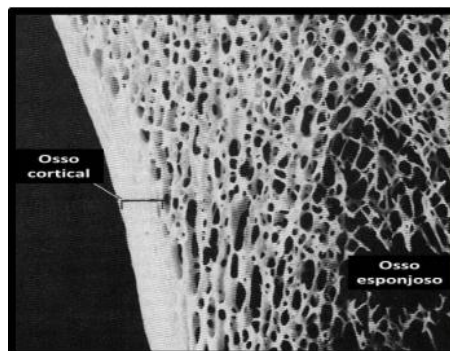


Figura 1 - Representação da localização do tecido ósseo cortical e esponjoso, [5].

O tecido ósseo é, sob um ponto de vista celular, constituído por duas linhas celulares. As populações de células assumem diversas formas e designações, com base na sua diferente morfologia, atividade e localização em relação à matriz calcificada. Estas células podem ser agrupadas em duas séries diferentes: células da linha osteoblástica, responsáveis pelo processo de formação da matriz óssea e células da linha osteoclástica, relacionadas com a sua reabsorção [5].

O osso é constituído aproximadamente por 70% de minerais, 20% de matriz orgânica e cerca de 10% de água, o que diferencia de outros tecidos conjuntivos menos rígidos. A matriz mineral ou inorgânica é formada predominantemente por cálcio, na forma de

cristais de hidroxiapatita, constituindo aproximadamente 60 a 70% do peso do osso e sendo responsável pelas propriedades de rigidez e resistência à compressão. Da matriz orgânica fazem parte 90% de colagénio e 10% de várias proteínas não colagénicas. A componente orgânica oferece ao osso flexibilidade e elasticidade [6].

A população de células que inclui osteoblastos, osteoclastos e células de revestimento encontram-se a superfície do tecido ósseo enquanto os osteócitos encontram-se dentro da matriz mineralizada, Figura 2.

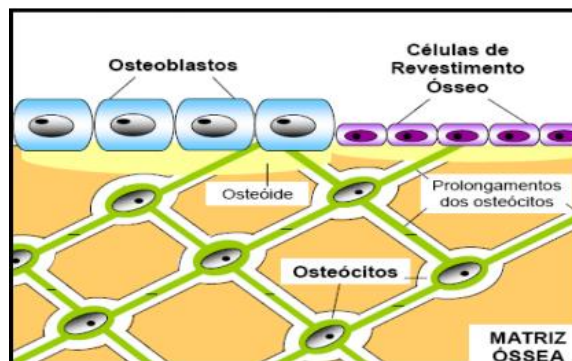


Figura 2 - Esquema representativo da distribuição e localização na matriz óssea das células da linha osteoblástica, [6].

Os osteoblastos encontram-se presentes na superfície do osso perióstee e são células diferenciadas que produzem a matriz óssea mineralizada, participam na calcificação e reabsorção óssea e regulam o fluxo de cálcio e fosfato dentro e fora do osso. Os osteoclastos têm a função contrária, ou seja têm como função reabsorver e degradar o tecido ósseo.

Por fim, os osteócitos desempenham uma função essencial na remodelação e na renovação do tecido ósseo, estes provêm de osteoblastos e podem ser observados nas superfícies ósseas, principalmente no endóstee e, ocasionalmente, na superfície do perióstee [5], [6].

## 2.2 Propriedades térmicas do osso cortical

As propriedades do osso necessárias neste estudo são as propriedades mecânicas e térmicas. Ambas são difíceis de obter, a dificuldade provém da grande variação das propriedades de pessoa para pessoa, dependendo da idade, género e patologias associadas [7]. As propriedades do osso não são uniformes uma vez que existem dois tipos de osso. A porosidade média do osso cortical é de 3.5% e a do osso trabecular é de 79.3% [8].

O tecido ósseo não sendo isotrópico, pode ser assumido como tal baseado no modelo experimental de investigação da condutividade efetuada por Davidson e James [9], que mostraram que as variações na condutividade não são mais do que 10% em direções diferentes.

As propriedades térmicas podem ser estimadas de acordo com certos parâmetros [10]:

- Calor específico: A energia necessária para elevar a temperatura de um material a 1°C. Para maior precisão, pode ser indicada por unidade de volume ou unidade de massa e, neste caso, chama-se calor específico. A capacidade térmica específica do osso é de 1256 J/kgK.
- Condutividade térmica: É a quantidade de calor conduzida através de um material por unidade área, por unidade Kelvin e por unidade de comprimento de transferência de calor. A condutividade térmica do osso é 0.4 W/mK .

### 2.3 Comportamento mecânico do osso

Quando um esforço relativamente pequeno é aplicado sobre um determinado material, este será deformado e o trabalho realizado é armazenado como energia. Se a carga é removida, o material recupera as suas dimensões originais usando a energia armazenada. Esta energia comporta-se como a energia potencial ou energia de deformação elástica. Se a carga aplicada for superior, o material recupera as suas dimensões originais após remoção da carga, e a energia armazenada será dissipada. Se a tensão obtida for superior à tensão de rutura, a energia total armazenada será convertida em calor e outras formas de energia, e o material não retoma as suas dimensões iniciais [11]. A Figura 3 representa o comportamento mecânico do tecido ósseo sob tensão na região elástica e plástica.

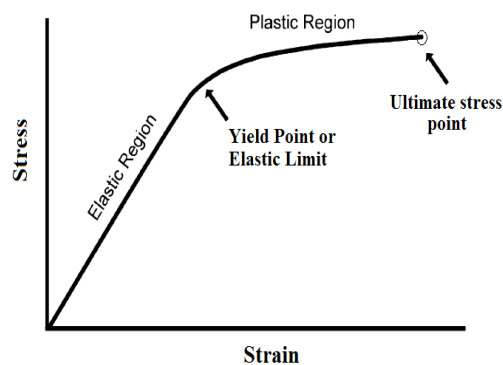


Figura 3 - Curva tensão-deformação no osso, [11].

## **2.4 Envelhecimento do Osso**

O tecido ósseo fica mais duro e quebradiço com a idade. Isso significa que a capacidade do osso absorver energia é reduzida com o aumento da idade [12]. De acordo com experiências realizadas por Burstein et al, [13] concluiu que o tecido ósseo jovem pode suportar o dobro da carga que pode ser suportada pelo osso envelhecido, apresenta maior ductilidade e, conseqüentemente, mais capacidade de armazenamento de energia.

O osso menos denso é mais frágil do que o osso normal. Fatores como gênero, idade, sedentarismo, desuso e deficiência de cálcio degradam as propriedades do osso e as suas capacidades em suportar as cargas aplicadas [14].

## **2.5 Processo de furação**

Durante a perfuração no tecido ósseo, dois processos principais ocorrem, o corte do tecido ósseo pelas arestas da broca de perfuração e a fricção gerada entre o material da broca e o osso. Ambos estes processos causam geração de calor no tecido ósseo.

O calor gerado é parcialmente espalhado pelas aparas formadas, enquanto o restante calor contribui na elevação da temperatura do osso. O aumento da temperatura no osso não pode ser dissipado num curto período de tempo devido à baixa condutividade do tecido ósseo [14].

Estes processos têm efeitos negativos sobre o tecido ósseo, de acordo com pesquisas realizadas por Hillery et al, [15], a necrose pode ser undíssonas se o osso for exposto mais de 30s a temperaturas superiores a 50°C. Sousa et al, [16], estabeleceram que quando as células epitélíio são expostas a uma temperatura de 70°C, estas são danificadas imediatamente, assim como expostas a uma temperatura de 55°C durante 30s, e que o resultado será o mesmo se o osso estiver a uma temperatura de 45°C durante 5h.

### **2.5.1 Geração de calor no osso devido à deformação plástica**

No processo de corte, a força aplicada pela ferramenta deve ultrapassar a resistência de corte do material a ser cortado, isto vai gerar calor no material e resultar numa deformação e mudança térmica na zona de esforço. A temperatura nas zonas de corte são afetadas pela relação tensão-deformação do material. A deformação plástica é a mudança

irreversível das dimensões de um objeto sobre carga. Se a tensão aplicada no material é relativamente baixa, a deformação pode ser reversível após a remoção da tensão, enquanto que se a tensão for superior ao limite elástico, irá haver deformação plástica e esta não é reversível [16].

### 2.5.2 Geração de calor no osso devido à fricção

A outra fonte principal de geração de calor durante a perfuração é o atrito entre o trabalho da peça e a ferramenta de perfuração.

Quando dois objetos estão em contacto e um desliza sobre o outro, a produção de uma força resistente ao deslizamento é chamada de atrito. O principal modelo para as forças de atrito é a lei de atrito de Coulomb que pode ser resumida pela seguinte equação

$$F = \mu \times F_n \quad (1)$$

O atrito é independente da área de contacto. Como representado na Figura 4, a direção da força  $F$  no corpo A é no sentido oposto ao da velocidade de deslizamento de A em relação a B. A força de atrito  $F$  é proporcional à força normal com a constante de proporcionalidade  $m$ . A constante  $m$ , coeficiente de atrito, é assumida como sendo independente da área de contacto entre os corpos A e B [18].

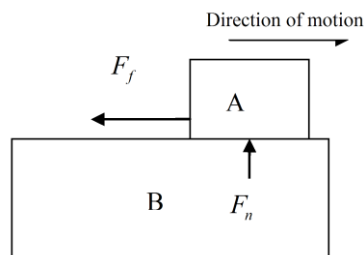


Figura 4 - Diagrama de dois corpos em contacto, com a fricção e forças normais, [18].

Devido ao processo de furação e conseqüente aquecimento, uma zona necrótica será formada na zona adjacente ao local da furação, segundo Matthews e Hirsh, [19], a amplitude dessa zona necrótica dependerá, principalmente, do calor de fricção gerado pelo contacto da broca com o osso durante as cirurgias.

## 2.6 Fatores que afetam a geração de calor

### 2.6.1 Tempo de exposição

A taxa de transferência de calor depende do gradiente de temperatura entre os dois locais, um de alta temperatura para um local próximo de baixa temperatura. O calor flui a partir da temperatura alta para a temperatura baixa até que o equilíbrio ocorra e a temperatura fique igual em ambos os locais. Durante o processo de furação a transferência de calor ocorre entre a interface da broca e o tecido ósseo. O equilíbrio não será atingido porque a duração da furação é relativamente curta, isso significa que o calor gerado no local da furação depende também da duração do processo de furação [10]. Diferentes estudos mostram variações de temperaturas de limiar da necrose térmica, tal como 47°C [18], 50°C [21], 55°C [15]. A razão desta variação deve-se à diferença entre as durações do tempo de furação nas experiências.

### 2.6.2 Temperatura inicial da broca

A geração de calor devido á furação no osso é afetada pela temperatura inicial da broca. A temperatura inicial da broca pode ainda ser elevada após o tempo de arrefecimento [22]. Foram realizadas simulações por Yuan Kun-Tu et al, [22], usando quatro temperaturas iniciais, 30, 35, 40 e 67 °C. Os restantes parâmetros foram considerados constantes durante o processo de furação. A Figura 5 representa as variações na temperatura do osso em relação ao tempo de furação, em relação a quatro temperaturas iniciais da broca.

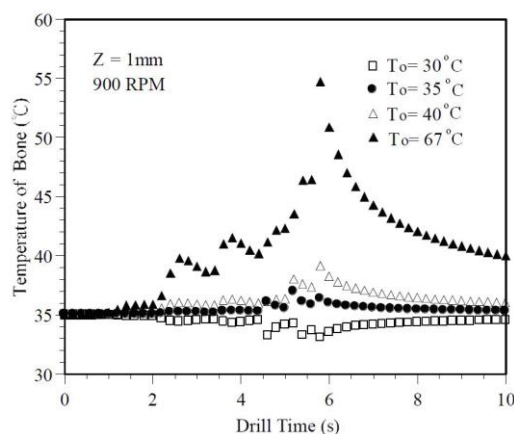


Figura 5 - Variação da temperatura com o tempo para várias temperaturas de broca iniciais, [22].

Os resultados das simulações mostram que a temperatura do osso circundante ao local da perfuração é drasticamente afetada pela temperatura inicial da broca, como se mostra na Figura 5, logo é recomendado arrefecer a broca antes de realizar a furação.

### 2.6.3 Efeito da velocidade de avanço

Uma das variáveis testadas neste trabalho foi a velocidade de avanço, com o objetivo de verificar a influência da sua alteração na temperatura do material e da broca. A velocidade de avanço é a velocidade de inserção da ferramenta de perfuração no interior do tecido em  $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$ . Alguns investigadores afirmam que o aumento da temperatura é inversamente proporcional à velocidade de avanço, ou seja, se a velocidade de avanço aumenta a temperatura diminui e vice-versa [10]. Com o aumento da velocidade de avanço é alcançado um menor tempo de furação e assim, menor transferência de calor para o osso. Por outro lado, com a maior força axial aplicada durante a furação no osso aumenta o atrito, o que poderia levar ao aumento de temperatura e falha da broca [20].

Augustin et al., realizaram ensaios de furação em material semelhante ao osso cortical. O objetivo foi avaliar a influência das várias variáveis na temperatura da broca e do osso. Mantendo a velocidade de rotação e alterando a velocidade de avanço. Concluíram, que uma maior velocidade de avanço provoca um decréscimo da temperatura [20].

Shin e Yoon, [23], concluíram que com a velocidade de avanço superior a temperatura máxima é reduzida.

Ao estudar os efeitos da velocidade de avanço dois fatores devem ser considerados, a força que pode causar aumento da deformação e que leva ao aumento da temperatura e a curto tempo de furação, que causa menos dano no tecido ósseo [9].

### 2.6.4 Efeito da velocidade de rotação

As principais causas da geração de calor no tecido ósseo durante a perfuração são, o corte do tecido ósseo pelas arestas de corte da broca e o atrito entre a broca e o tecido ósseo. Os resultados do estudo de Mathews et al [19], mostraram que a geração de calor aumenta com o aumento da velocidade de perfuração, para baixas velocidades (300 a 700 rpm), isto deve-se ao aumento da velocidade de corte.

Por outro lado, os resultados dos estudos de Krause et al [24], mostraram que a temperatura diminui com o aumento da velocidade de perfuração, em alguns tipos de brocas, e o aumento da temperatura com o aumento da velocidade de perfuração em outros tipos de brocas. Eles concluíram que o efeito da velocidade de avanço é mais significativo do que o efeito da velocidade de rotação.

Alguns dos estudos podem não ser muito precisos, uma vez que a velocidade de rotação da broca num estado livre (sem perfuração) é diferente da velocidade de rotação durante a perfuração, a menos que o binário seja suficientemente elevado para manter a velocidade de rotação constante [10].

A velocidade de rotação também pode ser afetada pela força de impulso aplicada, como concluíram Davidson e James [9], descobriram que as velocidades de rotação podem por vezes ser 50% menores do que na realidade se for aplicada uma força de alta pressão, isso significa que as velocidades de rotação aparentes não são sempre as velocidades durante o processo de perfuração [22].

Bachus et al [21] e Tu et al [22], concluíram que a perfuração com uma velocidade de rotação elevada e forças axiais elevadas iriam reduzir a temperatura do osso, isto porque a duração da perfuração será reduzida.

Em geral, os trabalhos sobre o efeito da velocidade de rotação sobre a temperatura no tecido ósseo indicam que o pico de temperatura diminui com o aumento da velocidade de rotação. Estudos que indicam o contrário são questionados pelos próprios autores, indicando como solução o facto do modelo utilizado ter sido demasiado simples [9].

#### 2.6.5 Efeito do arrefecimento com irrigação

O uso de líquidos de arrefecimento pode minimizar a elevação da temperatura durante a perfuração óssea, mantendo assim o local de perfuração a temperaturas seguras [25]. Existem dois tipos de irrigação, a irrigação manual em que os líquidos de arrefecimento são adicionados manualmente e a irrigação através da ferramenta de furação. Mathews e Hirish analisaram os dois métodos de irrigação, verificando que o arrefecimento manual provoca diminuição nas temperaturas de 65 para 45°C, enquanto a irrigação através da ferramenta, apenas é eficaz quando o líquido de refrigeração for injetado a uma velocidade de 500 ml/min ou superior, sendo aí possível manter a temperatura inferior a 50°C. Concluíram que a irrigação manual provoca grande redução da temperatura e a

irrigação pela ferramenta apenas é eficaz se o refrigerante é injetado a velocidades relativamente elevadas [19].

#### 2.6.6 Efeito da broca

O estado em que se encontra a broca é muito importante, uma vez que se estiver degradada vai interferir nas variáveis a testar. De acordo com os ensaios efetuados por Mathews e Hirsch [19], o calor gerado devido à furação é aumentado se as arestas de corte da broca não estiverem afiadas o suficiente, recomendando que a broca seja afiada após o uso na furação de vários furos. Brocas desgastadas aumentam a temperatura do local de furação devido à longa duração da furação utilizando brocas sem capacidade de corte.

O bloqueio da zona de folga da broca é outra das causas que reduz a sua eficiência. Natalim et al. [26], compararam brocas padrão com e sem as folgas bloqueadas, e concluíram que as temperaturas máximas são muito mais elevadas quando se utiliza brocas com folgas bloqueadas, sendo que o tempo de furação iria também aumentar. A função da folga da broca é para remover a aparatura originária do material, Figura 6.

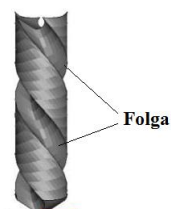


Figura 6 - Formato da broca e a sua zona de folga, [19].

#### 2.6.7 Efeito do ângulo da hélice da broca

O principal fator que afeta a geração de calor relacionada com as dimensões de furação é o diâmetro da broca, a área de corte é maior. O efeito do ângulo da hélice é pequeno de modo que pode ser negligenciado. A temperatura diminui com o aumento do ângulo da hélice, mas o efeito é pequeno em comparação com os outros fatores como a velocidade de avanço e a rotação [9].

Em 1996, Natalim et al., estudaram a distribuição da temperatura no fémur humano durante o processo de furação utilizando uma broca com um diâmetro de 2.5mm e

diferentes valores de ângulo de ponta ( $2k=90^\circ$  e  $2k=118^\circ$ ). O estudo foi realizado a uma velocidade de rotação constante 800rpm e os testes mostraram que o valor do ângulo da ponta afeta a distribuição das temperaturas. Com base nos estudos concluíram que as temperaturas mais baixas foram geradas por brocas com um ângulo  $2k=118^\circ$  [26].

