

**Avaliação da temperatura no osso cortical sob processos de
furação com e sem irrigação**

João Carlos Pilar da Silva

Dissertação apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em

Tecnologia Biomédica

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professora Elza Maria Morais Fonseca

setembro de 2015

Agradecimentos

Quero prestar um agradecimento especial a todas as pessoas que colaboraram, direta e indiretamente na realização deste trabalho.

Agradeço, de forma especial, à minha orientadora Professora Elza Maria Morais Fonseca, pelo incansável apoio e dedicação prestados durante todo o ano letivo e por todos os conhecimentos transmitidos durante o meu percurso académico na ESTiG-IPB.

À Engenheira Goreti Fernandes, pela colaboração, ajuda e transmissão de conhecimentos durante a elaboração deste projeto.

Aos Engenheiros Jorge Meireles e Luísa Barreira pelo auxílio e apoio técnico durante o processo de furação e conhecimentos transmitidos.

Aos meus pais por todo o apoio e dedicação, pois sem eles nada disto seria possível.

À Sara, pela ajuda e carinho.

Aos meus amigos, por estarem sempre presentes.

Resumo

A geração de calor excessivo pode provocar danos prejudiciais em todos os processos de furação, no entanto, no osso assume maior relevância, não só pelas características do material, mas também pelas consequências provocadas poderem tornar-se irreversíveis. A necrose térmica é um problema associado à furação do osso. Segundo a literatura poderá ocorrer quando o osso é submetido a temperaturas de 50°C durante mais de 30s.

Os processos de furação são condicionados pelos diferentes parâmetros de furação e pelas propriedades da ferramenta de corte e do material a furar. De entre os principais parâmetros de furação destaca-se a velocidade de avanço, a rotação, a geometria da broca e o uso de irrigação. O uso apropriado dos diferentes parâmetros origina a diminuição da temperatura no material e na broca.

Neste trabalho foram utilizados materiais compósitos com propriedades idênticas ao osso cortical humano e ossos corticais de bovinos. Os parâmetros estudados foram o uso de irrigação através de ar comprimido, a velocidade de rotação e a profundidade do furo. Foi utilizado um procedimento experimental para registo da temperatura no material e na broca, ao longo de todo o processo de furação.

Após a componente experimental, foi realizada uma componente numérica, através de uma técnica de elementos finitos, para comparação dos resultados experimentais.

Através deste trabalho concluiu-se que o uso de irrigação é o parâmetro que mais influencia a temperatura durante os processos de furação. Também se conclui que a temperatura nos materiais durante a furação diminui com o aumento da velocidade de rotação, quando não é utilizada irrigação. No entanto, a temperatura nos materiais é bastante próxima para as duas velocidades utilizadas com irrigação, sendo ligeiramente maior para velocidades maiores.

Palavras-Chave: Furação, Irrigação, Temperatura, Velocidade de rotação.

Abstract

The excessive heat generation may cause prejudicial damage in all drilling processes, however, in the bone is more relevant, not only because of the material characteristics but also because effects may become irreversible. The thermal necrosis is a problem associated with bone drilling. According to the literature can occur when the bone is subjected to temperatures of 50 ° C for more than 30s.

The drilling processes are conditioned by the different parameters of drilling and by the properties of the cutting tool and the material to drill. The main drilling parameters are the feed rate, the rotational speed, the drill geometry and the use of irrigation. The appropriate use of different parameters causes the temperature decrease in the material and the drill bit.

In this work, composite materials with properties similar to human cortical bone, and bovine cortical bone were used. The studied parameters were the use of irrigation with compressed air, the rotational speed and the hole depth. An experimental procedure was used for temperature registration in the material and in the drill, during the drilling process.

After the experimental component, a numerical component was performed using a finite element technique for comparing the experimental results.

Through this study it was concluded that the use of irrigation is the parameter that most influence the temperature during the drilling process. It was also concluded that the temperature in the material during drilling decreases with the increase of drilling speed, without irrigation. However, the temperature in the material it is very close to the two speeds with irrigation, being slightly higher for higher speeds.

Keywords: Drilling, Irrigation, Temperature, Rotational speed

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Conteúdo	ix
Lista de símbolos	xiii
Lista de tabelas	xv
Lista de figuras	xvi
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Contextualização e Objetivos.....	2
1.2. Organização dos Capítulos.....	2
Capítulo 2	5
Revisão Bibliográfica	5
2.1. Propriedades Térmicas do Osso Cortical	6
2.2. Processo de Furação	7
2.2.1. Parâmetros da Furação.....	8
2.2.1.1. Velocidade de Rotação, Avanço e Força Aplicada.....	8
2.2.1.2. Geometria da Broca	10
2.2.2 Influência da Irrigação	12

Capítulo 3	13
Componente Experimental	13
3.1. Furação em Material Compósito	14
3.1.1. Materiais e Métodos	14
3.1.2. Resultados	16
3.1.2.1. Temperatura no Material Compósito	17
3.1.2.2. Temperatura na Broca	24
3.2 Furação em Osso Bovino	26
3.2.1 Materiais e Métodos	26
3.2.2 Resultados Obtidos	27
Capítulo 4	33
Componente Numérica	33
4.1. Introdução	34
4.2 Propriedades dos Materiais	35
4.3 Parâmetros de Furação	35
4.4 Análise Térmica	37
4.4.1 Modelo Numérico com Um Furo	37
4.4.2 Modelo Numérico com Oito Furos	40
4.4.3 Comparação do Modelo Numérico e Experimental	43
Capítulo 5	47
Conclusões e Trabalhos Futuros	47

5.1 Conclusões	48
5.2 Trabalhos Futuros.....	49
Referências Bibliográficas	51
Anexos.....	55
Anexo A	56
Anexo B.....	57
Anexo C	61
Anexo D	65
Anexo E.....	67
Anexo F.....	69
Anexo G	73

Lista de símbolos

BL1	Bloco 1
BL2	Bloco 2
CI	Com Irrigação
cp	Calor Específico (J/kg.K)
F_{fw}	Força de Corte Axial
F_i	Furo $i=1, \dots, 8$
m	Metro
mm	Milímetro
M_w	Momento Torsor
n	Velocidade de Rotação
N	Newton
P_c	Potência Total de Corte
P_f	Potência Derivada da Força de Corte
P_m	Potência Derivada da Torção de Corte
q	Fluxo de Calor
RPM	Rotações por Minuto
s	Segundo
SI	Sem Irrigação
V	Volume
V_f	Velocidade de Corte
λ	Condutividade Térmica (W/m.K)
ρ	Massa volúmica (kg/m ³)

°C	Grau Celsius
α	Convecção
3D	Três Dimensões

Lista de tabelas

Tabela 1. Parâmetros de furação.....	16
Tabela 2. Temperatura na broca, °C.	25
Tabela 3. Parâmetros de furação.....	27
Tabela 4. Temperaturas na broca, furação material ex-vivo e compósito.....	28
Tabela 5. Variação de temperatura no material ex-vivo e compósito a 800RPM.....	29
Tabela 6. Variação de temperatura no material ex-vivo e compósito a 900RPM.....	29
Tabela 7. Resultados obtidos	30
Tabela 8. Propriedades dos materiais	35
Tabela 9. Parâmetros utilizados na furação	36
Tabela 10. Fluxo do calor para os dois blocos	36
Tabela 11. Condições fronteira para os diferentes modelos.....	37
Tabela 12: Variação da temperatura para os 4 modelos.....	39
Tabela 13. Comparação das temperaturas obtidos nos diferentes modelos	45