## 2.7 Extensometria

A extensometria é uma técnica que permite determinar o estado de deformação num ponto de um corpo, a partir do conhecimento das extensões em várias direções, [27].

As avaliações dos esforços baseiam-se nas descobertas de *Robert Hooke* (1678), que relacionam os esforços aplicados, através da tensão gerada no material  $\sigma$ , com a deformação resultante  $\epsilon$ . É utilizada a Lei de Hooke :

$$(\sigma = E \cdot \epsilon) \quad (2)$$

Sendo: E o módulo de elasticidade do material.

Diversos procedimentos e equipamentos foram criados com o intuito de medir as deformações. Os primeiros aparelhos eram essencialmente mecânicos, apresentando limitações e erros de medição. Com a evolução da eletrônica, constatou-se que os efeitos da variação da resistência de um condutor elétrico causada pela aplicação de uma tensão mecânica (*Charles Wheatstone* – 1843) poderiam ser utilizados para esse fim. Mais tarde *William Thomson* (1856) conseguiu medir esse efeito. Estudos e protótipos posteriores realizados por *Eduard E. Simons* e *Artur Claude Ruge*, desenvolveram os primeiros extensómetros de resistência elétrica [28].

### 2.7.1 Extensómetros

Extensómetros são utilizados para medir deformações em diferentes estruturas.. É necessário a utilização de um conjunto de aparelhos para transformar a deformação obtida pelo extensómetro em informações concretas. Além disso, essas deformações medidas são normalmente pequenas, produzindo variações no sinal elétrico nas mesmas proporções, não podendo ser lidas diretamente, logo é necessário recorrer a um sistema de medição.

Os extensômetros têm várias características, sendo estas resumidas nos seguintes pontos:

- Alta precisão de medição;
- Pequeno tamanho e peso;
- Fácil utilização;
- Excelente linearidade;
- Medições possíveis dentro de uma ampla faixa de leitura;
- Usados como elementos transdutores para medida de várias quantidades físicas (Força, pressão, torque, aceleração, deslocamento);
- Medição em locais remotos.

Na sua forma mais simples, um extensômetro elétrico de resistência é constituído por um fio muito fino (grelha) colado sobre uma folha também fina designada por suporte do extensômetro, e disposto da forma indicada esquematicamente na figura 7, isto é, a maior parte do comprimento do fio é distribuído segundo uma direção fixa, designada por  $x$ . Os terminais permitem a soldadura dos cabos de ligação ao instrumento de leitura. As medidas de deformação assumem que a extensão decorrente no objeto é transferida sem perdas para o extensômetro, devendo existir uma ótima aderência entre eles. As medições dão-se nas partes externas da peça, pois o extensômetro normalmente é aplicado na superfície. Normalmente os extensômetros estão feitos para ter uma resistência de  $120\Omega$ , mas existem extensômetros disponíveis com resistências de  $350\Omega$ ,  $500\Omega$ ,  $1000\Omega$  [28].

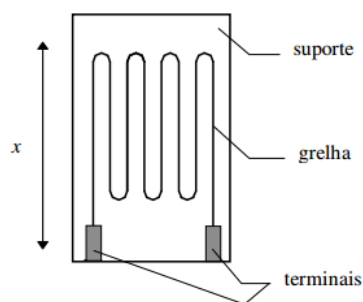


Figura 7 - representação esquemática de um extensômetro, [29].

O extensômetro exibe uma mudança de temperatura devido á deformação nele causado, assim como a resistência também é alterada pela mudança de temperatura. Existem diferentes métodos de medição para eliminar estes efeitos, mas muitos dos

extensômetro disponíveis hoje em dia apresentam uma auto-compensação, para eliminarem os efeitos da temperatura [29].

### 2.7.2 Tipos de extensômetros

Existem vários tipos de extensômetros com diferentes características, como por exemplo o comprimento de medição, configurações e posições para as conexões. Os extensômetros são classificados em relação ao seu tipo, entre eles os materiais resistivos, o material base e a configuração.

- Classificação de acordo com o material resistivo:
  - Fios resistivos;
  - Lâmina;
  - Semicondutor;
  - Semicondutor por difusão.
  
- Classificação de acordo com o material de base:
  - Base de papel;
  - Base de baquelita;
  - Base de poliéster;
  - Base de poliamida;
  - Outros (finalidades especiais).
  
- Classificação de acordo com a sua configuração:
  - Uniaxiais;
  - Biaxiais;
  - Múltiplos eixos (roseta);
  - Padronização especial.

Os extensômetros tipo lâmina são os mais utilizados e são feitos com técnicas de circuito impresso, normalmente sobre substratos de plástico ou papel. Isso deve-se ao grande desenvolvimento que sofreram as técnicas de circuito impresso, o material

resistivo possui alguns micra de espessura e está depositado num material eletricamente isolado, chamado base [29].

### 2.7.3 Critérios de seleção dos extensómetros

Existe uma grande variedade de extensómetros sendo necessário seguir critérios de seleção, para auxiliar a prevenir erros e obter melhores resultados. Na escolha do tipo de extensómetro a utilizar, é necessário ter em atenção algumas características, tais como:

- Condições mecânicas no ponto de medição:
  - Estado de tensão: uniaxial, biaxial, triaxial;
  - Topografia do campo de tensão: determinação da média;
  - Tipo de carregamento: estático ou dinâmico.
  
- Condições ambientais:
  - Duração da medição;
  - Temperatura;
  - Efeitos de distúrbios.
  
- Condições elétricas no ponto de medição:
  - Circuito de medição: ponto de Wheatstone;
  - Fonte de voltagem: direta, alternada, contínua;
  - Cabeamento: comprimento, isolamento, resistência.
  
- Condição de aplicação:
  - Material a ser ensaiado;
  - Aplicação do extensómetro.

### 2.7.4 Sistema de medição

Os extensómetros permitem obter as leituras das deformações que ocorrem numa peça, normalmente muito pequenas, produzindo variações no sinal elétrico nas mesmas

proporções, não podendo ser lidas diretamente, sendo necessário recorrer a um sistema de medição.

Os extensômetros são colocados em circuito elétrico, ponte de Wheatstone, capaz de realizar a medição de variação de resistências elétricas. A ponte de Wheatstone pode ser de diversas formas ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ , ponte completa e  $\frac{1}{2}$  ponte diagonal) dependendo do número de extensômetros utilizados. O circuito é alimentado por uma corrente elétrica, através de uma fonte de energia. A variação da resistência elétrica do extensômetro, devido à deformação ocorrida na peça, provoca um desequilíbrio na ponte. Ocorre uma variação de tensão de saída da ponte, devido ao reequilíbrio da ponte, que passa por um amplificador de voltagem, e é lido numa placa de aquisição de dados. As informações registadas na placa são de tensão elétrica mV. Posteriormente estas informações podem ser processadas e transformadas em micro deformações, tensão, força, entre outras. O diagrama apresentado na Figura 8 é o esquema básico de um sistema de medição de extensômetro metálico de resistência variável [28].

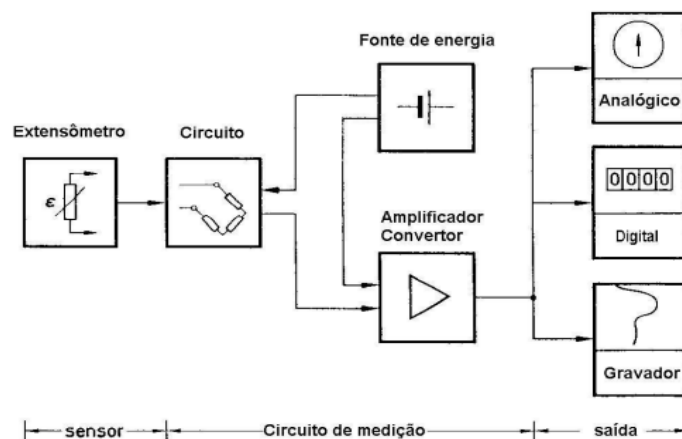


Figura 8 - Diagrama do sistema de medição de deformações através de extensômetros, [28].

## 2.7.5 Definições das grandezas utilizadas na extensometria

### 2.7.5.1 Deformação

Deformação é o alongamento de uma secção transversal de um determinado componente, que pode ser causada pelo efeito de uma força. A deformação é consequência de um carregamento mecânico ou térmico. Ou seja:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0} \quad (3)$$

A mudança absoluta de comprimento  $\Delta L$  é a diferença entre o comprimento  $L$  no momento da medição e o seu comprimento original  $L_0$ :  $\Delta L = L - L_0$ .

Esta alteração no comprimento pode ser positiva ou negativa como na Figura 9.

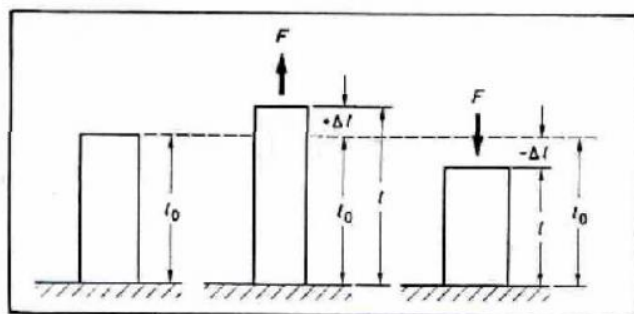


Figura 9 - Mudança absoluta positiva e negativa do comprimento, [30].

A deformação é definida como o quociente de uma mudança no comprimento e um comprimento de referência. A unidade no SI é o metro, mas como as mudanças no comprimento pode ser muito pequenas, esta é requer subdivisões padronizadas do metro, tais como o milímetro e o micro, por exemplo [31].

#### 2.7.5.2 Tensão

A tensão ocorre nos materiais devido à aplicação de uma força, ou devido aos efeitos das forças dentro de um material ou dentro de um sistema maior. As tensões podem ser do tipo normal, de corte, residuais e térmicas.

O símbolo para a tensão normal é “ $\sigma$ ” em [Pa], ou [N/m<sup>2</sup>]. Para a mesma força a tensão muda na proporção inversa da secção transversal. A tensão é expressa pelo quociente de uma força “ $F$ ” e a área “ $A$ ” da secção transversal do componente [32]:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (4)$$

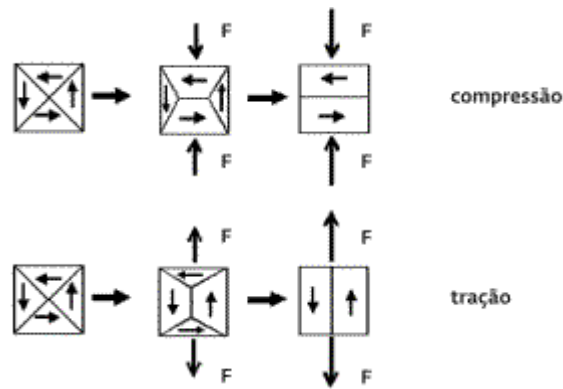


Figura 10 - Tensões normais de compressão e tração, [32].

### 2.7.5.2.1 Tensão de corte

Ao contrário das tensões normais, as tensões de corte acontecem com forças a atuar em direções opostas.

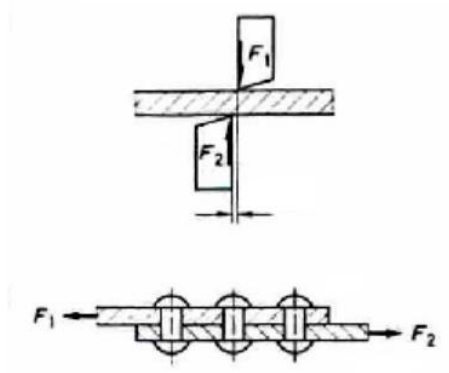


Figura 11 - Formação da tensão de corte, [33].

Se as forças forem tão elevadas que a resistência do material seja excedida, as partes vizinhas do material movem-se relativamente umas às outras [33].

### 2.7.5.2.2 Tensões residuais e térmicas

A grande diferença entre as tensões residuais e térmicas e as normais e de corte, é que ocorrem sem o envolvimento de qualquer tipo de força externa.

As tensões residuais surgem no material devido às forças de efeito interno. As tensões térmicas são um tipo de tensão residual, ocorrem em sistemas com diferentes expansões térmicas. Ambas as tensões afetam o material de forma similar a um carregamento comum, reduzindo a capacidade do mesmo sob a aplicação de forças externas [32].

## 2.7.6 Circuitos elétricos utilizados na extensometria

O extensómetro propriamente dito poderá ser encarado como uma simples resistência passiva, alimentado por uma fonte adequada. As variações de resistência causadas por deformações mecânicas do extensómetro são medidas num circuito do tipo potenciométrico ou ponte de Wheatstone, que produz um determinado sinal de saída em termos de diferença de potencial. Este sinal é amplificado, lido e/ou registado, depois de manipulado para representar diretamente as grandezas a ler.

### 2.7.6.1 Circuito Potenciómetro

O circuito do potenciómetro consiste basicamente numa fonte de alimentação  $V$  ligada a duas resistências em série  $R_1$  e  $R_2$ , conforme Figura 12.

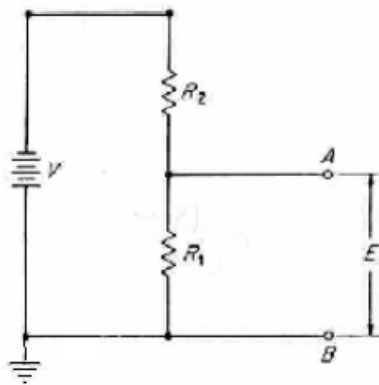


Figura 12 - O circuito potenciométrico, [35].

Para valores fixos nas resistências  $R_1$  e  $R_2$  no circuito, o potencial de saída “E” do circuito aberto é dado pela expressão:

$$E = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V \quad (5)$$

Se as resistências  $R_1$  e  $R_2$  sofrerem variações  $dR_1$  e  $dR_2$ , respetivamente, o potencial de saída varia para:

$$dE = \left[ \frac{R_1 + dR_2}{R_1 + dR_1 + R_2 + dR_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right] \times V \quad (6)$$

As equações (4) e (5) são as equações básicas que gerem o comportamento do circuito potenciométrico, e portanto podem ser utilizadas para estabelecer a aplicabilidade desse circuito para as medições extensométricas, [35].

### 2.7.6.2 Ponte de Wheatstone

Sir Charles Wheatstone (1802-1875), cientista inglês, criou em 1843 um circuito que tornou possível uma medição precisa das resistências elétricas. Esse circuito tornou-se conhecido como “circuito da ponte de Wheatstone”. Este pode ser utilizado para medir as resistências elétricas de diferentes formas, para a determinação do valor absoluto de uma resistência, por comparação com uma resistência conhecida e para a determinação das mudanças relativas na resistência. Este último método é utilizado nas técnicas de extensometria, isto porque possibilita a obtenção, com grande precisão, dos valores relativos das mudanças de resistência no extensômetro. O diagrama do circuito está representado na Figura 13. Os quatro braços do circuito são formados pelas resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ . Nos pontos B e D é conectada a voltagem entrada do circuito E. O sinal de resposta V dá-se nos pontos A e C [28].

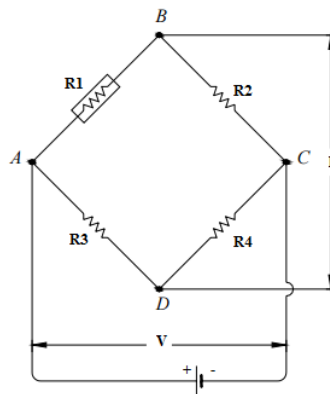


Figura 13 - O circuito da ponte de Wheatstone, [28].

A diferença de potencial na resistência  $R_1$  é

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V \quad (7)$$

Da mesma forma, a diferença do potencial na resistência  $R_4$  é

$$V_{AD} = \frac{R_4}{R_3+R_4} \times V \quad (8)$$

A diferença de potencial E da ponte, equivalente a  $V_{BD}$  é dada por

$$E = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD} \quad (9)$$

Substituindo as Equações (7) e (8) na Equação (9), e simplificando vem

$$E = \frac{R_1 \times R_3 - R_2 \times R_4}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)} \times V \quad (10)$$

A diferença de potencial E é zero, e a ponte diz-se em equilíbrio, quando

$$R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4 \quad (11)$$

Inicialmente a ponte encontra-se em equilíbrio antes das deformações serem aplicadas aos extensómetros na ponte. Alterando os valores das resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  por uma quantidade incremental  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$  e  $\Delta R_4$ . A tensão de saída  $\Delta E$  da ponte pode ser obtida através da seguinte equação

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1+R_2)^2} \times \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (12)$$

Lembrando que

$$\frac{\Delta R}{R} = K \times \varepsilon \quad (13)$$

Então

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{K}{4} \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (14)$$

A razão de se utilizar 120 ohms como a resistência mais usual, reside no facto de resistências menos elevadas provocarem sinais muito fracos para poderem ser medidos

com precisão, e resistências mais elevadas serem difíceis de isolar, além de mais frágeis uma vez que têm que ser feitas com fios bastantes mais finos [29], [30].

### 2.7.7 A lei de Hooke para a determinação das tensões

Para a deformação elástica dos materiais o método de cálculo das tensões baseia-se na lei de Hooke. Na sua forma mais simples, a lei de Hooke é expressa em  $\sigma = E \times \varepsilon$ .

Esta versão da lei de Hooke aplica-se ao estado de tensão uniaxial, para os estados de tensão biaxial e multiaxial são necessárias versões estendidas, cujas expressões são mais complexas e obtidas no campo da Resistência dos Materiais [28], [30].

Para o caso da extensometria o cálculo da tensão máxima é função do sinal medido por variação da resistência elétrica colada à superfície do furo, em que usando a lei de Hooke, se pode obter:

$$\sigma_{max} = E \times \varepsilon = E \times \left( 4 \times \frac{1}{G} \times \frac{V}{E'} \times 10^{-3} \right) \quad (15)$$

Sendo: G o fator de calibração do extensómetro e V/E' o valor medido no extensómetro [34].