Lista de figuras

Figura 1. Blocos em material compósito da Sawbones	14
Figura 2. Posição dos termopares	15
Figura 3. Setup experimental.....	15
Figura 4. Equipamento utilizado na furação do material compósito.....	16
Figura 5. Evolução das temperaturas no lado A, CI/SI.....	17
Figura 6. Evolução das temperaturas no lado B, CI/SI	18
Figura 7. Evolução das temperaturas nos furos CI e SI no BL1	19
Figura 8. Evolução das temperaturas nos furos CI e SI no BL2	20
Figura 9. Evolução das temperaturas com 600 e 1200RPM no lado A.....	22
Figura 10. Evolução das temperaturas com 600 e 1200RPM no lado B.....	23
Figura 11. Imagens térmicas do BL1, lado A, F6	24
Figura 12. Imagens térmicas do BL2, lado A, F7	24
Figura 13. Osso bovino e blocos da Sawbones antes da furação	26
Figura 14. Equipamento utilizado na furação do osso bovino e blocos	27
Figura 15. Elemento Solid70 do Ansys® [20]	34
Figura 16. Malha utilizada para os 4 modelos de 1 furo	37
Figura 17. Temperaturas no final da furação com 600RPM e 1200RPM, CI/SI	38
Figura 18. Malha utilizada para os 2 modelos de 8 furos.....	40

Figura 19. Temperaturas no final de cada furação, com 600RPM	41
Figura 20. Temperaturas no final de cada furação, com 1200RPM	42
Figura 21. Evolução das temperaturas nos modelos experimental (exp) e numérico (num) no lado A.....	43
Figura 22. Evolução das temperaturas nos modelos experimental (exp) e numérico (num) no lado B.....	44

Capítulo 1

Introdução

1.1. Contextualização e Objetivos

O osso humano é um tecido vivo que constitui a maior parte do corpo humano. O osso é constituído por dois tipos de estruturas: osso trabecular ou esponjoso e osso cortical ou compacto. Neste trabalho, a estrutura óssea envolvida no estudo é o osso cortical, que forma a camada externa de todos os ossos, sendo denso e rodeando o osso esponjoso, com uma taxa de renovação lenta [1].

O processo de furação do osso é condicionado por diversos fatores que influenciam a temperatura no osso e na broca. A geração de calor no osso pode provocar necrose térmica sendo de grande importância a conjugação de todos os parâmetros envolvidos no processo, de forma a diminuir a temperatura.

Este trabalho tem como objetivo avaliar as temperaturas ocorridas no processo de furação com e sem utilização de irrigação, utilizando diferentes velocidades de rotação e velocidades de avanço constantes. Serão desenvolvidos modelos experimentais, utilizando-se materiais compósitos, com propriedades idênticas ao osso cortical humano, e amostras de ossos corticais de bovinos. Também serão desenvolvidos modelos numéricos validados com os resultados obtidos experimentalmente.

1.2. Organização dos Capítulos

O presente trabalho foi organizado em cinco capítulos, contendo os primeiros capítulos uma abordagem aos conceitos teóricos e trabalhos relacionados com este tema. Os restantes capítulos referem-se ao trabalho realizado e às conclusões obtidas. Neste trabalho ainda se encontram disponíveis sete anexos que auxiliam a compreensão dos resultados.

O primeiro capítulo é a introdução do tema, os objetivos e a organização do trabalho.

No capítulo 2 é realizada uma revisão da bibliografia, abordando alguns trabalhos considerados importantes para um melhor conhecimento do estado da arte.

O capítulo 3 apresenta a componente experimental e está dividido em duas partes: a furação em material compósito, com os resultados obtidos utilizando diferentes velocidades de rotação e uso alternado de irrigação, e a furação em osso bovino. Também estão presentes, neste capítulo, todos os procedimentos e materiais utilizados.

No capítulo 4 é apresentada a componente numérica do processo de furação para obtenção das temperaturas, e a comparação entre os modelos experimental e numérico.

O capítulo 5 destina-se às conclusões de todo o trabalho e a possíveis trabalhos a realizar no futuro.

Os anexos foram estruturados de A a G. No anexo A encontra-se o desenho em SolidWorks da furação do material compósito. Nos anexos B e C apresentam-se os gráficos e as tabelas dos diferentes furos da componente experimental com furação em material compósito. O anexo D refere-se à comparação entre furos com irrigação e sem irrigação, e o anexo E é relativo à comparação das diferentes velocidades de rotação. No anexo F encontram-se as imagens termográficas da broca de todos os furos da componente experimental em material compósito. Finalmente, no anexo G estão representadas as tabelas das diferentes temperaturas da componente experimental com furação em material bovino.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Propriedades Térmicas do Osso Cortical

O osso tem uma estrutura muito complexa, sendo constituído por dois setores com características diferentes: a parte mais compacta ou cortical, e a parte esponjosa ou trabecular. A dureza do osso depende da sua densidade mineral. Augustin *et al.*, em 2012, citando Karaca *et al.*, em 2011, afirmou que quanto maior a densidade óssea, maior a temperatura que ocorrerá durante um processo de furação, para um mesmo conjunto de parâmetros de furação. De entre as propriedades térmicas do osso cortical, neste trabalho serão importantes, a condutividade térmica, a massa volúmica e o calor específico do osso [2]. Em relação à condutividade térmica, diversos estudos mostram resultados distintos, com ordens de grandeza diferentes.

Davidson, em 1999, cita o trabalho de Vachon *et al.*, em 1967, que utilizou uma técnica de “comparação térmica” para medir a condutividade do osso. Os valores da condutividade térmica encontrados por Vachon *et al.* foram de 0,601 e 2,269 [W/mK] [3].

No mesmo estudo Davidson menciona os estudos realizados por Lundskog, em 1972, onde foi utilizado um método experimental onde a condutividade era calculada através de termopares diferenciais e obteve o valor de 3,56 [W/mK] e por Zelenov, em 1985, que utilizou também um método experimental e obteve valores de condutividade térmica para o osso de 12,8, 9,7 e 9,9 [W/mK] [3].

Ainda no mesmo estudo, Davidson refere o trabalho de Biyikli *et al.*, em 1986, onde são publicados os valores da condutividade térmica do osso entre 0,2 e 0,3 [W/mK], determinados através de ensaios experimentais [3].

Huiskes, em 1980, citado por Davidson, realizou investigações para medição da massa volúmica do osso cortical e concluiu que os valores variavam entre 1860 e 2900 [kg/m³], com uma média de 2200 kg/m³ [3]. Também Fonseca *et al.*, em 2014, apresentam um valor semelhante considerando a massa volúmica do osso cortical igual a 2100 [kg/m³] [4].

Huiskes publicou valores correspondentes ao calor específico do osso, tendo obtido valores compreendidos entre 1150 e 1730 [J/kg.K], ou igual a 1260 [J/kg.K] [3]. Fonseca

et al., em concordância com Huiskes, apresentam um valor próximo de 1260 [J/kg.K] [4].

2.2. Processo de Furação

Em qualquer hospital ou clínica, os processos de furação óssea são executados várias vezes ao dia por diferentes especialidades clínicas, como cirurgia ortopédica, maxilo-facial e neurocirurgia, entre muitas outras.

Hoje em dia, com os avanços da tecnologia, os processos de furação são elétricos atingindo maior precisão e exatidão na execução do furo. No entanto, existem diversos fatores relacionados com o processo de furação, como as velocidades (de rotação e avanço), as diferentes geometrias da broca (diâmetro, comprimento, ângulo de ponta, etc.), a aplicação ou não de irrigação, que influenciam o aumento da temperatura quer na broca, quer no osso. Para determinadas temperaturas a que o osso possa estar sujeito pode ocorrer necrose celular [5].

O processo de furação pode ser definido como o corte através de arranque de aparas, com base em dois movimentos em simultâneo, movimento de rotação (de corte) e movimento de translação (de avanço ou penetração) [6].