## Capítulo 3

### Desenvolvimento de um modelo experimental

#### 3.1 Material e métodos

Para a realização da componente experimental deste trabalho foram adquiridos dois blocos retangulares iguais da *Sawbones*, com dimensão de 130x180x40mm. Estes blocos de material compósito possuem propriedades similares ao osso (cortical C) com iguais densidades (D), Figura 14. Relativamente às massas volúmicas, o material possui 80 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 14 - Blocos da *Sawbones*, da esquerda para a direita: BL3 e BL4.

O equipamento utilizado no ensaio foi o seguinte: dois blocos da *Sawbones*, um computador, um sistema de aquisição de dados (MGC Plus), um sistema de leitura de deformações (Spider8), termopares tipo K, extensómetros (HBM 1-Ly18-6/120), câmara termográfica (Flir® T365) e a máquina de comando numérico (DMC 63V) programada para a furação nos blocos.

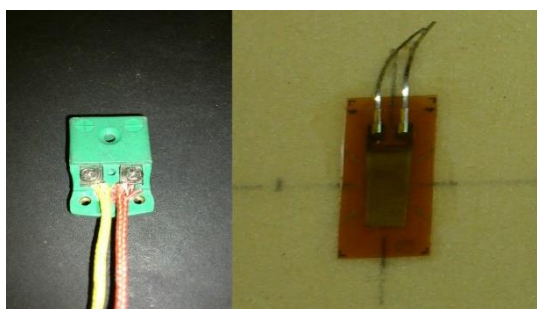


Figura 15 - Termopares tipo K e extensómetro.



Figura 16 - Sistema de aquisição de dados (MGC Plus e Spider 8).

Na Figura 17 está presente um esquema utilizado para a furação dos diferentes materiais e a forma de registo das temperaturas e deformações no osso.

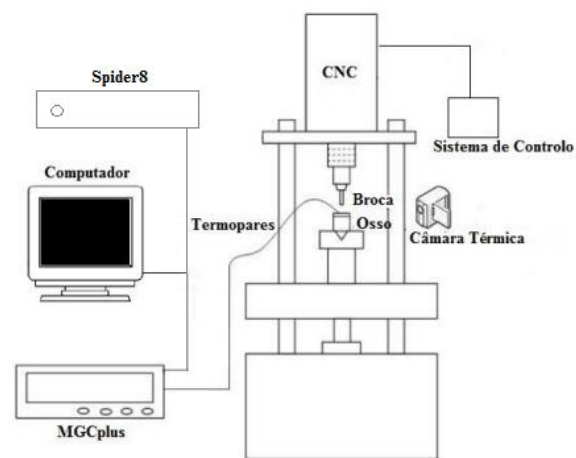


Figura 17 - Esquema experimental.

De forma a avançar para o processo de furação foi necessário ter em conta as características da broca. Neste trabalho foi utilizada uma broca convencional HSS com diâmetro de 4mm e um ângulo de  $118^\circ$ , apresentada na Figura 18.

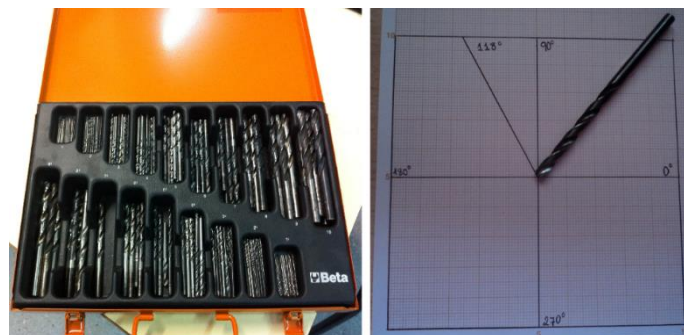


Figura 18 - Caixa das brocas utilizadas e determinação do ângulo da broca.

As furações verticais foram efetuadas ao longo de um comprimento de 30mm, com a imposição de uma velocidade de rotação de 800rpm, para ambos os blocos, e uma velocidade de avanço de 25 mm/min para o bloco 3 e 75mm/min para o bloco 4. Na tabela 1 são indicados os parâmetros de furação utilizados nos diferentes blocos compósitos.

**Tabela 1** – Parâmetros de furação utilizados.

<b>Parâmetros de Furação</b>	<b>BL3</b>	<b>BL4</b>
Velocidade de Avanço	<b>25 mm/min</b>	<b>75 mm/min</b>
Velocidade de Rotação	800 rpm	800 rpm
Diâmetro da Broca	4 mm	4 mm
Comprimento da Broca	30mm	30mm
Momento Torsor [36]	$12,5 \times 10^{-3}$ Nm	$12,5 \times 10^{-3}$ Nm
Força de Corte Axial [36]	37,5 N	37,5 N
Tempo Total (furação e arrefecimento)	75s + 55s	25s + 55s

Numa primeira fase foram realizadas as furações laterais, 24 furações de cada lado para colocação dos termopares a diferentes distâncias. Foi considerada uma distância adequada entre os diferentes furos, assim como um tempo de espera de arrefecimento, garantindo que o aquecimento de cada furo não interferia nos valores de temperatura do furo seguinte. No Anexo A esta representado a geometria dos blocos utilizados, a identificação dos furos e a distância entre eles.

No lado A de cada bloco os furos para a colocação dos termopares encontravam-se todos à mesma distância da broca, no lado B encontravam-se a distâncias diferentes, apresentado no esquema da Figura 19.

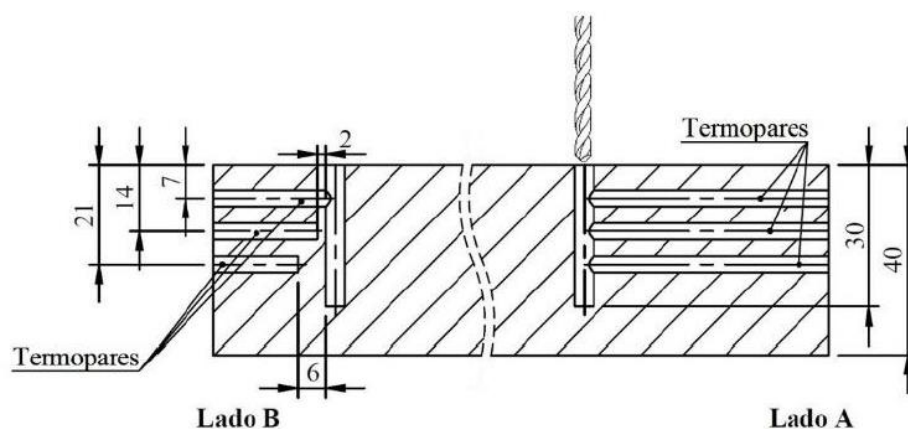


Figura 19 - Esquema do procedimento de furação.

Na Figura 20 é possível observar a máquina CNC bem como o monitor onde são impostas as variáveis da furação.



Figura 20 - Máquina CNC e monitor.

Os Termopares utilizados foram do tipo K, o posicionamento destes tem como objetivo obter a distribuição da temperatura na interface de corte e na vizinhança próxima do furo. Os termopares foram etiquetados e ligados a um sistema de aquisição de dados, o *MGCplus*, Figura 21.

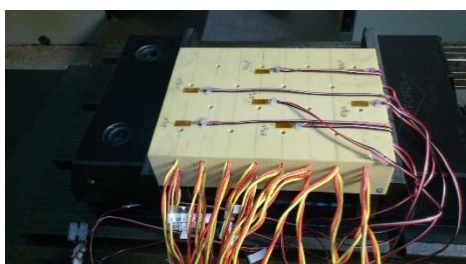


Figura 21 - Termopares ligados ao bloco.

Todos os termopares foram devidamente identificados e etiquetados para posterior tratamento dos dados, conforme Tabela 2 .

**Tabela 2** – Etiquetação dos termopares.

<b>ID</b>	<b>Definição</b>
<b>Termopar</b>	
<b>A/B - T</b>	Lado A ou B, termopar a 7mm de profundidade
<b>A/B - M</b>	Lado A ou B, termopar a 14mm de profundidade
<b>A/B - R</b>	Lado A ou B, termopar a 21mm de profundidade

O registo das deformações foi efetuado através da instalação de extensómetros lineares HBM (Ref 1-LY18-6/120). Foram colocados 14 extensómetros, 7 à superfície de

cada bloco, próximo da zona dos furos, nomeadamente a 3.5 mm, figura 22, de forma a obter o registo das deformações durante o processo de furação. Os extensómetros foram ligados a um sistema de aquisição de dados (Spider8).

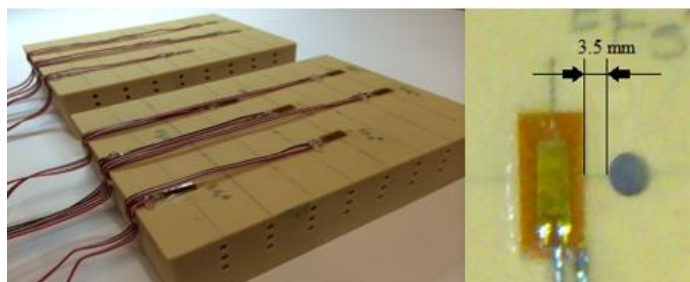


Figura 22 - Posicionamento dos extensómetros no bloco e distância entre o extensómetro e o furo.

Todos os extensómetros foram devidamente identificados e etiquetados para posterior tratamento dos dados, conforme Tabela 3.

**Tabela 3** – Etiquetagem dos extensómetros.

<b>ID</b>	<b>Definição</b>
<b>Extensómetro</b>	
<b>A/B - EF1</b>	Lado A ou B, extensómetro posicionado no Furo 1
<b>A/B - EF5</b>	Lado A ou B, extensómetro posicionado no Furo 5
<b>A/B - EF8</b>	Lado A ou B, extensómetro posicionado no Furo 8
<b>B/-EF4</b>	Lado B, extensómetro posicionado no Furo 4

A câmara termográfica possibilitará analisar e registar a temperatura da broca durante o processo de furação. Com o auxílio de termopares, serão registados os valores da temperatura nos materiais e em diferentes posições. A câmara foi posicionada a uma distância de 1,5 metro da zona de furação para registo da temperatura na broca no início e fim da furação.

A máquina termográfica possui uma precisão de +/- 2°C e uma sensibilidade térmica entre <0.04 °C e 30°C. A faixa de temperaturas possíveis de operar encontra-se entre -20°C e 1200°C [37]. Na Tabela 4 podem observar-se os parâmetros introduzidos na câmara termográfica.

**Tabela 4** – Parâmetros da câmara termográfica

<b>Parâmetros da câmara termográfica</b>	
Emissividade da Broca	0,7
Temperatura ambiente	20°C
Distância	1,5 m
Temperatura no interior do bloco	23 ° C
Temperatura refletida	20 °C
Humidade relativa	50%

Na figura 23 encontra-se a câmara termográfica utilizada durante os ensaios experimentais.



Figura 23 - Câmara termográfica (Flir® T365).

## 3.2 – Resultados experimentais

### 3.2.1 – Análise da temperatura na broca

Com a utilização da câmara termográfica foram registados os valores das temperaturas nas brocas à superfície antes e após a furação. Na figura 24 é possível visualizar algumas imagens retiradas com a câmara termográfica antes e após a furação, encontrando-se no Anexo B todos os restantes resultados.



Figura 24 - Temperatura na broca antes (imagem da esquerda) e após (imagem da direita) a furação do material.

Na Tabela 5, encontram-se os resultados obtidos para as temperaturas registadas antes e após a furação nos dois blocos.

**Tabela 5** – Temperaturas na broca antes e após o processo de furação.

Bloco	Local	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4	Furo 5	Furo 6	Furo 7	Furo 8
BL3A	Entrada	21,6	23,1	22,9	23,5	23,7	22,1	22,8	23,2
	Saída	80,7	83,2	82,2	77,8	79,1	78,8	74,5	74,4
BL3B	Entrada	22	21,5	22,7	22,5	23,3	23,7	23,7	23,6
	Saída	66,5	77,9	74,7	77	73,3	68,9	69,8	74,8
BL4A	Entrada	21,3	22,4	22	21,7	23	23,8	22,9	23,6
	Saída	71,4	67,8	69,9	74,8	71,3	62,8	67,9	70,8
BL4B	Entrada	23,5	24,3	23,8	22,9	23,1	23,8	23,6	23,8
	Saída	61,2	66,6	69,4	74,4	68,2	62,4	61,3	70

Analisando os resultados obtidos na tabela 5 pode observar-se que existe uma variação de temperaturas para cada furo. Para todos os furos a temperatura de entrada encontra-se no mesmo intervalo, entre  $\approx 21$  e  $\approx 23^{\circ}\text{C}$ , com uma diferença mínima de  $2^{\circ}\text{C}$ . Em relação à temperatura de saída, registaram-se valores superiores em ambos os blocos para o lado A em comparação com o lado B. Nos furos realizados com velocidade de avanço de  $25\text{mm}/\text{min}$  (Bloco 3) a temperatura atingiu valores entre os  $65^{\circ}\text{C}$  e os  $85^{\circ}\text{C}$  sendo a

máxima temperatura registada 83,2°C no furo 2, lado A do BL3. Nos furos com velocidade de avanço 75mm/min (Bloco 4) a temperatura da saída foi mais reduzida, com valores entre 60°C e 75°C sendo a maior temperatura registada a 74,8°C no furo 4, BL4 lado A.

Na Figura 25 apresenta-se os valores da Tabela 5 para uma visualização da variação da temperatura entre os dois blocos.

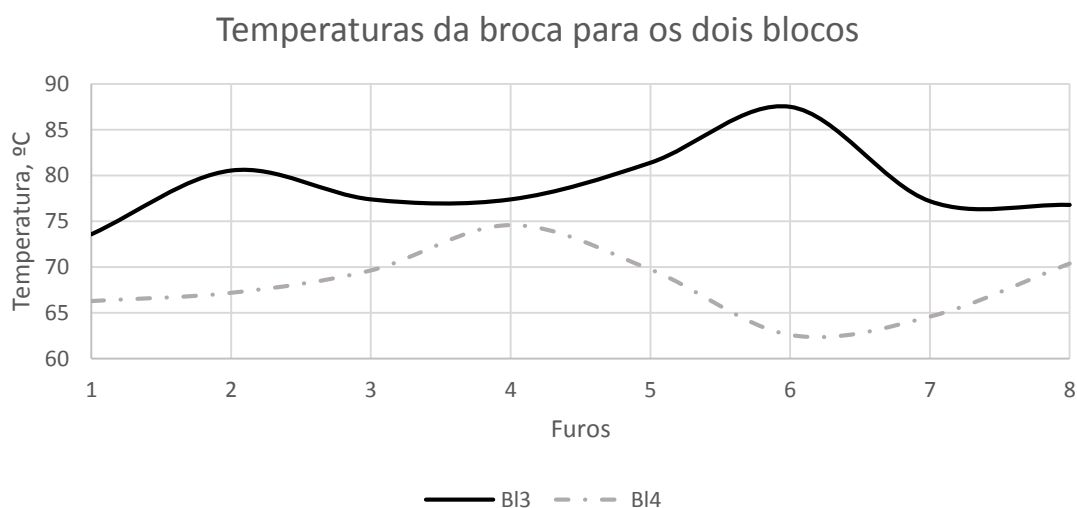


Figura 25 - Resultados comparativos da temperatura da broca entre o bloco 3 e o bloco 4.

Atendendo à Figura 25 e analisando o comportamento da temperatura na broca para os dois blocos verifica-se que os valores para o bloco 3 (velocidade de avanço 25 mm/min) são sempre superiores aos do bloco 4 (velocidade de avanço 75 mm/min), comprovando assim uma temperatura superior para uma velocidade de avanço inferior, ou seja, com a subida da velocidade de avanço há uma descida da temperatura. Em geral as temperaturas mantêm-se entre  $\approx 60$  e  $\approx 90^{\circ}\text{C}$ , com uma diferença mínima de  $\approx 30^{\circ}\text{C}$ .

Analisando a Tabela 5, relativamente aos dados obtidos pela técnica de termografia verifica-se que tal como na figura anterior (figura 25) as temperaturas são superiores no bloco 3 em relação ao bloco 4. Tal facto deve-se ao facto da velocidade de avanço variar o que faz alterar a temperatura, o bloco 3 foi furado com uma velocidade de avanço de 25 mm/min e o bloco 4 com uma velocidade de 75 mm/min. Em geral, é possível afirmar que a temperatura mais elevada regista-se quando a velocidade de avanço é inferior. Este efeito pode dever-se ao facto de numa baixa velocidade de avanço haver a acumulação de avara, o que leva ao aumento da temperatura.

Analisando o bloco em relação ao lado de furação, observa-se que em ambos os blocos a temperatura no lado A e no lado B apresentam comportamentos semelhantes, havendo variações devido à temperatura da broca não ser sempre a mesma, a temperatura do material não ser constante e a temperatura ambiente também variar.

### 3.2.2 – Análise da temperatura no material

Em processos de furação óssea é importante compreender a relação existente entre as diferentes variáveis envolvidas e a variação da temperatura. Com a colocação dos termopares foi possível registrar a temperatura no material, ao longo de diferentes distâncias ao furo principal. No caso do lado A todos os termopares foram colocados à mesma distância e no lado B a distâncias diferentes, sendo que para o bloco 3 (25mm/min) o processo de furação demorou 75 segundos e 55 segundos de arrefecimento, no bloco 4 (25mm/min) e o tempo de furação igual a 25 segundos com 55 segundos de arrefecimento. Comparou-se graficamente a evolução da temperatura ao longo do tempo de furação e arrefecimento, nos 16 furos efetuados nos dois blocos, (Figura 26 e Figura 27).