Assim sendo, todos os estudos que permitam encontrar os parâmetros ótimos de furação devem ser considerados no auxílio à cirurgia [6].

O dano causado no osso pelo calor e a dificuldade em conduzir calor para fora da superfície de corte, é um problema que afeta a estrutura óssea. Apesar de algum do calor gerado durante a furação ser parcialmente dissipado pela presença de sangue e de fluidos corporais, a temperatura pode ser significativamente elevada num furo profundo do osso cortical [7].

Hillery *et al.*, em 1999 refere que segundo Lundskog, ocorrerá necrose celular, se o osso estiver exposto a 50°C durante mais de 30s e que para Mortiz e Henrique, quando as células epiteliais são expostas a uma temperatura de 70°C sofrem dano imediatamente, ou em situação de temperatura a 55°C durante 30s [7].

2.2.1. Parâmetros da Furação

Os parâmetros de furação mais estudados até ao momento, têm sido a velocidade de rotação e de avanço e a força aplicada. A força axial consiste na força necessária para manter o avanço constante. O binário consiste na torção que é necessária para manter a velocidade de rotação constante [8]. Para a medição dos parâmetros referidos anteriormente têm sido realizadas diferentes investigações: através do exame histológico do osso e da medição da temperatura máxima nas várias secções do furo. Apesar da medição da temperatura ser de maior interesse nos estudos correntes, o estudo histológico fornece provas do dano térmico e motiva o interesse na medição da temperatura [3].

2.2.1.1. Velocidade de Rotação, Avanço e Força Aplicada

Através de investigações baseadas no exame histológico do osso, Davidson em 1999 cita Thompson e Pallen, em 1958 e 1960, que constataram que a espessura da necrose aumentava com o aumento da velocidade de rotação desde 125 a 2000RPM, para processos sem irrigação [3].

Kramer, em 1960, utilizando dentes extraídos e água como irrigação, verificou, como menciona Davidson, que o dano causado pelo calor acontece com velocidades de rotação elevadas (320000RPM vs. 4000 a 8000RPM). Mostrou ainda que o dano causado, quando utilizadas velocidades elevadas, é causado unicamente pelo calor [3].

Em 1964, Moss, citado por Davidson, investigou o efeito de elevadas velocidades de rotação desde 40000 a mais de 350000RPM, em mandíbulas caninas e sem irrigação, com diferentes brocas e velocidades diferentes. Mediu a zona celular após duas semanas e chegou à conclusão que não havia desvantagem em usar velocidades de rotação ultra-rápidas [3].

Davidson referiu que um ano depois, Spatz comparou a regeneração recente (1, 2 e 7 dias) em mandíbulas caninas e sem irrigação com 12000 e 300000RPM. Mostrou que havia menos “trauma” e a regeneração era mais rápida com velocidades de rotação ultra-rápidas [3].

No ano seguinte, Boyne com velocidades de 5000 e 200000RPM e utilizando água como irrigação, demonstrou, segundo Davidson, que a curto prazo com maiores velocida-

des de rotação a regeneração era mais rápida, mas não havia diferenças significativas a longo prazo. O estudo de Boyne está em concordância com Moss e Spatz, mas entra em conflito com Thompson e Pallan [3].

Em geral, os estudos histológicos parecem suportar o uso de velocidades de rotação elevadas na furação do osso. No entanto, para baixa velocidade de rotação (menor que 2500RPM), parece acontecer o contrário, conforme o estudo de Thompson e Pallan [3].

Nos estudos da medição da temperatura máxima, encontrada nas várias secções do furo, Davidson afirmou que Thompson constatou que a temperatura, nas distâncias de 2,5 e 5,0mm do local de furação, aumenta com o aumento da velocidade de rotação de 125 a 2000RPM. Estes resultados estão em concordância com o estudo histológico e foram confirmados mais tarde por Pallan [3].

Rafel, em 1962, utilizando mandíbulas de cadáveres humanos e sem qualquer tipo de irrigação contrariou, como refere Davidson, estes resultados mostrando que a temperatura máxima ocorria a baixas velocidades de rotação, tendo utilizado 10000 e 350000RPM [3].

Davidson refere que em 1972, Mattews e Hirsch, com estudos mais rigorosos determinaram a temperatura máxima em fêmures humanos de cadáveres e descobriram que a temperatura diminuía com a aplicação de forças desde 19,6 a 117,6N e velocidades de rotação de 145 a 2900RPM. Utilizaram brocas cirúrgicas helicoidais sem irrigação e mostraram que tanto a temperatura máxima, como a duração da temperatura acima de 50°C, diminuía com o aumento da força. Estes resultados contradizem os de Thompson 14 anos antes [3].

Vaughn e Peyton, em 1951, furando molares extraídos, e sem utilizarem irrigação, afirmaram, segundo Davidson, que a temperatura aumentava, tanto com o aumento da velocidade de rotação (desde 1155 a 11300RPM), como com o aumento da força aplicada. Estes resultados não estão em concordância com os de Mattews e Hirsch [3].

Em 1964, Sorenson *et al.*, citados por Davidson, furaram blocos de dentina e descobriram que a quantidade de calor na amostra aumentava com o aumento da força aplicada de 0,3 a 0,5N, mas depois diminuía conforme a força aumentava. O comportamento

calor vs. força é semelhante ao comportamento temperatura máxima vs. força medido por Abouzgia e James em 1997 [3].

Davidson refere que em 1982, Krause *et al.*, realizaram ensaios em fêmures de cadáveres bovinos sem irrigação e com brocas rotativas, variando a taxa de alimentação e a profundidade do corte. Usaram duas velocidades de rotação (20000 e 100000RPM) e dois tipos de broca. Notaram que a temperatura máxima diminuía com o aumento da taxa de alimentação (de 1,80 a 6,35mm/s). Quanto à velocidade de rotação o seu aumento foi ambíguo, enquanto a temperatura diminuiu significativamente em 100000RPM para uma broca, o mesmo não aconteceu para a outra. De notar que o aumento da taxa de alimentação requer o aumento da força aplicada e que os resultados de Krause *et al.* são semelhantes aos obtidos por Matthews e Hirsch [3].

Mais de uma década depois de Matthews e Hirsch terem examinado a temperatura durante a furação do osso, Matthews *et al.* mediram temperaturas durante a inserção de pinos esqueléticos em ossos longos de cadáveres humanos sem irrigação. Foram comparadas as furações manuais (60 e 120RPM) e as furações elétricas (300 e 700RPM). A temperatura máxima foi observada a 700RPM, seguida das furações manuais e por fim a 300RPM na furação elétrica. A duração da temperatura máxima acima de 50°C, contrariamente, ocorreu durante a furação manual, seguido da elétrica a 300RPM e por fim a 700RPM [3]. Os resultados destes estudos são, então, divididos em 2 grupos: os que indicam o aumento da temperatura com o aumento da velocidade de furação e com a força aplicada, e os que indicam o oposto [3].

2.2.1.2. Geometria da Broca

De entre as principais características a ter em conta na escolha da broca para a furação, realça-se o tipo de material, o comprimento, diâmetro, o número de arestas de corte, o tipo de haste e os diferentes ângulos [6].

As brocas são normalmente agrupadas em três tipos principais: reafiáveis, de pastilha e de lâmina. As brocas de lâmina são normalmente utilizadas para furos com diâmetros superiores a 25mm, não permitem velocidades muito elevadas (devido às lâminas de corte serem feitas em aço rápido) mas permitem avanços severos (1,5 a 5 vezes mais, aos das brocas helicoidais), apresentam ângulos de ponta superiores a 140°. As brocas

de pastilhas conseguem realizar furos entre 18,5 e 56mm de diâmetro, sendo a profundidade limitada a 2 ou 3 vezes o diâmetro, permitem grandes velocidades de corte e avanço e têm o ângulo de ponta entre 170° e 200°. As brocas reafiáveis existem em diversos tipos (helicoidal, escalonada, de pontear, de ponta, canhão, etc.) sendo que a helicoidal é a mais conhecida e utilizada, em cerca de 80% em todos os processos de furação. Tem vantagens como a elevada produtividade, robustez, facilidade de saída de aparas, geometria adequada e permite o reafiamento consecutivo, tornando-a como a ferramenta de corte mais comum para trabalhos correntes de furação. Normalmente o diâmetro associado a estas brocas encontra-se entre 0,15 e 80mm e é constituída por um cabo ou haste, corpo e ponta. As aparas são removidas através dos dois canais helicoidais da broca [6].

Os fatores que mais influenciam a geometria adequada de corte são o material que se pretende maquinar, a temperatura gerada na broca, a profundidade, o diâmetro do furo, a qualidade do furo, a formação de aparas à entrada e saída do furo, bem como o tipo de aparas esperada [6].

Na literatura, diversos ângulos de ponta foram sugeridos para o processo de furação. Bertollo *et al.*, em 2011 citam Jacob e Berry em 1976, afirmando que eles recomendaram para a furação do osso, o ângulo de ponta de 90°, enquanto Pate *et al.* e Natali *et al.* em 1982 e 1996, respetivamente, propuseram o valor de 118°. No entanto, o ângulo de ponta parece ter pouca influência no aumento da temperatura como mostraram Augustin, Davila *et al.* em 2008, quando procederam a furações em osso bovinos com ângulos de 80°, 100° e 120°, não distinguindo diferenças significativas na temperatura. Também Hillery e Shuaib, em 1999, não distinguiram diferenças significativas quando testaram ângulos de ponta de 70°, 80° e 90° [9].

Numa análise numérica conduzida por Basiaga *et al.* em 2011, utilizando 5 velocidades de rotação diferentes desde 250 a 1400RPM, compararam o fluxo de calor no contacto entre a ferramenta e o osso para ângulos de ponta de 90° e 120°. Os resultados mostraram que para ângulos de 120° a temperatura era significativamente maior do que para 90° sendo que quanto maior a velocidade de rotação, maior a diferença de temperaturas entre os dois ângulos [10].

2.2.2 Influência da Irrigação

O uso de irrigação aumenta a dissipação de calor durante a furação em implantes dentários e diminui a temperatura no osso. Existem dois tipos de irrigação, a externa e a interna [11]. Na irrigação externa o sistema fornece fluido ou ar na parede externa da broca e do osso. Pode ser regulada continuamente através de sistemas automáticos ou manualmente com seringas contendo fluido isotônico [2]. Um estudo realizado por Matthews e Hirsch em 1972, é mencionado por Augustin *et al.*, em 2012, e mostra que quanto maior a irrigação externa, menor é a temperatura no osso. A irrigação a 500ml/min é adequada para diminuir a temperatura abaixo de 50°C [2]. Na irrigação interna, segundo Kalindindi em 2004, o fluido ou ar comprimido atravessa a broca. Segundo ele, a sua introdução foi feita por Kirschner e Meyer, em 1975, na odontologia. Estes autores afirmaram que, quando o líquido era introduzido perto da ponta da broca, criava um efeito de refrigeração no osso [11].

Kalindindi também citou o trabalho de Haider *et al.*, em 1993, que nos seus estudos histológicos demonstraram que a adição de refrigeração externa parecia beneficiar qualquer sistema interno, particularmente no osso compacto [11].

Salgueiredo *et al.*, em 2009, afirmaram que o uso de irrigação pode levar à diminuição de temperatura até 4°C utilizando brocas odontológicas de MCD/NCD com bicamada revestida [12].

Kalidindi, em 2004, comparou a furação com e sem irrigação, observando um aumento significativo de temperatura na furação sem irrigação. Em 1980, Lavelle e Wedgwood em estudos feitos *in vitro*, usando baixas velocidades de rotação observaram, segundo Kalindindi, que o calor gerado de fricção durante a furação do osso era reduzido pela irrigação interna. Num estudo mais recente, em 2007, Augustin *et al.* mostraram que a irrigação, mesmo com água a 26°C, é o fator mais importante na diminuição da temperatura durante o processo de furações [2].

Capítulo 3

Componente Experimental

3.1. Furação em Material Compósito

3.1.1. Materiais e Métodos

Para a realização da parte experimental foram utilizados dois blocos idênticos em material compósito, da *Sawbones*, com dimensões de 130x180x40mm. Ambos os blocos possuíam propriedades mecânicas similares ao osso cortical humano, sendo a massa volúmica igual a 800kg/m^3 [13].

Os blocos foram identificados como bloco 1 (BL1) e bloco 2 (BL2) e os seus lados identificados por lado A e lado B, como se visualiza nas Figuras 1 e 2. Os blocos apresentados foram utilizados para a medição da temperatura durante o processo de furação.



Figura 1. Blocos em material compósito da *Sawbones*

A preparação dos 2 blocos exigiu uma furação prévia lateral para a posterior colocação dos termopares. Foram realizadas um total de 96 furações laterais, 48 em cada bloco e 24 em cada lado. A distribuição dos termopares nos furos laterais seguiu uma identificação, tendo sido designados por T, M ou R conforme a distância ao topo do bloco, ou seja, à zona de furação. Os termopares T encontravam-se a 7mm do topo, os M a 14mm e os termopares R encontravam-se a 21mm, sendo os mais afastados do local de furação.

A Figura 2 representa um desenho para a visualização da furação lateral em cada lado do bloco. As distâncias são consideradas iguais nos dois blocos (BL1 e BL2) e nos dois lados (A e B). No lado A de cada bloco os furos encontravam-se todos à mesma distância da broca, no lado B encontravam-se a distâncias diferentes.

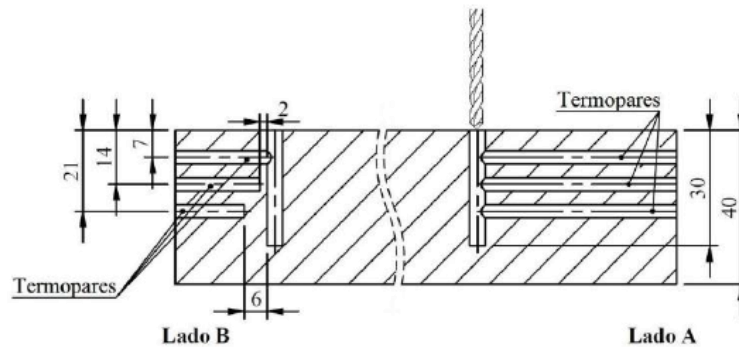


Figura 2. Posição dos termopares

Posteriormente foram efetuadas as furações verticais para obtenção dos valores de temperatura no interior dos blocos e simultaneamente na ferramenta de corte. O Anexo A representa o desenho com a posição das furações laterais no bloco.

Para o registo da temperatura nos materiais compósitos foram utilizados termopares do tipo K (NiCr-NiAl) [14]. Os termopares foram inseridos lateralmente ligados a um sistema de aquisição de dados, o MGCplus, com ligação a um computador. As temperaturas na broca foram registadas com uma câmara termográfica, FLIR®T363, posicionada a 1,5m da zona de furação, para a recolha de imagens em todos os furos à entrada (imediatamente antes da furação) e à saída (imediatamente após a furação).

No total foram realizados 32 furos (16 em cada bloco, sendo 8 em cada lado). A furação foi efetuada numa máquina CNC, tendo sido utilizada uma broca de aço rápido sinterizado com 4mm de diâmetro, 30mm de comprimento e ângulo de ponta 118°. A Figura 3 representa o *setup* experimental do procedimento utilizado durante as furações.