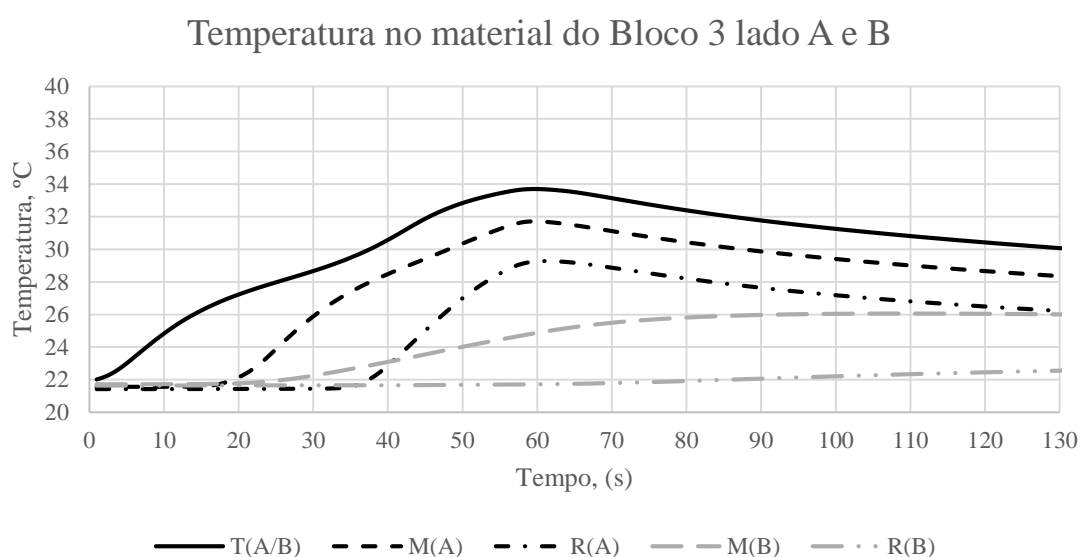


Figura 26 - Variação de temperatura no osso com os dados dos termopares para o bloco 3 lado A e B (25mm/min).

Nos ensaios para o BL3, velocidade de avanço de 25mm/min, Figura 26, e no BL4, velocidade de avanço de 75 mm/min, Figura 28, verifica-se uma tendência nos termopares T sofrerem um aumento de temperatura quando comparados com os termopares M e R, sendo estes últimos os que apresentam menores temperaturas. Nos ensaios com os termopares colocados à mesma distância, Lado A, este efeito verifica-se e poderá ser

devido ao facto dos termopares T e M estarem mais tempo expostos à furação. Nos ensaios com os termopares colocados a diferentes distâncias, Lado B, verificou-se que a temperatura no termopar T é a mesma comparando com o lado A uma vez que ambos se encontram à mesma distância, a temperatura é inferior conforme a distância do termopar ao furo diminui, sendo que em M as temperaturas são inferiores às registadas em T e nos termopares em R a variação é pequena. Comparando o lado A com o lado B observa-se que as temperaturas em M e R foram inferiores no lado B devido à diferença de distâncias.

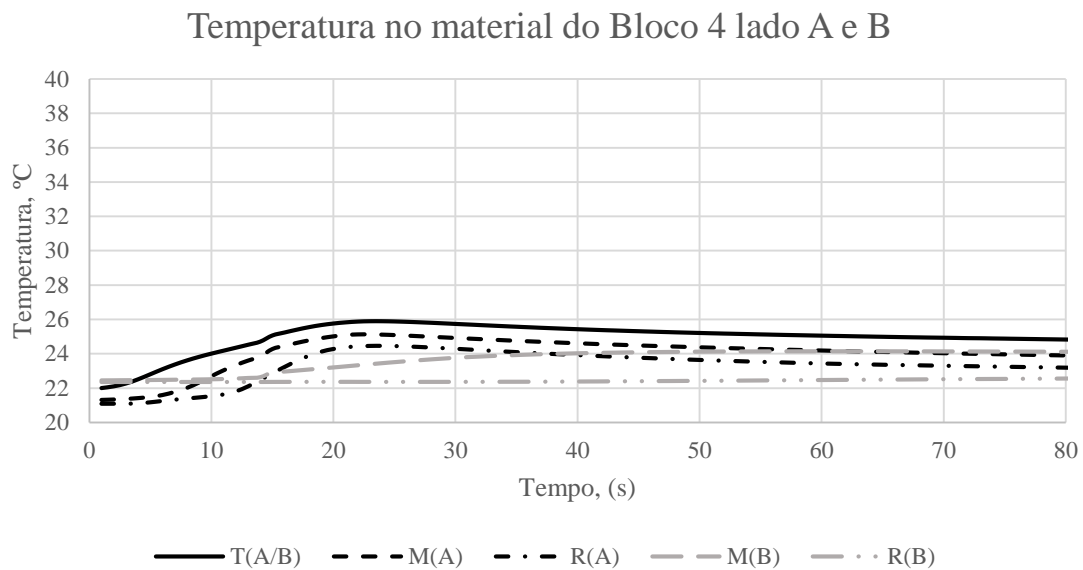


Figura 27 - Variação de temperatura no osso obtidos com os termopares para o bloco 4 lado A e B (75mm/min).

Comparando os dois blocos verifica-se que o aumento da velocidade de avanço provoca uma diminuição significativa da temperatura no material perfurado. Estes resultados devem-se ao facto da velocidade de avanço representar a rapidez na passagem da fonte de calor ao redor da parede óssea. Com o aumento deste parâmetro, o calor gerado aumenta mas reduz o tempo de furação levando a uma diminuição da temperatura. Em ambos os ensaios a temperatura mostrou-se inferior para o lado B, termopares a diferentes distâncias, o que comprova que a propagação da temperatura no tecido ósseo varia com a distância, diminuindo conforme se afasta da zona de furação.

### 3.2.3 – Análise das deformações no material

Durante o processo de furação há também a formação de deformações e tensões no material. De forma a calcular as tensões geradas durante a furação óssea recorreu-se à

técnica de extensometria no local da furação, de forma a verificar a variação das tensões normais com diferentes velocidades de avanço, 25 e 75mm/min.

Na Tabela 6 estão representadas as médias das tensões normais obtidas em cada um dos furos que continha extensómetro (Tabela 3) e a média total dos resultados para cada uma das velocidades de avanço.

**Tabela 6** – Tensões normais médias (MPa) obtidas experimentalmente.

Bloco	Velocidade de avanço (mm/min)	Experimental						Média
		EF1A	EF5A	EF8A	EF1B	EF5B	EF8B	
3	25	1,31	1,26	0,82	1,21	0,79	1,01	1,07
4	75	1,18	0,74	0,77	0,80	0,65	0,66	0,80

Atendendo à Tabela 6 e analisando os resultados obtidos das tensões é visível que o aumento da velocidade de avanço nos processos de furação óssea provoca uma diminuição das deformações no osso e consequentemente a diminuição das tensões normais.

**Tabela 7** – Tensões normais máximas (MPa) obtidas experimentalmente.

Bloco	Velocidade de avanço (mm/min)	Experimental						Média
		EF1A	EF5A	EF8A	EF1B	EF5B	EF8B	
3	25	4,41	4,53	1,77	3,66	1,98	2,72	3,18
4	75	2,19	2,19	2,82	2,36	2,80	2,10	2,41

Analisando os resultados para as tensões máximas obtidas, Tabela 7, verifica-se que o valor máximo obtido foi de 4.53 MPa. Segundo os dados fornecidos pela *Sawbones*, a tensão de cedência neste material compósito é de 27MPa [40].

Fazendo a análise entre a tensão obtida com a profundidade da furação no bloco foram obtidos os resultados presentes na Figura 28, estando os restantes gráficos no Anexo C.

Analisando a Figura 29 pode observar-se que a tensão aumenta com a profundidade, sendo que o aumento é maior para o BL3 em relação ao BL4, ou seja, uma maior velocidade de avanço provoca menor tensão no material. A diferença entre as tensões é de aproximadamente  $\approx 2$ MPa.

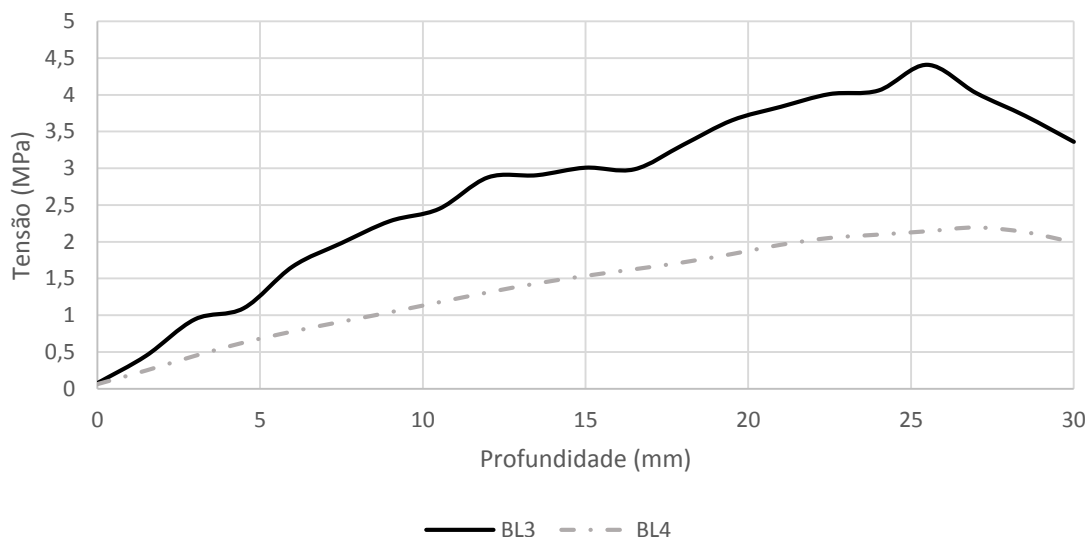


Figura 28 - Variação da tensão em relação à profundidade para o extensómetro EF1 de ambos os blocos (BL3 e BL4).

### 3.2.4 – Comparação das deformações com a temperatura

Em 3.2.1 concluiu-se que, com o aumento da velocidade de avanço a temperatura da broca diminuiu. Em 3.2.2 os resultados foram idênticos, onde com o aumento da velocidade de avanço a temperatura no material diminuiu.

Na Equação (16), o coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) (2,17 +/- 1%), [36], e o módulo de elasticidade (E) (1469MPa), [36], são valores constantes, logo o que irá alterar é a variação de temperatura ( $\Delta T$ ), sendo esta proporcional com a tensão ( $\sigma$ ), ou seja se o valor da temperatura baixa a tensão vai baixar também.

$$\sigma = \alpha \times E \times \Delta T \quad (16)$$

Sendo:

$\sigma$  - Tensão

$\alpha$  - Coeficiente de expansão térmica

E - Modulo de elasticidade

$\Delta T$  - Variação de temperatura

Em 3.2.3 a equação verifica-se, pois com o aumento da velocidade de avanço a temperatura diminuiu, se a temperatura diminuiu as tensões também vão diminuir e consequentemente velocidade de avanço superior resulta em menor tensão.

# Capítulo 4

## Desenvolvimento de um modelo numérico

Para efetuar a simulação numérica recorreu-se ao programa de elementos finitos, ANSYS®. Foi elaborado um modelo geométrico dos blocos, considerando apenas a análise de um furo. Foi utilizado o elemento finito *Solid 70* na análise térmica e o *Solid 185* para a análise mecânica com acoplamento térmico, Figura 29.

O elemento *Solid 70* é um elemento térmico 3D com capacidade de condução de calor e tem como opção a formação de elementos tetraédricos, este possui oito nós com um único grau de liberdade.

O elemento *Solid 185* é um elemento 3D, com oito nós e três graus de liberdade em translação em cada nó. O elemento está preparado para análise mecânica com plasticidade, hiperelasticidade, grande deflexão e deformação.

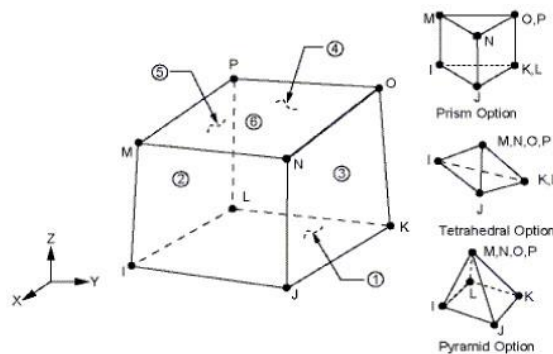


Figura 29 – Elemento Solid 70 e Solid 185, [38].

### 4.1 Propriedades térmicas e mecânicas dos materiais

Para se proceder à elaboração do modelo geométrico foi necessário efetuar uma pesquisa sobre as propriedades do osso, do bloco compósito e do aço. Na Tabela 8, 9 e 10 estão presentes os valores encontrados na literatura e que serão utilizados nas diferentes análises, [36] [39] [40].

**Tabela 8** – Propriedades térmicas do osso.

Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )		Calor Específico (J/kgK)		Condutividade (W/mK)	
Cortical	Trabecular	Cortical	Trabecular	Cortical	Trabecular
2100	1100	0,4	0,5	1260	1490

**Tabela 9** – Propriedades térmicas do material compósito e do aço.

Material	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kgK)	Condutividade (W/mK)
Bloco	800	1260,0	0,4
Aço	7850	439,8	53,0

**Tabela 10** – Propriedades mecânicas do material compósito e do aço.

Material	Coefficiente de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de expansão térmica (°C)	Coefficiente de poisson (ν)
Bloco	200,00	1,40x10 <sup>-6</sup>	0,3
Aço	1,47	6.3x10 <sup>-5</sup>	

## 4.2 Parâmetros da furação

Durante a furação existe a formação de diferentes processos, tal como a propagação de calor gerada pela broca através de um fluxo de calor,  $q$ . O fluxo de calor é calculado através da Equação (17), [1]:

$$q = \frac{P_c}{V} \text{ (W/m}^3\text{)} \quad (17)$$

onde  $P_c$  representa a potência total de corte e  $V$  o volume.

Na expressão apresentada,  $P_c$  pode ser obtida através da combinação da potência derivada da torção ao corte,  $P_M$ , e da potência derivada da força de corte,  $P_f$ , como é demonstrada na Equação (18).

$$P_C = P_f + P_M \text{ (W)} \quad (18)$$

Estas duas potências são calculadas através da Equação (19) e Eq. (20).

$$P_f = V_f \times F_{fw} \text{ (W)} \quad (19)$$

Onde  $V_f$  representa a velocidade de corte (m/s) e  $F_{fw}$  a força de corte (N).

$$P_M = \frac{M_w \times n \times 2\pi}{60} \text{ (W)} \quad (20)$$

Onde  $M_w$  descreve o momento tissor e  $n$  a velocidade de rotação (rpm), impostos durante a furação. Através das equações apresentadas, conclui-se que para o cálculo do fluxo de calor é necessário considerar diferentes características do processo de furação, presentes na Tabela 11 e na Tabela 12 [1], [41], [42].

**Tabela 11** – Parâmetros utilizados na furação.

	$d$ (mm)	$l$ (mm)	$r$ (mm)	$V_f$ (m/s)	$n$ (rpm)	$F_{fw}$ (N)	$M_w$ (Nm)
BL3	4	3	0,3	0,000417	800	35	0,009
BL4				0,00125			

**Tabela 12** – Fluxo de calor e temperatura inicial do modelo.

Material	Temperatura inicial (°C)	$q$ (MW/m <sup>3</sup> )
BL3	23	4,08
BL4	23	4,23

### 4.3 Análise térmica

Na Figura 30 apresenta-se a malha de elementos finitos adotada do modelo em estudo com um furo. As condições de constrangimento foram aplicadas na base do modelo e nas faces laterais.

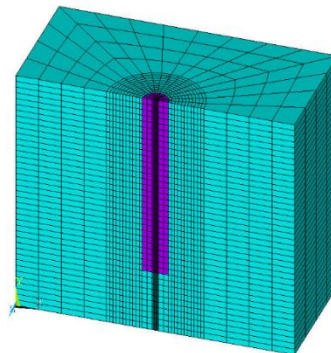


Figura 30 - Modelo numérico de um furo com a respetiva malha.

Foram efetuadas diferentes simulações para as duas velocidades de avanço, 25 e 75 mm/min. A análise efetuada é térmica e em regime transiente, para um tempo de furação de 130 segundos para o bloco 3 e 80 segundos para o bloco 4.

Na figura 31 apresentam-se os resultados numéricos obtidos para a variação das temperaturas para ambos os blocos no tempo mais crítico, com  $t=60s$  para o bloco 3 e  $t=20s$  para o bloco 4.

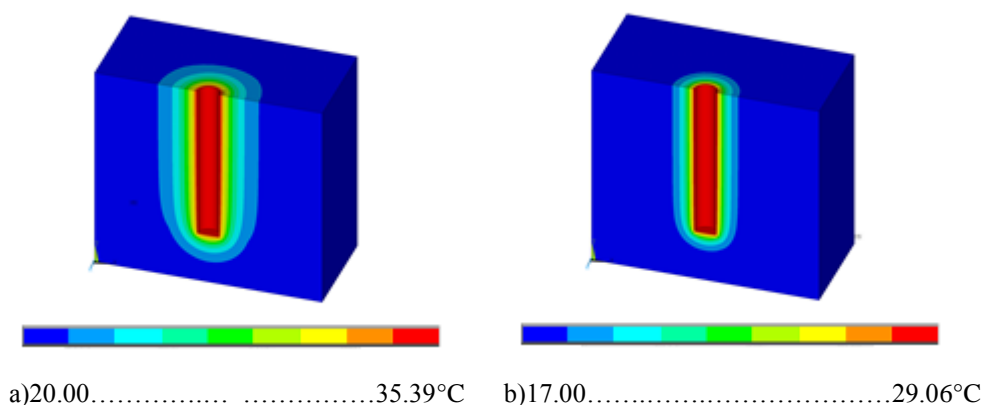


Figura 31 – Resultados das temperaturas: a) Bloco 3 Lado A e B; b) Bloco 4 Lado A e B.

Na Figura 32 encontram-se os resultados obtidos, para a malha presente na Figura 30, no bloco 3, lado A e lado B, nos diferentes termopares.