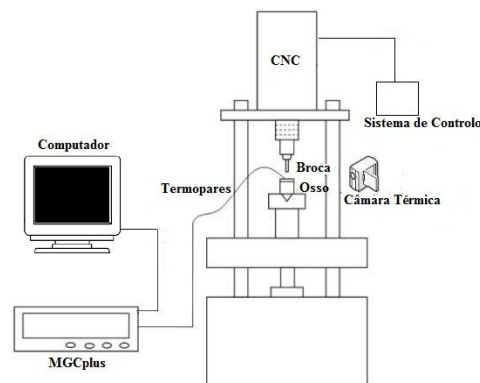


Figura 3. Setup experimental

Na Figura 4 encontra-se representado todo o equipamento utilizado no ensaio, sistema de aquisição de dados, bloco compósito instrumentado, furação e termografia.



Figura 4. Equipamento utilizado na furação do material compósito

Nos parâmetros de furação a velocidade de avanço foi constante e igual em todos os furos a 50mm/min. A velocidade de rotação foi diferente para os dois blocos, no BL1 a velocidade de rotação foi de 600RPM e no BL2 a velocidade de rotação utilizada igual a 1200RPM.

Durante o processo de furação foi utilizada irrigação, através de ar comprimido, em alguns furos de forma alternada. Os furos onde foi utilizada irrigação denominaram-se furos CI e os furos sem irrigação por SI. Foi considerado um tempo total de furação de 91s, sendo 36s o tempo decorrido na furação e 55s o tempo de arrefecimento da broca. Todos os parâmetros de furação referidos neste capítulo encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de furação

Parâmetros de furação	BL1 (CI/SI) Lado A/B	BL2 (CI/SI) Lado A/B
Velocidade de rotação	600RPM	1200RPM
Diâmetro da broca	4mm	
Velocidade de avanço	50mm/min	
Tempo total (furação + arrefecimento)	36s + 55s	

3.1.2. Resultados

Os resultados obtidos neste modelo experimental podem ser agrupados em dois grupos: resultados da temperatura no material e resultados da temperatura na broca.

3.1.2.1. Temperatura no Material Compósito

Na Figura 5 estão representados os gráficos de alguns furos, lado A, para os blocos BL1 e BL2, nas diferentes posições de medição T, M e R. De referir que, para o furo 5 (F5) do BL1, lado A, não houve registo de temperaturas por anomalia dos termopares.

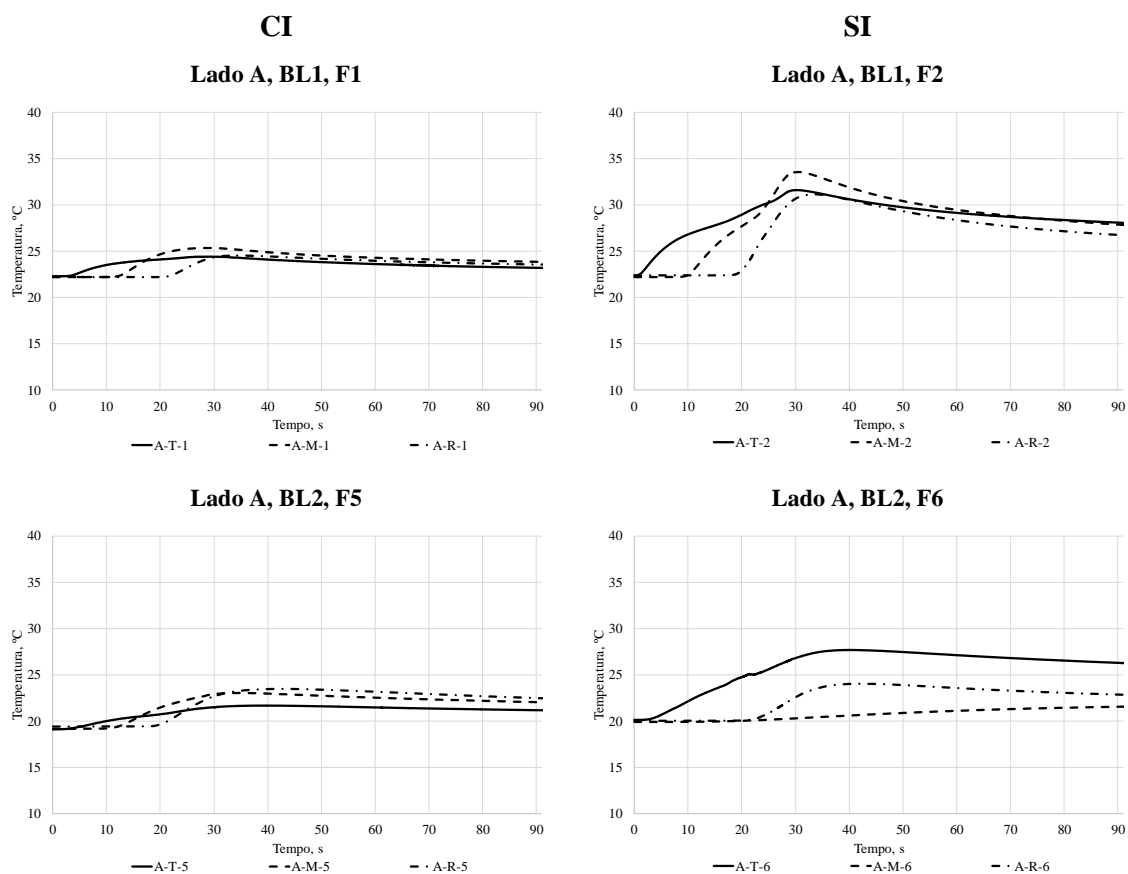


Figura 5. Evolução das temperaturas no lado A, CI/SI

No Anexo B estão disponíveis os restantes gráficos representativos dos furos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do BL1, lado A e dos furos 1, 2, 3, 4, 7 e 8 do BL2 lado A. No Anexo C estão disponíveis tabelas referentes aos furos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do BL1, lado A e os furos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do BL2, lado A com os valores da temperatura máxima, mínima e média registada, e ainda os valores exatos da variação de temperatura ocorrida.

Relativamente aos gráficos do lado A, em que os termopares se encontravam à mesma distância do local de furação, é possível verificar uma tendência nos termopares T e M para registarem maior variação de temperatura comparativamente aos termopares R. Apesar dos três termopares se encontrarem à mesma distância do furo, o tempo de ex-

posição de furação é maior nos termopares superiores, devendo ser esta a explicação para a diferença de temperaturas. Observa-se ainda, como era previsto, que nas furações em que foi utilizada irrigação a variação de temperatura foi sempre inferior às furações em que não foi utilizada.

Na Figura 6 encontra-se a representação dos furos do lado B nas diferentes posições T, M e R, para os blocos BL1 e BL2.

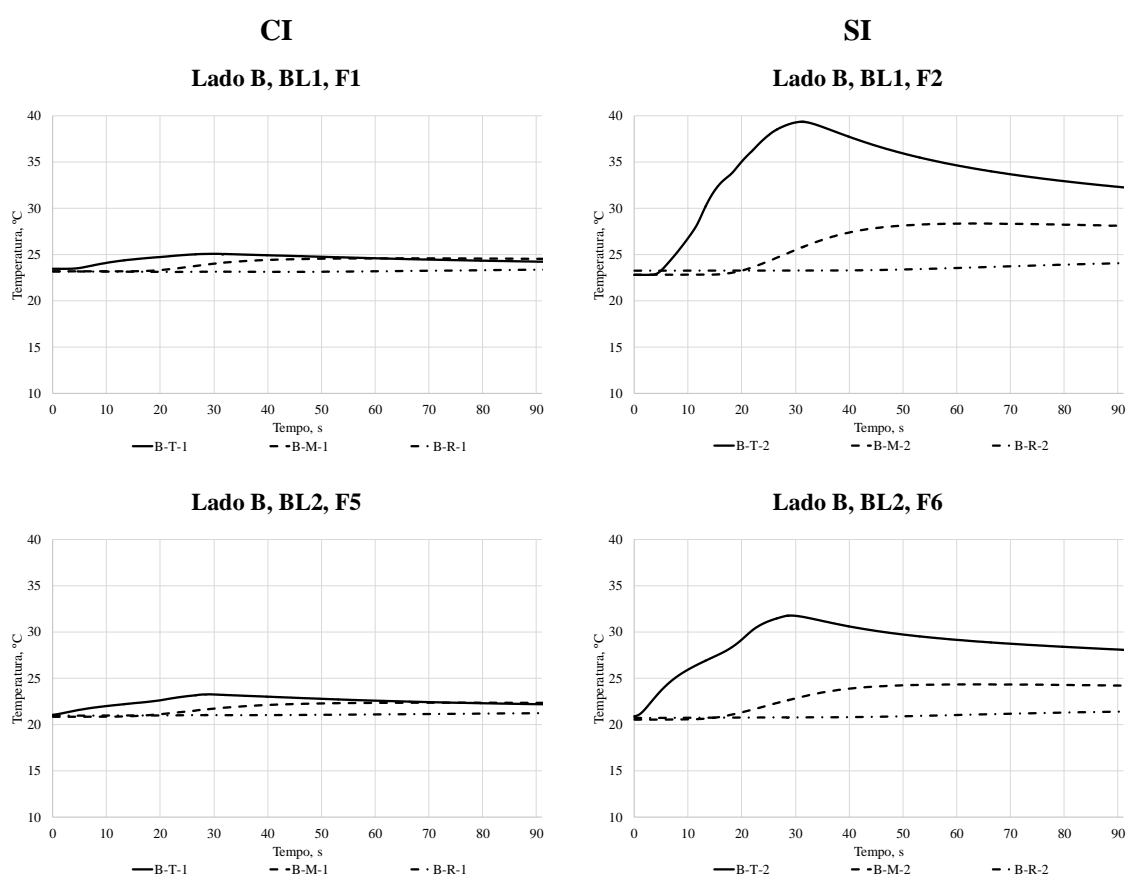


Figura 6. Evolução das temperaturas no lado B, CI/SI

No Anexo B estão também disponíveis as representações gráficas dos restantes furos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do BL1, lado B e dos furos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do BL2 lado B. No Anexo C encontram-se as tabelas com os valores de temperatura máxima, média e mínima registada, bem como a variação de temperatura ocorrida nos furos do BL1 e BL2, lado B.

Na Figura 6 relativa ao lado B, termopares a distâncias diferentes do local de furação, observa-se que os termopares mais próximos do furo (T) são aqueles que registam maiores temperaturas. Os termopares intermédios (M) sofrem uma variação intermédia de

temperatura e os termopares mais afastados (R) sofrem uma variação muito reduzida, normalmente próxima de 1°C, pouco significativa. Estas diferenças são mais notórias nos furos em que não foi utilizada irrigação, sendo as temperaturas mais elevadas.

Relativamente às diferenças de temperatura entre furos com irrigação (CI) e sem irrigação (SI), na Figura 7 encontra-se a representação de 8 furos, 4 com irrigação e 4 sem irrigação, no bloco 1, para os diferentes lados e posições.

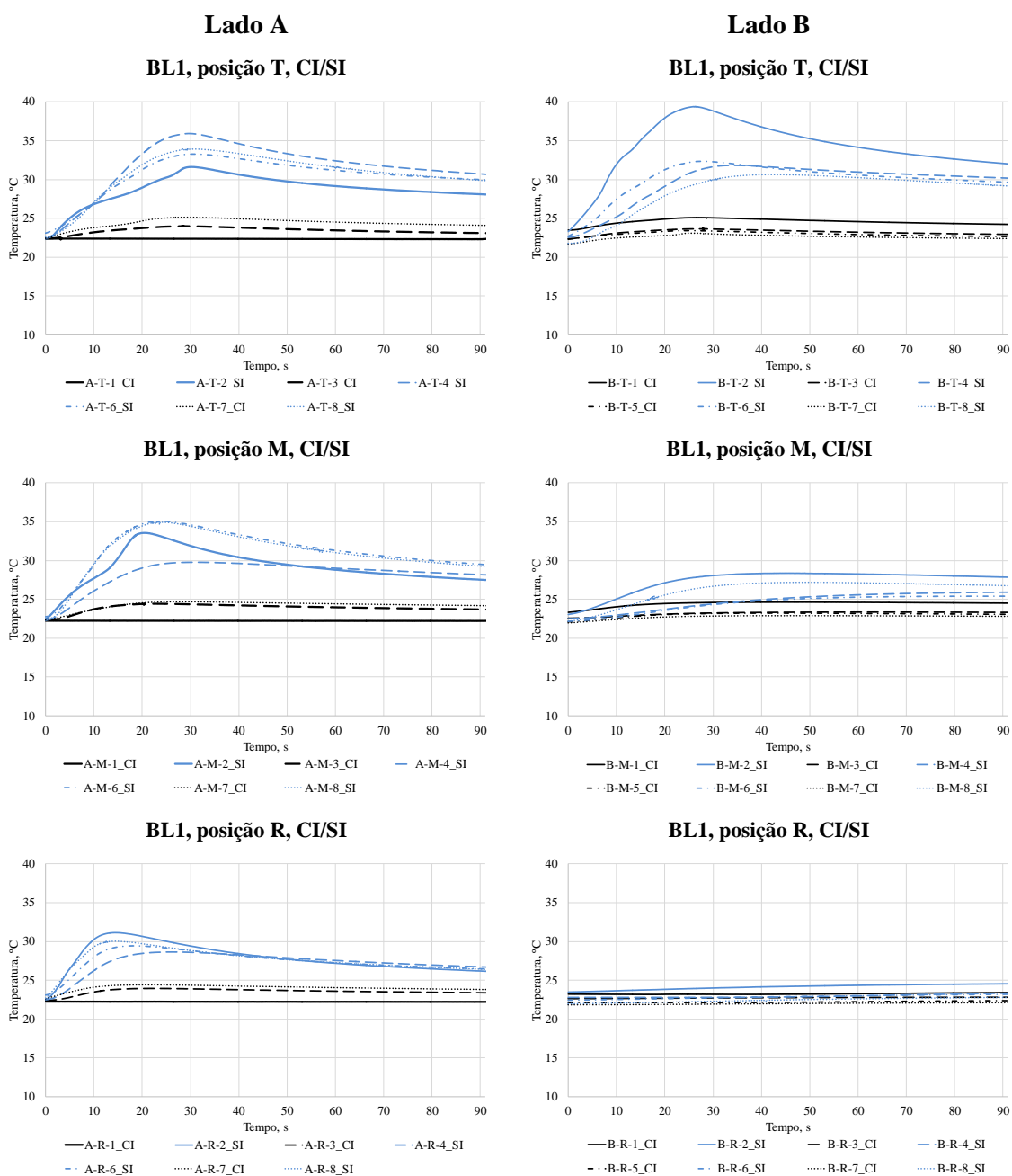


Figura 7. Evolução das temperaturas nos furos CI e SI no BL1

Na Figura 8 encontra-se a representação de 8 furos, 4 com irrigação e 4 sem irrigação, no bloco 2, para os diferentes lados e posições