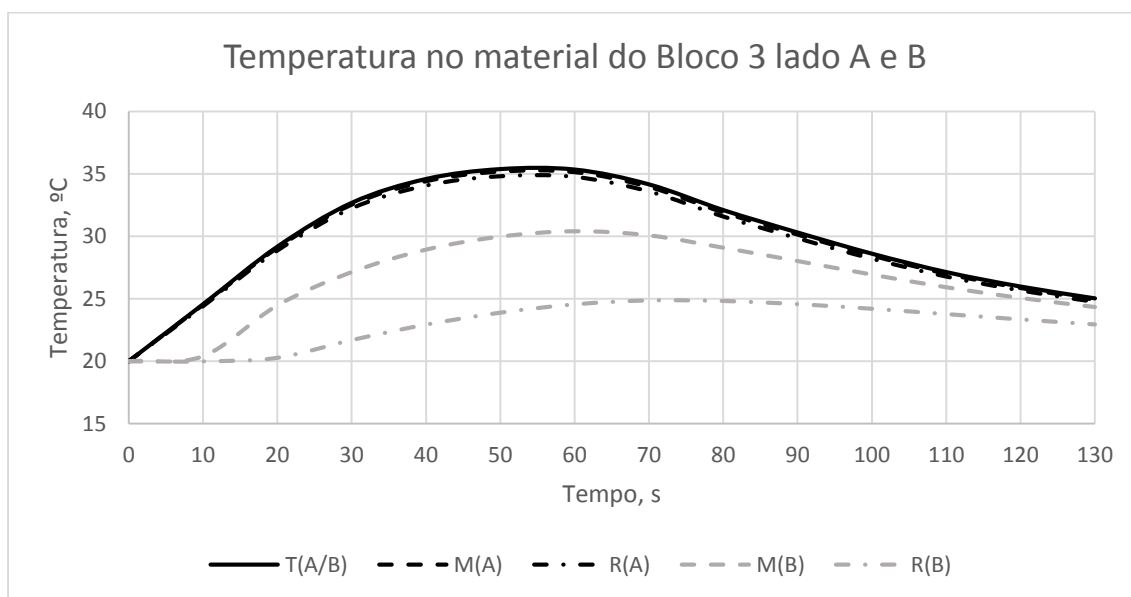


Figura 32 - Variação de temperatura no osso obtidos com os dados numéricos no bloco 3 lado A e B (25mm/min).

Na Figura 33 encontram-se os resultados obtidos, para o bloco 4, lado A e lado B, nos diferentes termopares.

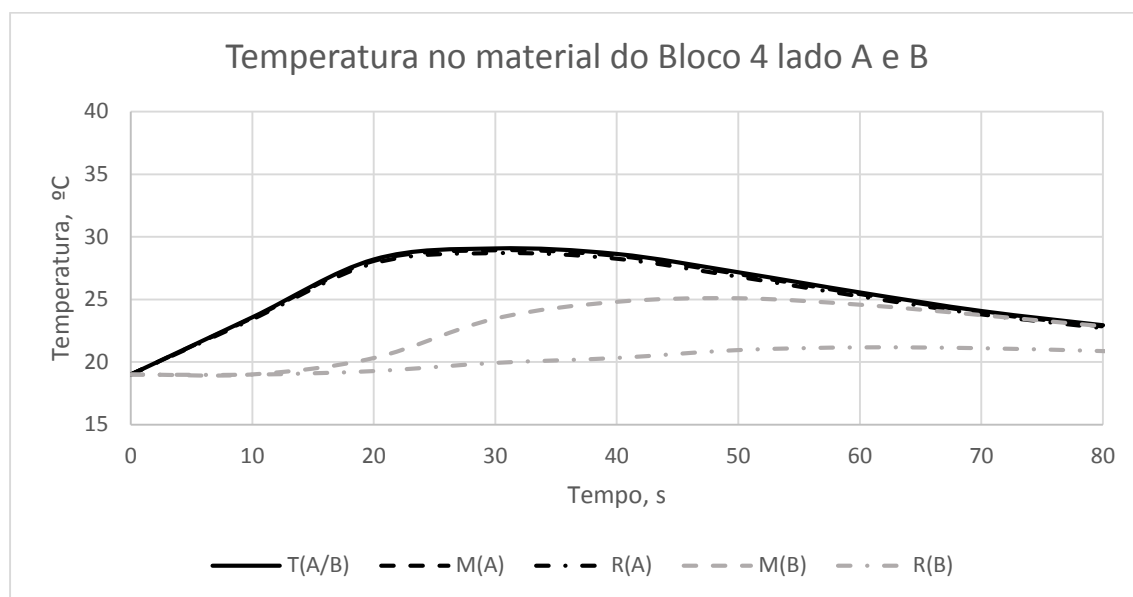


Figura 33 - Variação de temperatura no osso obtidos com os dados numéricos no bloco 4 lado A e B (75mm/min).

Analisando os resultados para ambos os blocos verifica-se que a solução obtida é distinta. Para o mesmo instante de tempo a temperatura registada toma diferentes valores mediante a velocidade de avanço imposta. O bloco 3 é o que regista os maiores valores de temperatura seguindo-se o bloco 4. Observa-se que a temperatura altera significativamente com a mudança da velocidade de avanço, sendo que, as temperaturas são maiores com menor velocidade de avanço, 25 mm/min. A temperatura é mais baixa nas posições que se encontram a maior distância do local de furação.

#### 4.4 Análise mecânica

Após a análise térmica foi feita uma análise mecânica para o cálculo das tensões presentes no material, através de uma análise de acoplamento. As condições de carregamento foi a imposição de carga térmica previamente calculada no modelo de análise térmica transiente. As condições de constrangimento foram aplicadas na base do modelo e nas faces laterais, impedindo o movimento em todas as direções.

Na Figura 34 encontram-se os resultados mecânicos das tensões equivalentes de von Mises, para o campo de temperaturas obtido na situação mais crítica em  $t=60s$  para o bloco 3 e  $t=20s$  para o bloco 4. Entende-se por momento crítico como sendo o instante de tempo em que as tensões são maiores no bloco.

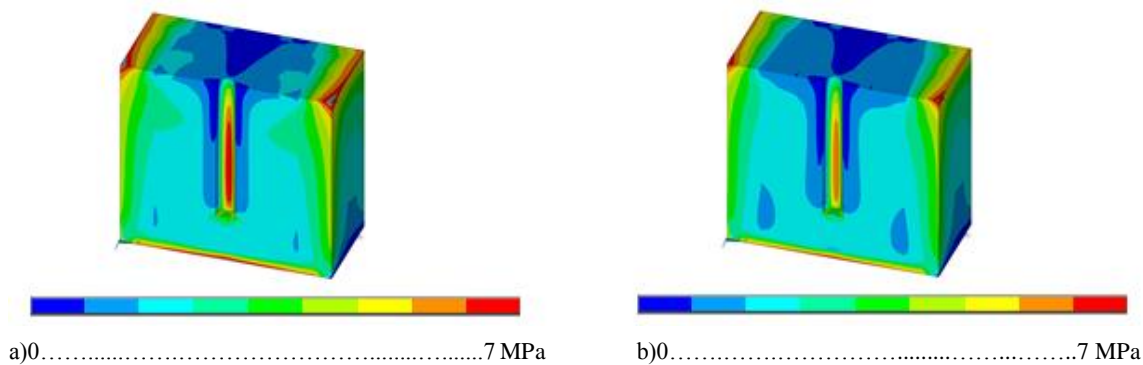


Figura 34 – Resultados das tensões: a) Bloco 3 Lado A e B; b) Bloco 4 Lado A e B.

Analisando os resultados para ambos os blocos verifica-se que com o aumento da penetração da ferramenta há a formação de tensões no osso. Através da variação da velocidade de avanço pode verificar-se que o aumento das tensões geradas no osso diminuíam. Os níveis de tensão máxima foram encontradas nas proximidades da área perfurada. Sendo uma análise em regime transiente, os restantes resultados encontram-se no Anexo F.

#### 4.5 Análise dos resultados numéricos vs. experimentais

Os resultados obtidos experimental e numericamente, para a componente térmica e mecânica estão presentes nas Figuras 35, 36, 37, 38 e na Tabela 13. As letras minúsculas referem-se aos resultados obtidos numericamente e as letras maiúsculas são referentes aos resultados experimentais. Como referido, na componente experimental, “T” “M” e “R” representam as diferentes distâncias onde são colocados os termopares.

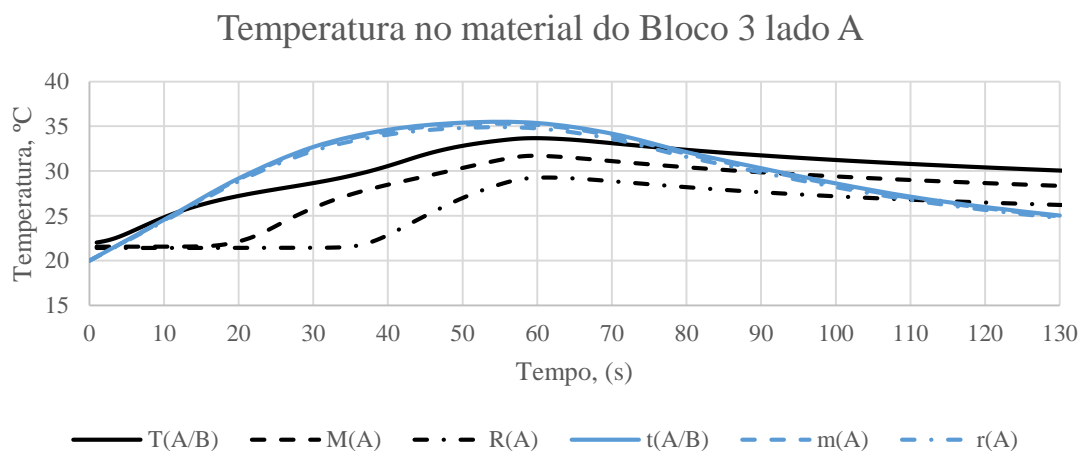


Figura 35 - Resultados experimentais e numéricos da temperatura no material para o bloco 3 lado A.

### Temperatura no material do Bloco 3 lado B

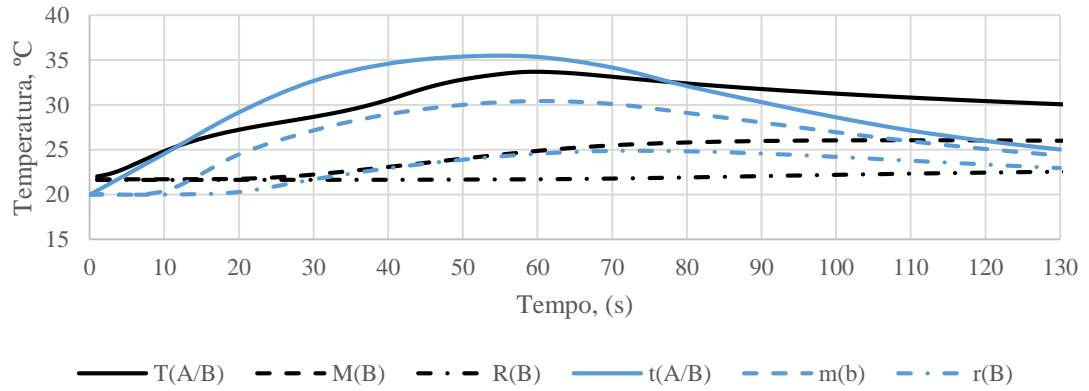


Figura 36 - Resultados experimentais e numéricos da temperatura no material para o bloco 3 lado B.

### Temperatura no material do Bloco 4 lado A

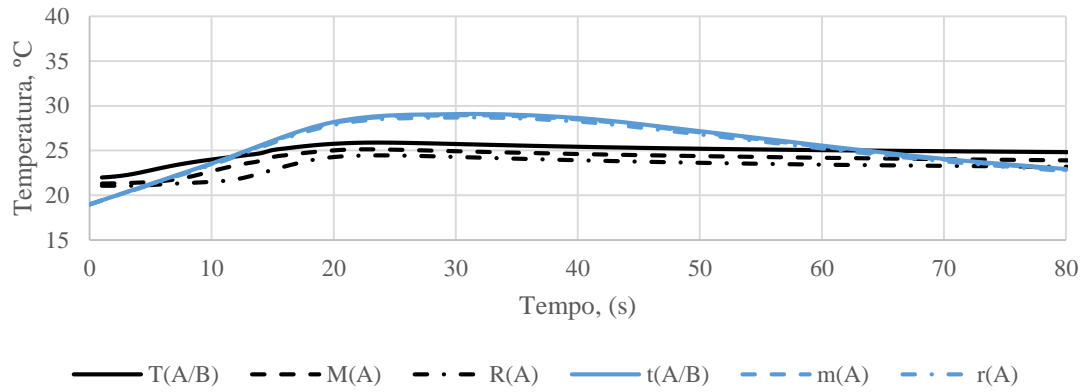


Figura 37 - Resultados experimentais e numéricos da temperatura no material para o bloco 4 lado A.

### Temperatura no material do Bloco 4 lado B

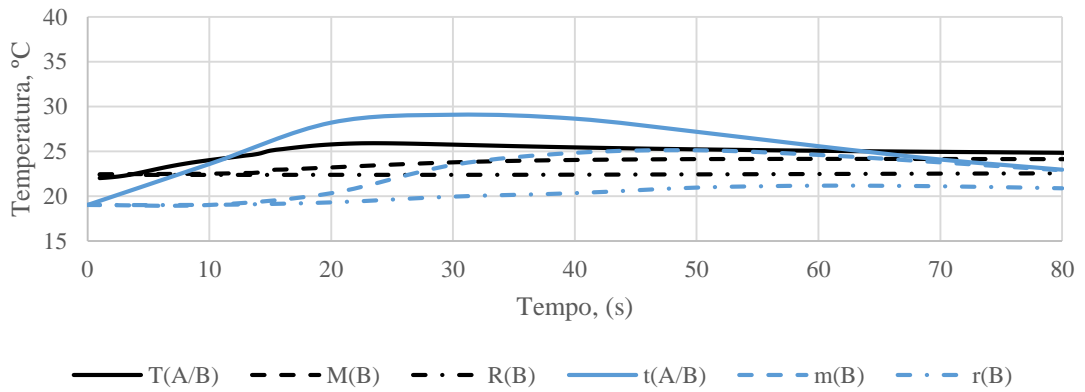


Figura 38 - Resultados experimentais e numéricos da temperatura no material para o bloco 4 lado B.

Analisando às figuras anteriores verifica-se que os resultados experimentais e numéricos são próximos. A nível térmico as curvas apresentam comportamentos semelhantes. No entanto, há ligeiras diferenças pelo facto de existirem variáveis difíceis de controlar, como é o caso da temperatura ambiente, a temperatura a que se encontra a broca e o material.

**Tabela 13** – Tensões médias (MPa) obtidas experimentalmente e numericamente.

Velocidade de avanço (mm/min)	Experimental							Numérico
	EF1A	EF5A	EF8A	EF1B	EF5B	EF8B	Média	
25	1,31	1,26	0,82	1,21	0,79	1,01	1,07	1,36
75	1,18	0,74	0,77	0,80	0,65	0,66	0,80	0,77

Analisando a Tabela 13, que contem os valores experimentais e numéricos para as tensões de origem térmica, é possível observar que ambos os modelos estão muito próximos. Verifica-se que em ambos os casos uma maior velocidade de avanço gera menores tensões.

Assim, deduz-se que a simulação computacional revela-se como um método alternativo ao método experimental, permitindo a obtenção de resultados num tempo mais curto e menor necessidade a recursos.

## Capítulo 5

### Conclusões e Trabalhos Futuros

#### 5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as temperaturas e as tensões desenvolvidas em materiais compósitos, com características similares ao tecido ósseo, devido a processos de furação com diferentes velocidades de avanço.

Com o desenvolvimento do modelo experimental, foi possível verificar que a temperatura na broca altera consoante as velocidades de avanço imposta, se a velocidade de avanço for inferior, 25 mm/min, a temperatura na broca vai ser superior, e consequentemente, para velocidades de avanço de 75 mm/min a temperatura na broca vai ser inferior. A nível do material foi possível verificar que tal como na broca o aumento da velocidade de avanço provoca um decréscimo da temperatura. Comparando os três termopares, T, M e R, verifica-se que a temperatura é superior nos termopares T, os que se encontram mais à superfície, seguido do M e por fim o R, isto porque são aqueles que estão sobre o efeito de rotação da broca mais tempo. Entre o bloco 3 (25 mm/min) e o bloco 4 (75mm/min) as temperaturas maiores são registadas no bloco 3, isto deve-se ao facto da velocidade de avanço representar a rapidez da passagem da fonte de calor ao redor da parede óssea. Comparando os resultados obtidos entre o lado A (termopares à mesma distância) e o lado B (termopares a distâncias diferentes) foi possível verificar que as temperaturas para o lado A foram superiores em relação ao lado B devido ao afastamento do termopar da zona de furação.

Ainda dentro do modelo experimental, recorrendo à extensometria, foi possível verificar que as tensões são superiores para uma menor velocidade de avanço, as tensões máximas também foram encontradas para a velocidade de avanço inferior. Foi também possível verificar que, a tensão aumenta com a profundidade do furo, sendo que o aumento é maior para o bloco 3 em relação ao bloco 4.

Comparando a temperatura registada com as deformações, é possível verificar que se a temperatura aumenta, as tensões também aumentam e vice-versa, isto porque com o aumento da velocidade de avanço a temperatura diminui e se a temperatura diminui as tensões também vão diminuir, segundo a Equação (15).

Relativamente à componente numérica verifica-se que os resultados obtidos são próximos dos obtidos experimentalmente. Este facto permite concluir que, a utilização de modelos numéricos podem ser utilizados de forma rápida e na verificação em simultâneo de diferentes variáveis.

## **5.2 Trabalhos Futuros**

Como trabalhos futuros sugere-se:

- Efetuar novos ensaios experimentais com diferentes velocidades de avanço, utilização de outras variáveis de furação, tal como o diâmetro da broca, velocidade de rotação e irrigação.
- Novos modelos numéricos com utilização de outras variáveis, novas malhas de elementos finitos, modelo de acoplamento térmico transiente em conjugação com cargas mecânicas.