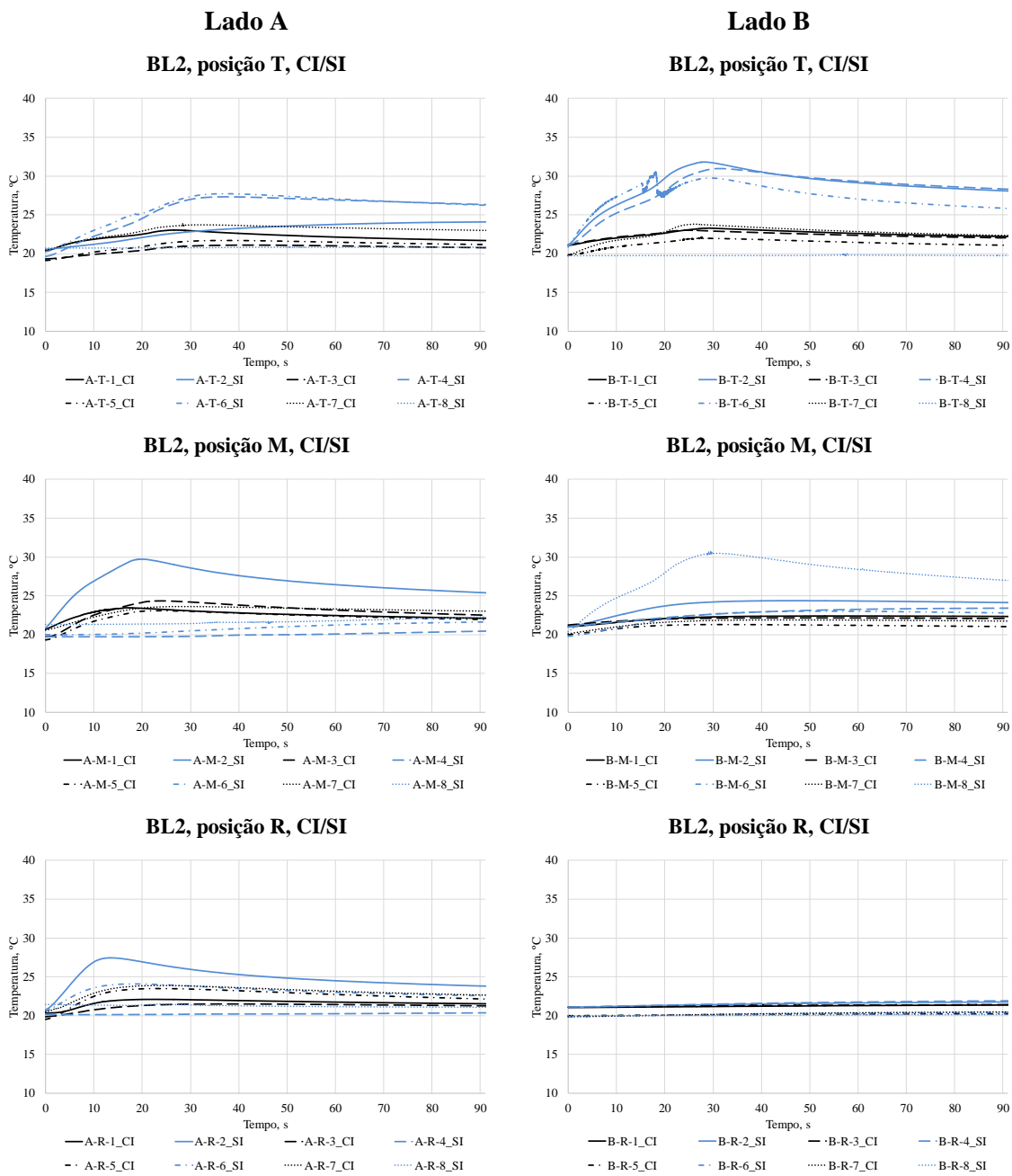


Figura 8. Evolução das temperaturas nos furos CI e SI no BL2

No Anexo D, é possível visualizar tabelas com os valores correspondentes de temperatura máxima, média e mínima e a variação da mesma, relativamente aos resultados de cada gráfico do BL1 e BL2.

Através das figuras anteriores e das tabelas presentes no Anexo D verifica-se que, os furos em que foi utilizada irrigação (CI), apresentam variações de temperatura significativamente baixas em relação aos furos sem irrigação (SI). Observando, por exemplo, na Figura 7 o gráfico relativo ao lado A, posição T, é notória a diferença entre os furos CI e os furos SI. Analisando a respetiva tabela, a variação de temperatura para os furos SI é de 10°C enquanto a variação para os furos CI não ultrapassa os 3°C.

De referir que, em determinados gráficos, não é perceptível a diferença entre os furos CI e SI. No entanto, através das tabelas, essas diferenças são observáveis. No caso do gráfico relativo ao lado B, na posição R, Figura 8, verifica-se que não é possível determinar os furos com menor variação de temperatura, no entanto, analisando a tabela do anexo, os furos SI registaram uma variação de temperatura ligeiramente superior aos furos CI.

Analisando os diferentes lados verifica-se que as temperaturas são semelhantes nas diferentes posições T, M e R no lado A para ambos os blocos, no entanto, no lado B verifica-se uma diminuição da temperatura nas posições mais afastadas do local de furação (M e R), sendo as temperaturas na posição R muito próximas entre furos CI e SI. Esta situação ocorre principalmente nos furos SI.

Todos os furos realizados com irrigação obtiveram valores inferiores aos furos sem irrigação, confirmando-se assim que a irrigação é o principal fator de diminuição da temperatura em processos de furação.

Os dados recolhidos para a diferença de temperatura nos dois blocos foram analisados com base em duas velocidades de rotação, no BL1 (600RPM) e BL2 (1200RPM), para furos com irrigação (CI) e sem irrigação (SI). Na Figura 9 encontram-se os gráficos das diferentes posições T, M e R do lado A, para as duas velocidades de rotação.