## Referências bibliográficas

- [1] Sampaio, Cátia; Avaliação térmica provocada pela furação óssea. *Relatório da Unidade Curricular de Projecto em : Mestrado Biomecânica e Reabilitação. Instituto Politécnico de Bragança*, 2014.
- [2] C. P. Silva, João; Avaliação da Temperatura em Materiais Compósitos sob Processos de Furação com e sem Irrigação. *Relatório da Unidade Curricular de Projecto em: Mestrado Biomecânica e Reabilitação. Instituto Politécnico de Bragança*, 2015.
- [3] Fernandes et al, “Modelo 3D para análise térmica durante o processo de furação do osso cortical,” *9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, 15-17 Outubro 2014.
- [4] Fernandes et al, “Avaliação térmica da furação no osso cortical com e sem irrigação,” *9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, 15-17 Outubro 2014.
- [5] J. D. Henn, “Bioquímica do tecido ósseo”, Setembro 2010.
- [6] F.Judas, P. Palma, R. I. Falacho, H. Figueiredo, “Estrutura e dinâmica do tecido ósseo”, Março 2012.
- [7] M. Massoud, *Engineering Thermofluids: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*. Springer, 2005.
- [8] Renders, G. A. P., Mulder, L., V. Ruijven, L. J., V. Eijden, and T. M. G. J., “Porosity of human mandibular condylar bone,” *Journal of Anatomy*, vol. 210, no. 3, pp. 239–248, March 2007.
- [9] S. R. H. Davidson and D. F. James, “Measurement of thermal conductivity of bovine cortical bone,” *Medical Engineering & Physics*, vol. 22, no. 10, pp. 741 – 747, 2000.
- [10] S. Karmani, “The thermal properties of bone and the effects of surgical intervention,” *Current Orthopaedics*, vol. 20, no. 1, pp. 52 – 58, 2006.
- [11] D. Knudson, *Fundamentals of Biomechanics*, 2nd ed., D. Knudson, Ed. New York, The United States of America: Springer, 2007.
- [12] N. Özkaya, M. Nordin, and D. L. Leger, *Fundamentals of biomechanics: equilibrium, motion, and deformation*, N. Özkaya, M. Nordin, and D. L. Leger, Eds. Birkhäuser, 1999.

- [13] A. H. Burstein and V. H. Frankel, “The viscoelastic properties of some biological materials,” *Annals of the New York Academy of Sciences*, Issue Materials in Biochemical Engineering, vol. 146, pp. 158–165, 1968.
- [14] M. Nordin and V. H. Frankel, *Basic biomechanics of the musculoskeletal system*, 3rd ed., M. Nordin and V. H. Frankel, Eds. Lippincott Williams & Wilkins, 2001.
- [15] Hillery M. T., Shuaib I. (1999). Temperature effects in the drilling of human and bovine bone. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 302-308.
- [16] Sousa P. F. B. D. (2009). Estudos de processos térmicos decorrentes da usinagem: aplicação de problemas inversos em furação. *Tese apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, para a obtenção do grau de doutor*.
- [17] C. A. Harper and E. M. Petrie, *Plastics Materials and Processes*, A Concise Encyclopedia, Wiley, New York, 2003.
- [18] R. Pratap and A. Ruina, *Introduction to Statics and Dynamics*. Oxford University Press, January, 2002.].
- [19] L. S. Matthews, C. A. Green, and S. A. Goldstein, “The thermal effects of skeletal fixation-pin insertion in bone,” *Journal Bone Joint Surgery*, vol. 66, no. 7, pp.1077-83, 1984.
- [20] G. Augustin, S. Davila, T. Udiljak, D. S. Vedrina, and D. Bagatin, “Determination of spatial distribution of increase in bone temperature during drilling by infrared thermography: preliminary report,” *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, vol. 129, no. 5, pp. 703–709, 2009.
- [21] K. N. Bachus, M. T. Rondina, and D. T. Hutchinson, “The effects of drilling force on cortical temperatures and their duration: an in vitro study,” *Medical Engineering and Physics*, vol. 22, no. 10, pp. 685 – 691, 2000.
- [22] Y. K. Tu, H. H. Tsai, L. W. Chen, C. C. Huang, Y. C. Chen, and L. C. Lin, “Finite element simulation of drill bit and bone thermal contact during drilling,” in *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 2008. ICBBE 2008. The 2nd International Conference on, May 2008, pp. 1268–1271.
- [23] H. C. Shin and Y. S. Yoon, “Bone temperature estimation during orthopedic round bur milling operation”, *Journal of Biomechanics*, vol. 39, no. 1, pp.33-39, 2006.
- [24] R. W. Krause, W. D. Bradbury, E. J. Kelly, and E. M. Lunceford, “Temperature elevations in orthopaedic cutting operations,” *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 15, pp. 267-275, 1982.

- [25] S. Kondo, Y. Okada, H. Iseki, T. Hori, K. Takakura, A. Kobayashi, and H. Nagata, "Thermological study of drilling bone tissue with a high-speed drill," *Neurosurgery*, vol. 46, no. 5, pp. 1162-1167, 2000.
- [26] C. Natalim P. Ingle, and J. Dowell, "Prthopaedic bone drills: Can they be improved: Temperature changes near the drilling face" , *J Bone joint surg BRm* vol. 78-B, no. 2, pp. 357-362,1996 .
- [27] A.Portela e A.Silva: *Mecânica dos Materiais*, ed. Plátano, Lisboa.
- [28] Universidade Federal de Santa Catarina. "Apostila de Extensometria", Florianópolis, julho de 2004.
- [29] A. Valido e J. D. Silva, "Introdução à extensometria elétrica de resistência", Outubro, 1997.
- [30] R. P. Adnolcato, J. S. Camacho e G. A. Brito, "Extensometria Básica", ilha solteira, 2004.
- [31] Malerba, P. C. C, Guarnieri, F. L. , Barris, J. . "Aplicação da extensometria através de strain gage: Elaboração de uma célula de carga com sistema de aquisição de dados computadorizado", 2007.
- [32] V. Badiola. DPTO. Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, "Extensometría", 2004.
- [33] J.F. Silva Gomes, Mário A. P. Vaz, "Análise experimental de tensões", Porto, 2004.
- [34] Fonseca, E.M.M; Mesquita, L.R; Caleiro, C.; Lopes, H.; Vaz. M.A.P.; Determinação do factor concentração de tensões em placas utilizando a extensometria com validação numérica.
- [35] James J. Brophy, "Basic electronics for scientists", third Edition, New York, 1979.
- [36] "Sawbones Biomechanical Test Materials", pp. 6 [Online]. Available: [http://www.sawbones.com/UserFiles/Docs/biomechanical\\_catalog.pdf](http://www.sawbones.com/UserFiles/Docs/biomechanical_catalog.pdf).
- [37] "Flir T-Series Thermal Imaging Cameras", [Online]. Available: <http://www.flir.com/instruments/display/?id=62960>. [Acedido em 21 de Outubro 20015].
- [38] F M. Janghorban; A. Zare; Thermal effect on free vibration analysis of functionally grade arbitrary straight-side plates with different cutouts, *Lat. Am. J. solids struct*, vol. 8, no. 3, September 2011.

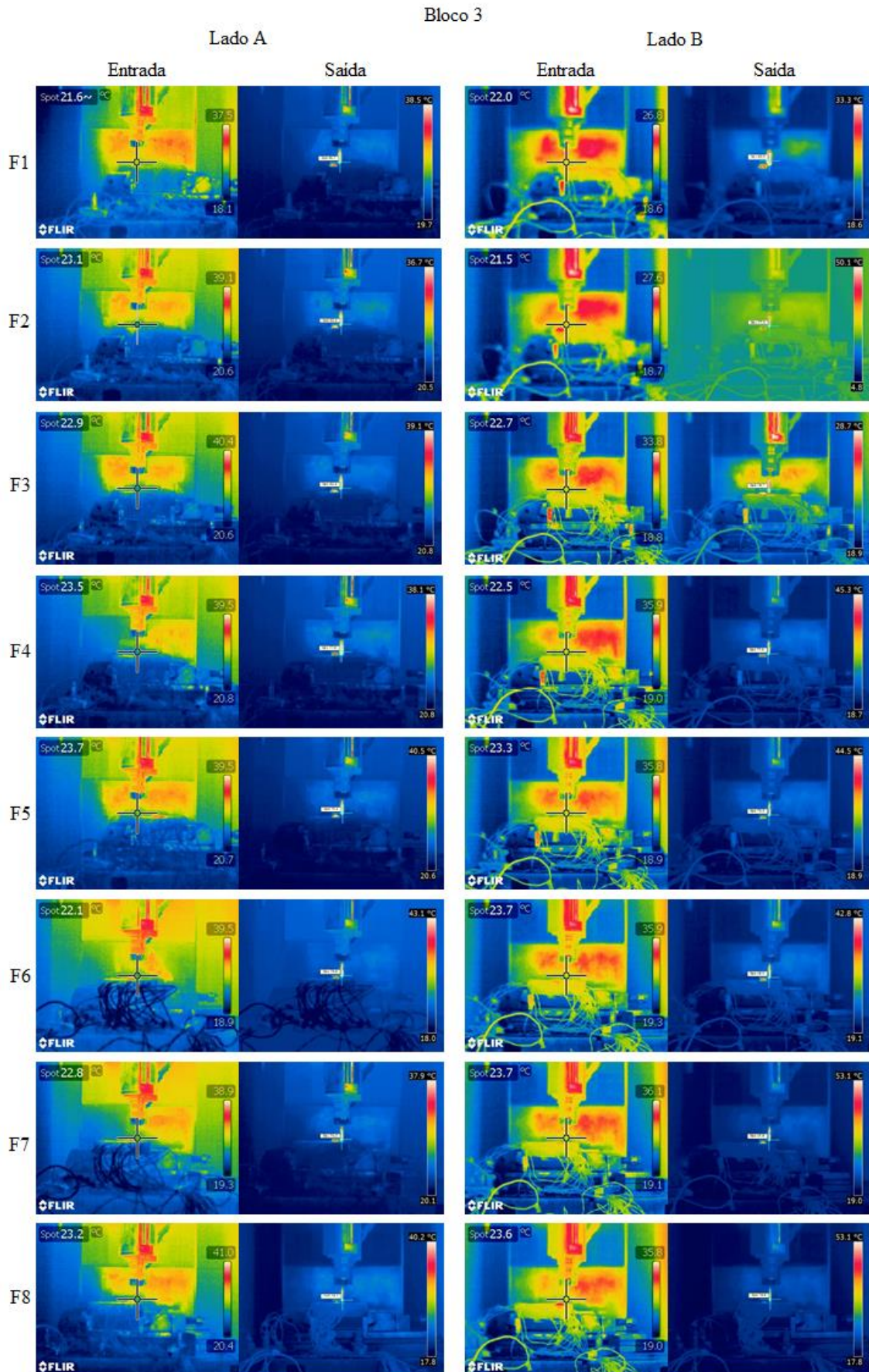
- [39] Fonseca E. M. M., Magalhães K., Fernandes M., Barbosa M., Sousa G. (2013). The Assessment of the Thermal Necrosis due a Drilling Dental Process with or without Irrigation. *IEEE 3rd Portuguese Meeting in Bioengineering (ENBENG)*, pp. 157-159.
- [40] EUROCODE 3, “Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design,,” ENV 1993 – 1-2:1995.
- [41] Monteiro D. (2013). Avaliação da necrose térmica numa mandíbula humana provocada pela furação. *Relatório da Unidade Curricular de Projecto em: Engenharia Biomédica. Instituto Politécnico de Bragança.*
- [42] Basiaga M., Paszenda Z., Szewczenko J., Kaczmarek M. (2011). Numerical and experimental analyses of drills used in osteosynthesis. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. vol. 13, No. 4.

# **ANEXOS**

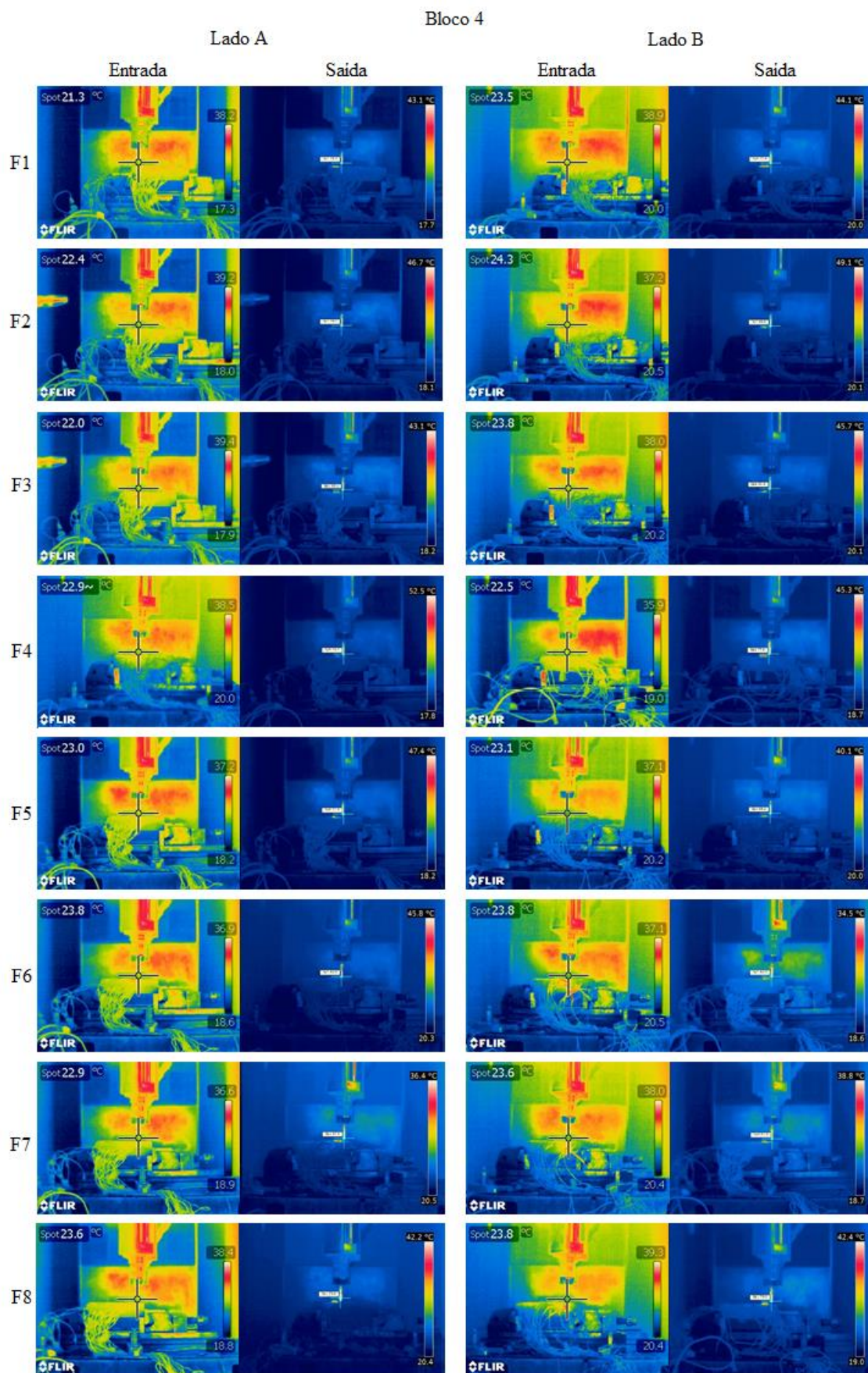
## **Anexo A: Desenho SolidWorks**



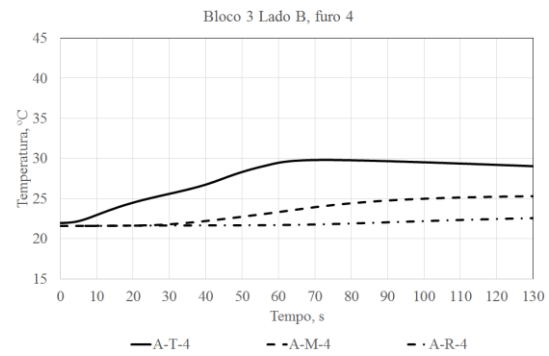
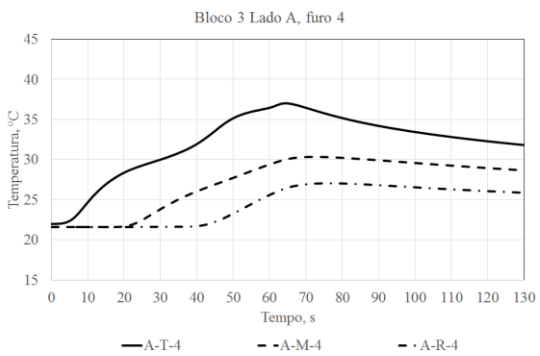
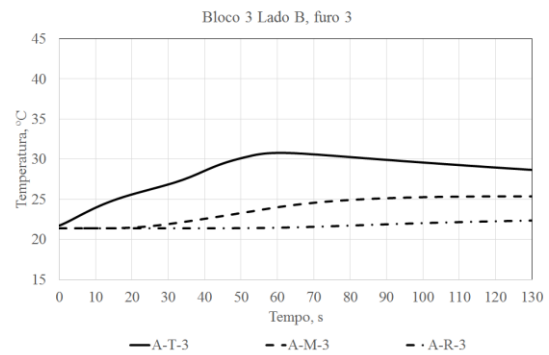
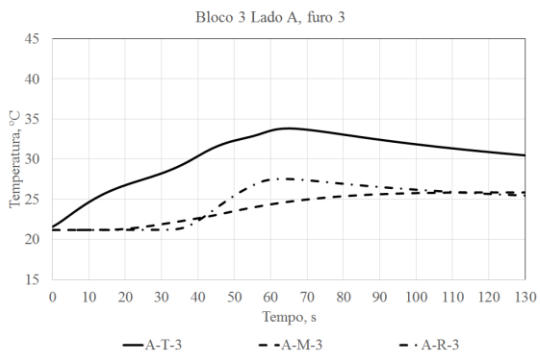
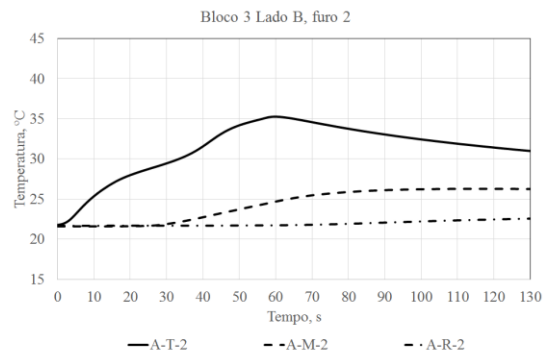
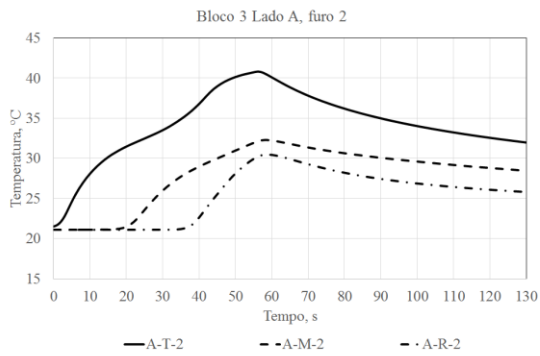
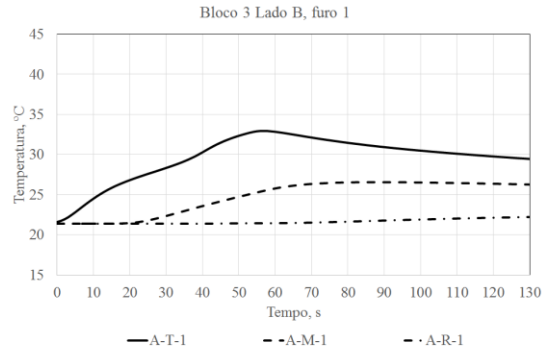
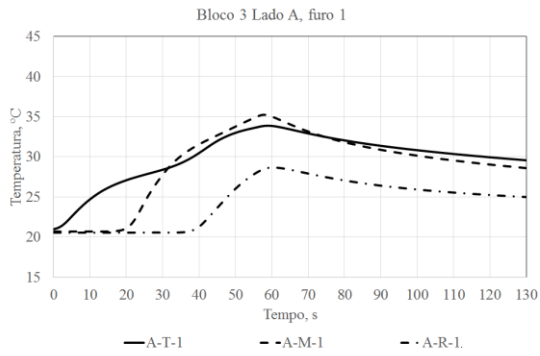
**Anexo B: Imagens termográficas da componente experimental, Bloco 3.**



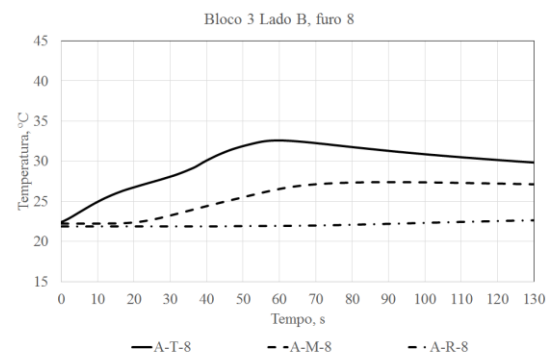
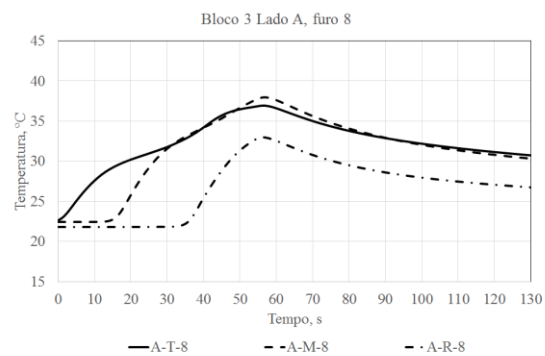
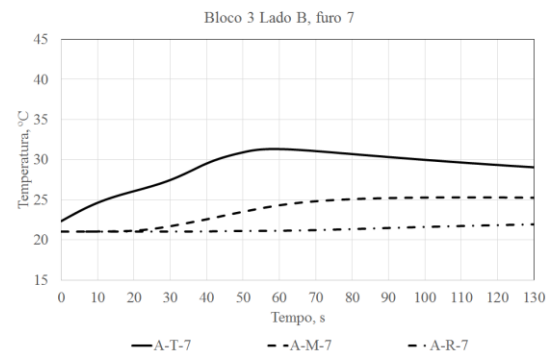
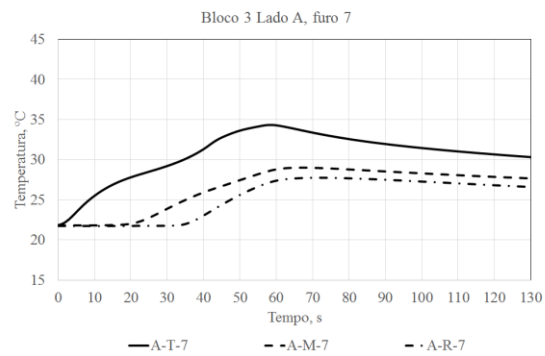
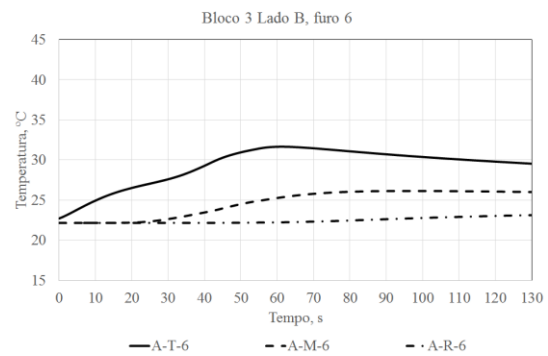
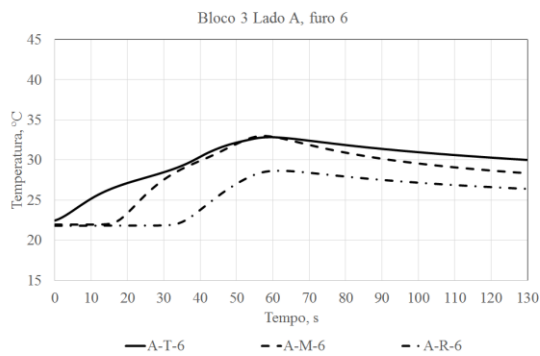
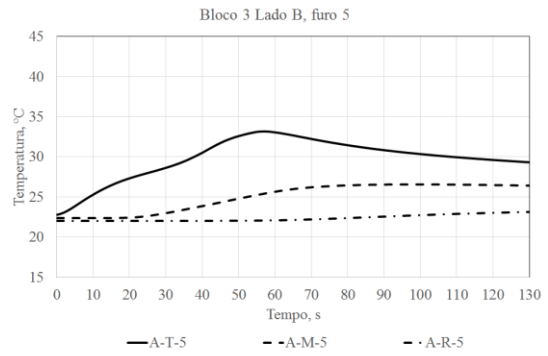
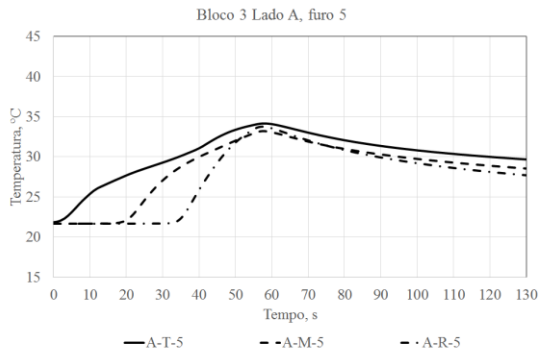
**Anexo B: Imagens termográficas da componente experimental, Bloco 4.**



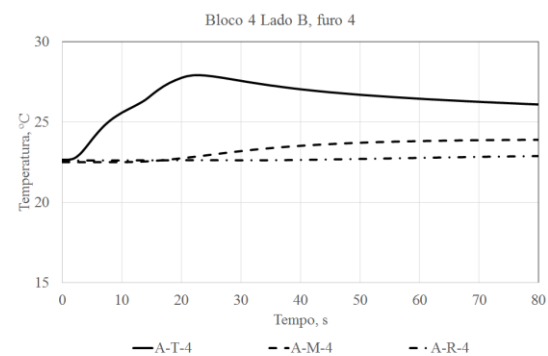
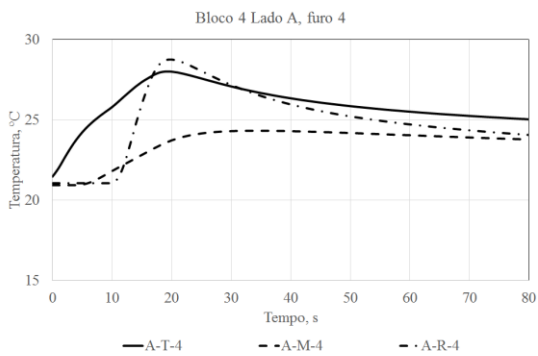
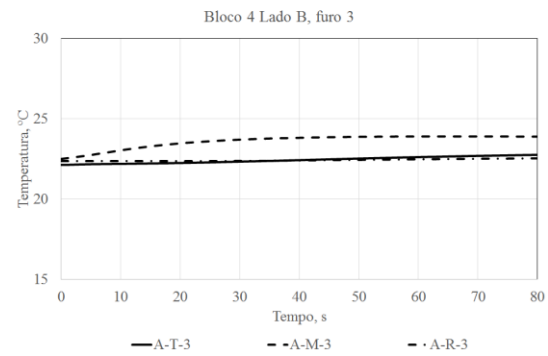
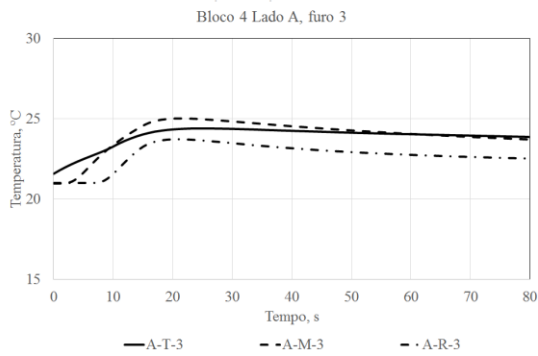
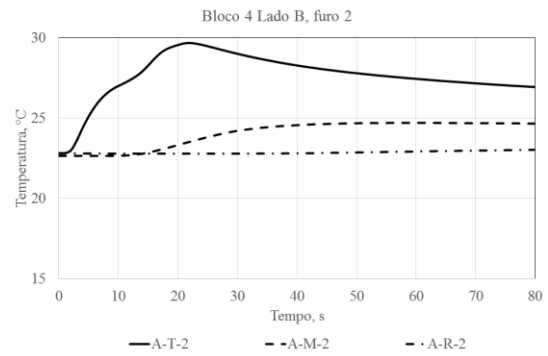
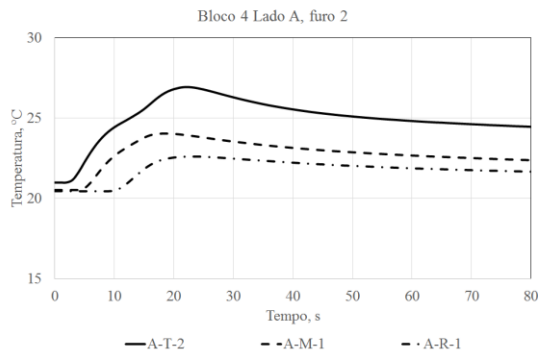
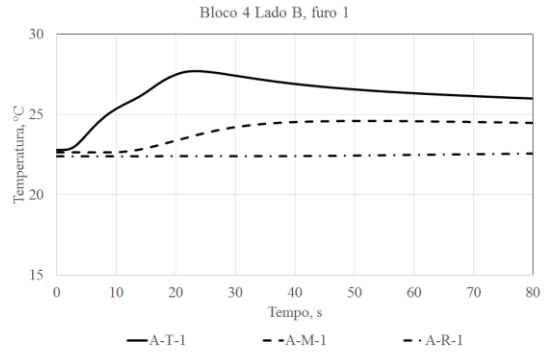
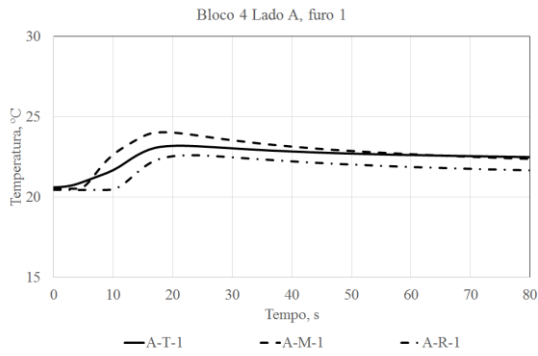
## Anexo C: Dados dos termopares durante as furações, Bloco 3.



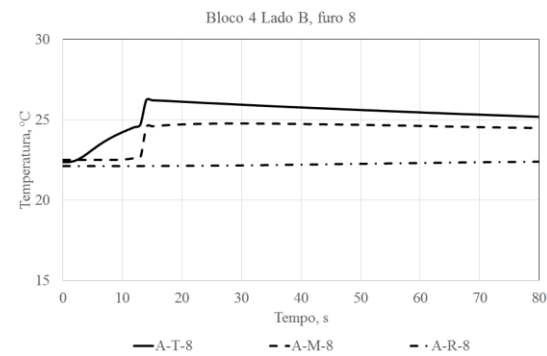
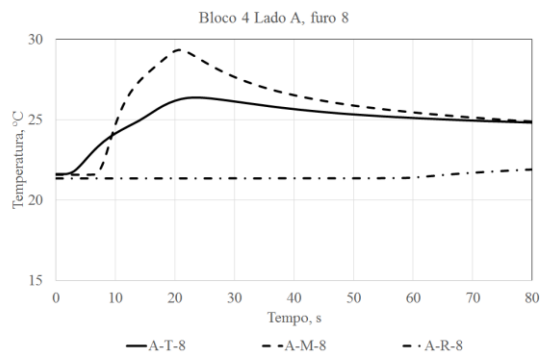
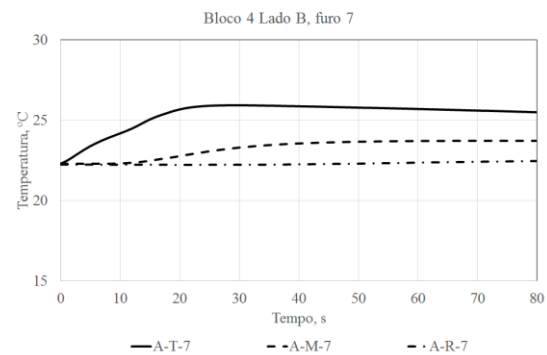
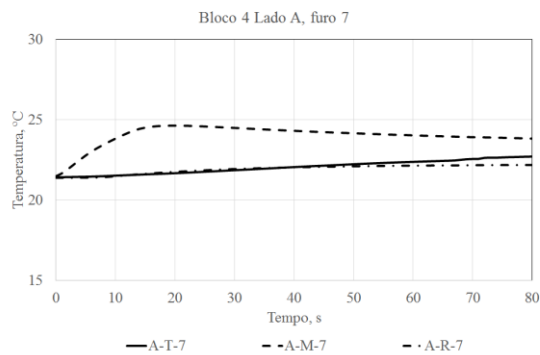
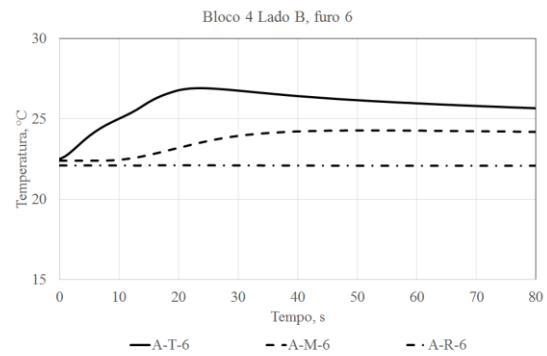
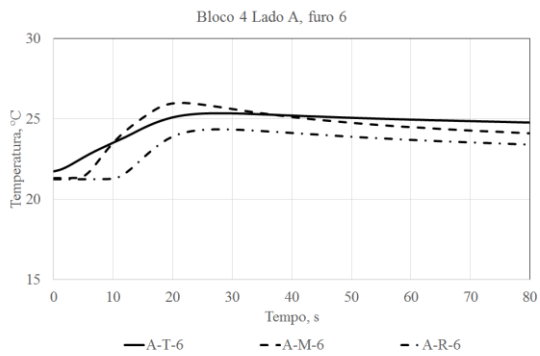
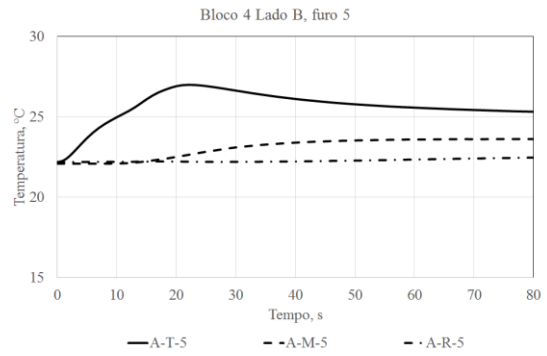
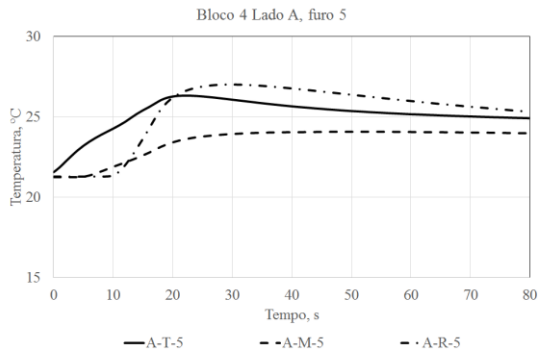
### Anexo C: Dados dos termopares durante as furações, Bloco 3.



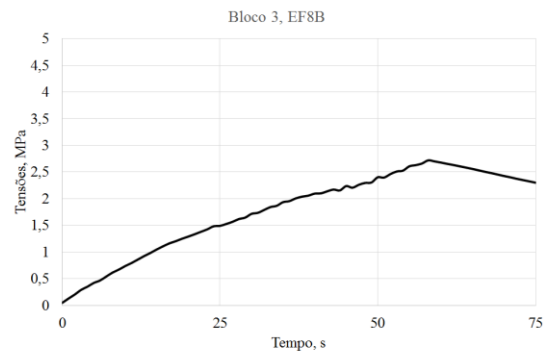
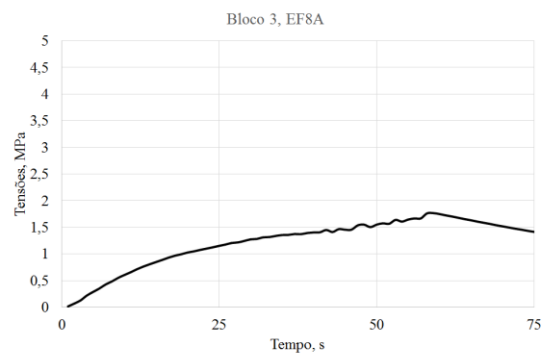
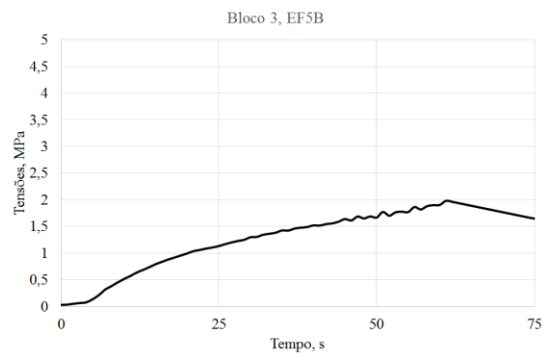
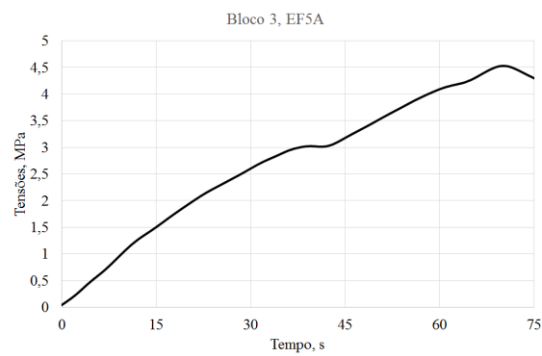
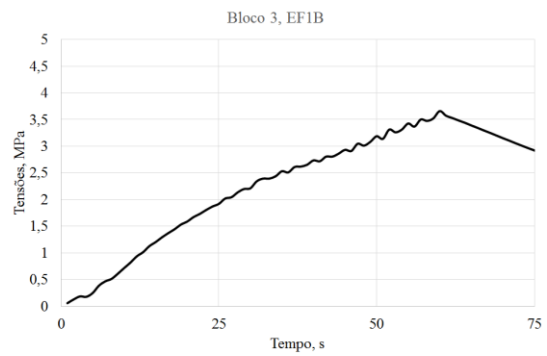
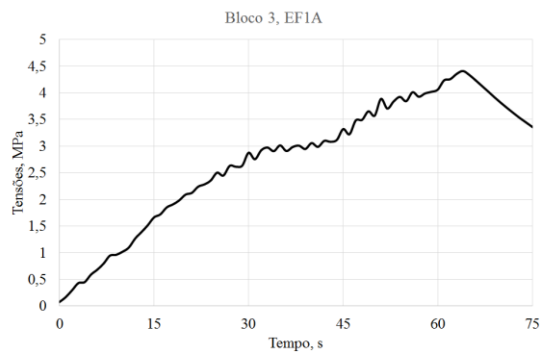
## Anexo C: Dados dos termopares durante as furações, Bloco 4.



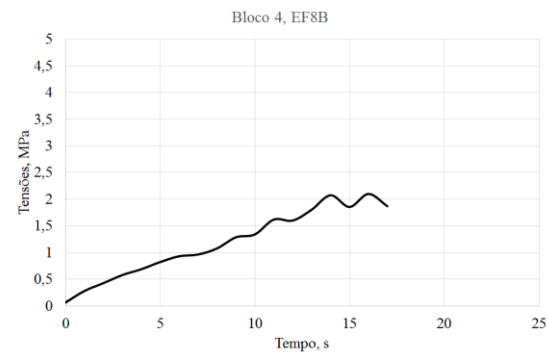
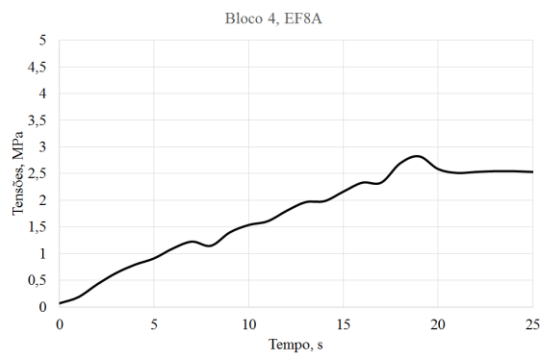
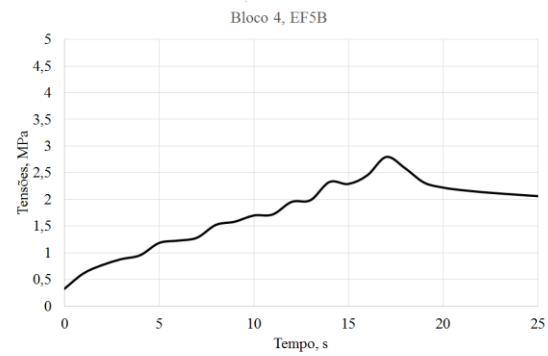
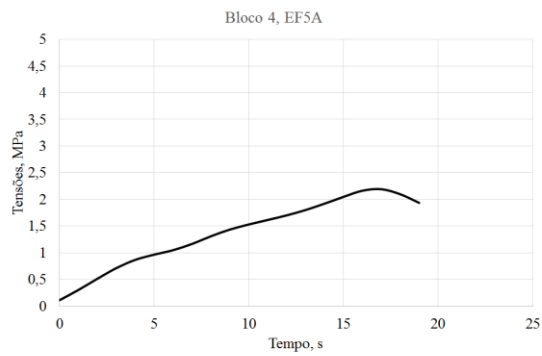
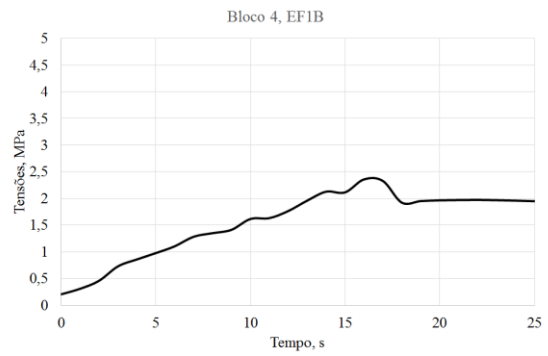
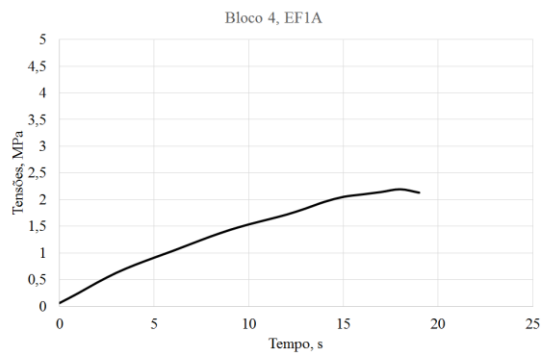
## Anexo C: Dados dos termopares durante as furações, Bloco 4.



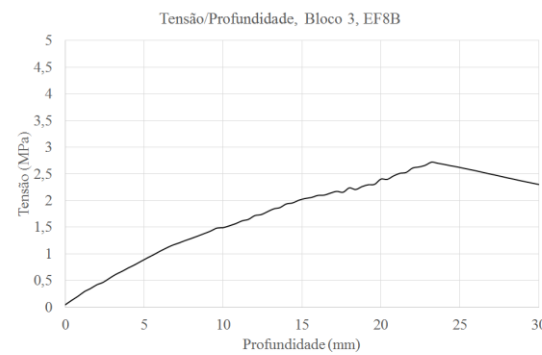
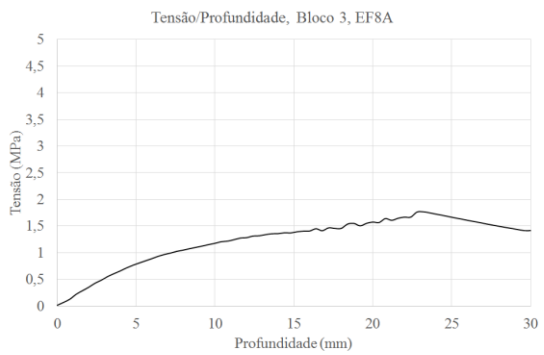
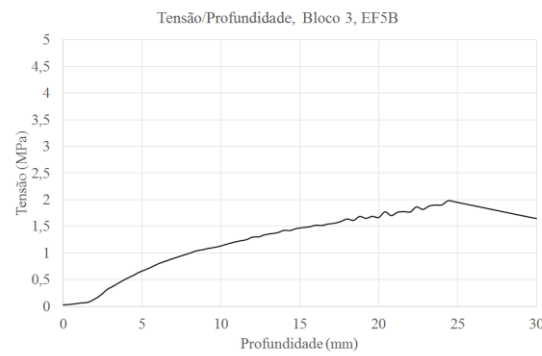
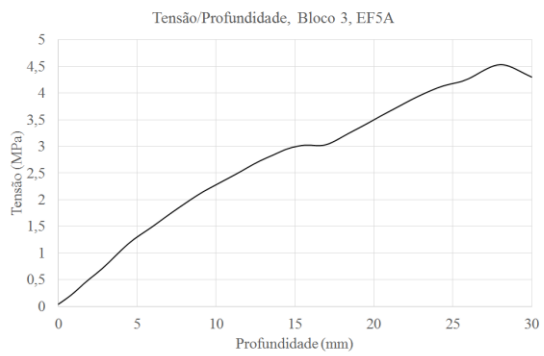
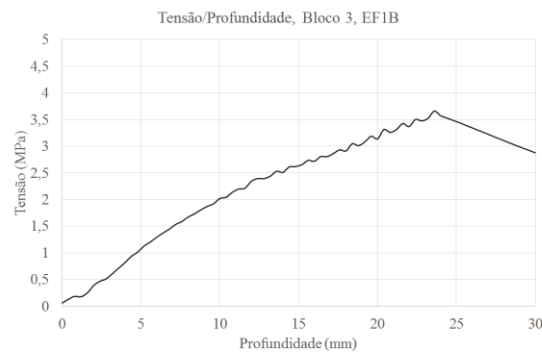
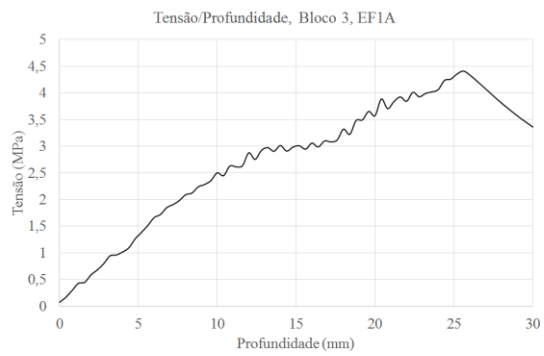
## Anexo D: Tensões obtidas com os extensômetros, Bloco 3.



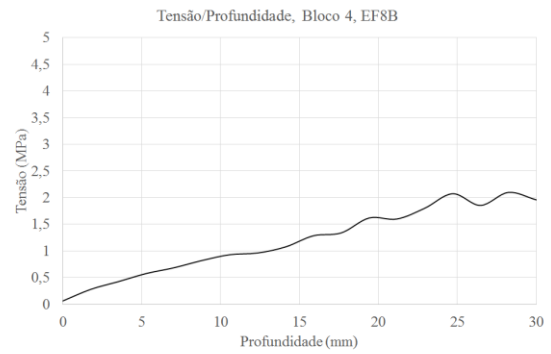
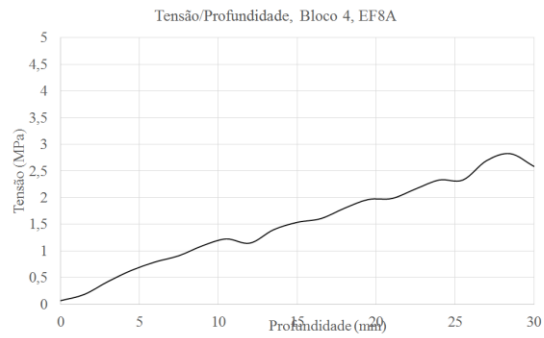
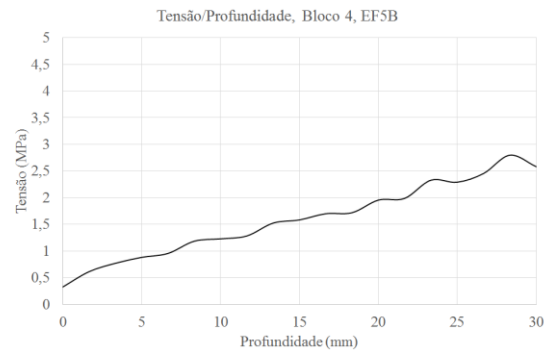
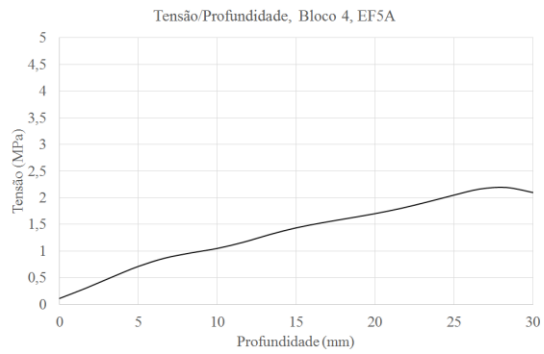
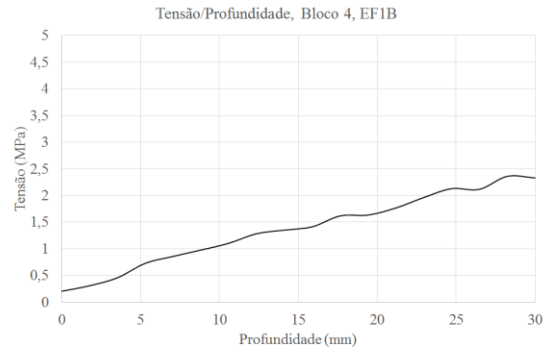
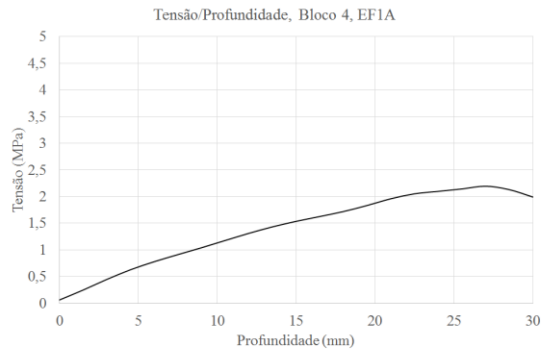
## Anexo D: Tensões obtidas com os extensômetros, Bloco 4.



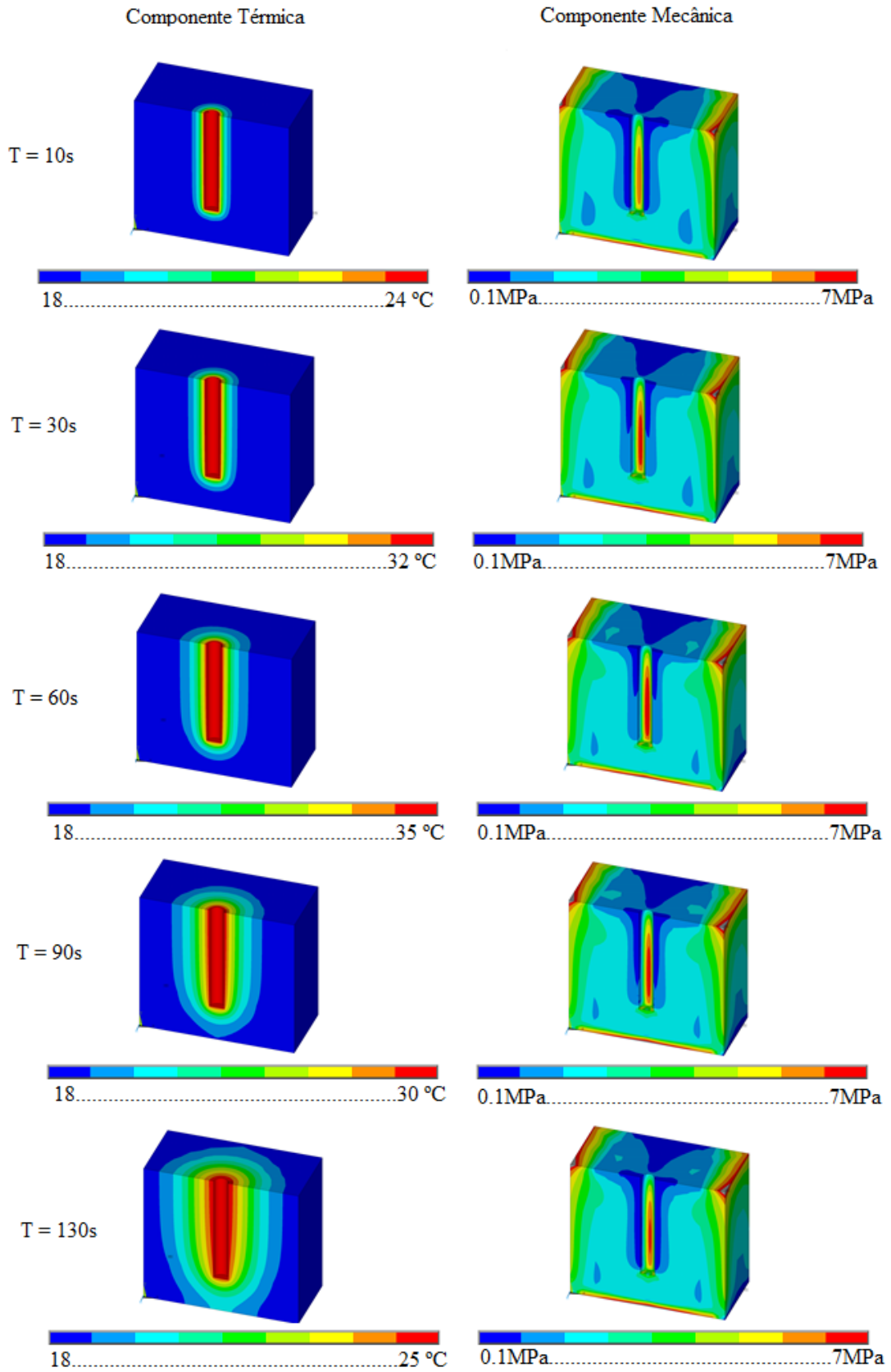
## Anexo E: Relação Tensão/Profundidade, Bloco 3.



## Anexo E: Relação Tensão/Profundidade, Bloco 4.



**Anexo F:** Componente térmica e mecânica para diferentes tempos, Bloco 3.



**Anexo F:** Componente térmica e mecânica para diferentes tempos, Bloco 4.