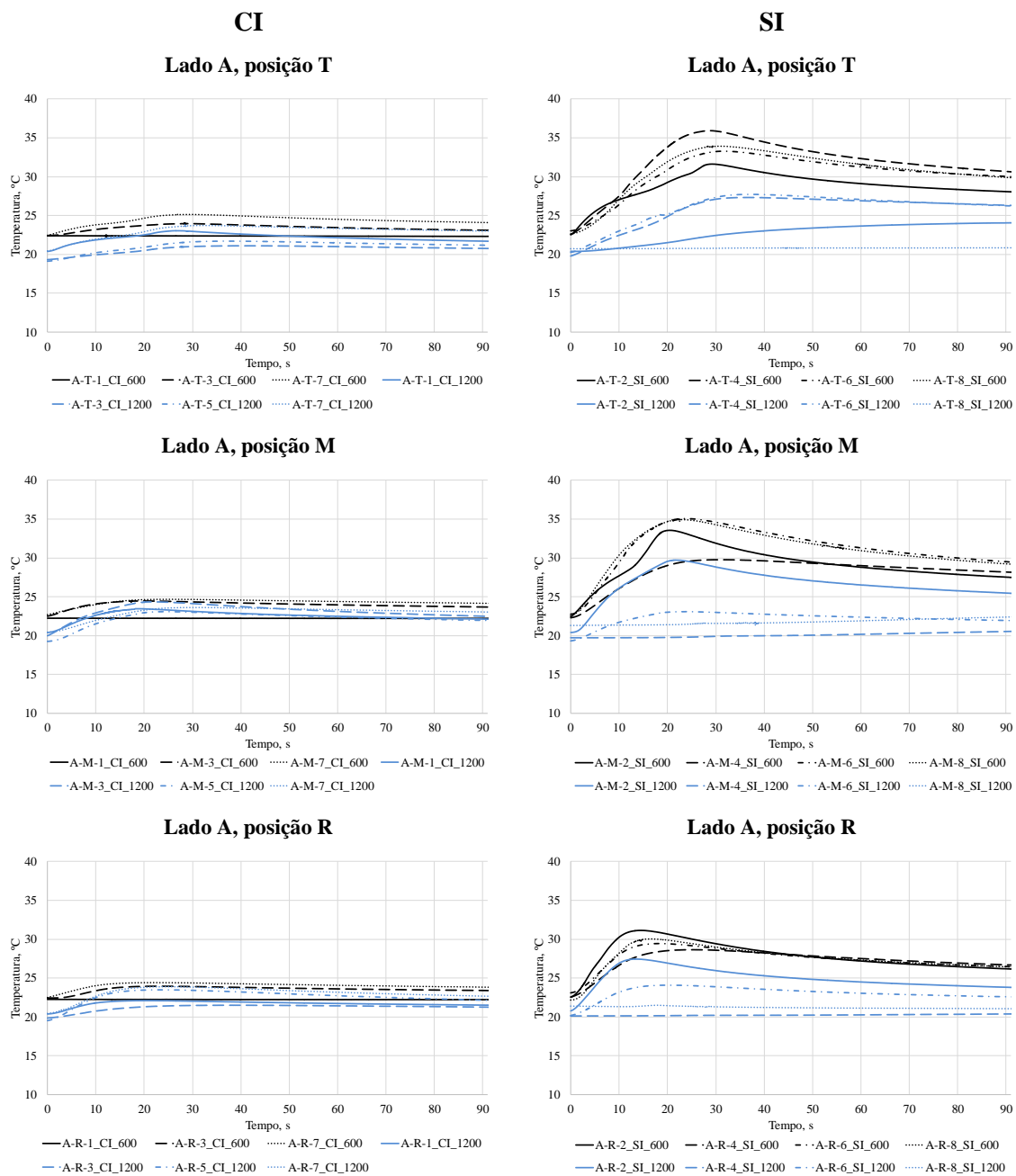


Figura 9. Evolução das temperaturas com 600 e 1200RPM no lado A

Na Figura 10 estão representados os gráficos referentes às posições T, M e R do lado B, para as duas velocidades de rotação.

No Anexo E encontram-se as tabelas dos valores de temperatura máxima, mínima, média e variação da mesma, nos furos CI e SI e nas diferentes posições, respeitantes às Figuras 9 e 10.

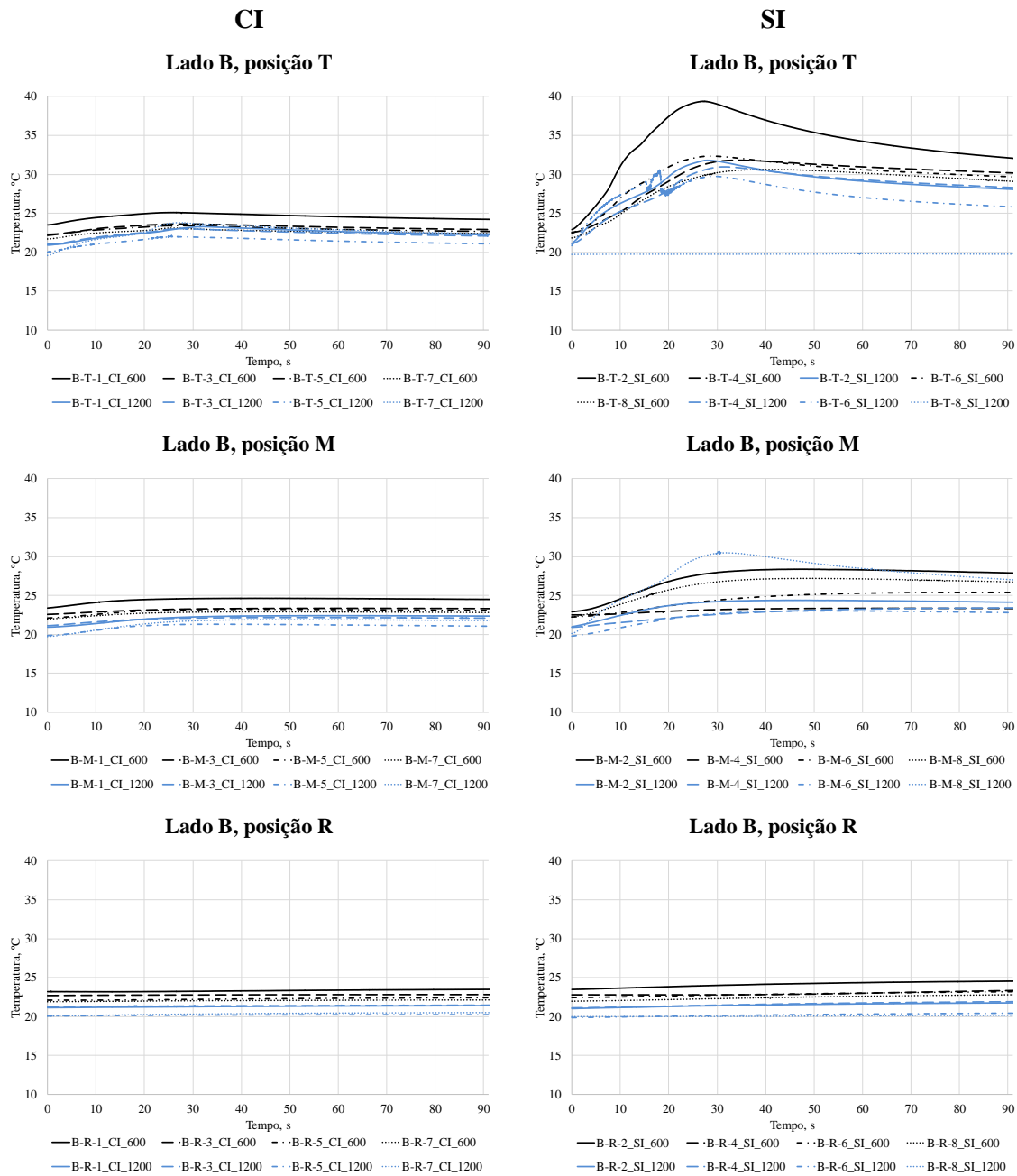


Figura 10. Evolução das temperaturas com 600 e 1200RPM no lado B

Os resultados obtidos entre os dois blocos, com duas velocidades de rotação distintas, permitiu observar que quando as furações foram efetuadas sem o auxílio da irrigação a tendência em todos os grupos (lado A posições T, M e R e lado B posições T, M e R) foi a diminuição da temperatura com o aumento da velocidade de rotação de 600RPM para 1200RPM. Esta diminuição foi significativa, observável nas Figuras 9 e 10, onde todos os furos realizados a 1200 RPM atingiram menores temperaturas do que os furos

a 600RPM. De referir que, apesar da temperatura inicial do Bloco 2 estar a 20°C e a temperatura inicial do bloco 1 a 22°C, a variação da temperatura continua a ser superior no bloco a 600RPM, como se observa nas tabelas correspondentes do Anexo E.

Nos furos com irrigação, a variação da temperatura nos dois blocos é muito idêntica, normalmente entre 2 a 4°C, conforme se verifica nas 2 figuras. No entanto, através das tabelas correspondentes, é possível perceber que a variação da temperatura é semelhante nos dois blocos sendo ligeiramente superior no BL2 (1200RPM).

3.1.2.2. Temperatura na Broca

Com o auxílio da câmara termográfica foi possível registar as temperaturas na broca imediatamente antes e após cada furação. Nas Figuras 11 e 12 estão disponíveis 2 exemplos de imagens retiradas à entrada e saída de cada furo.

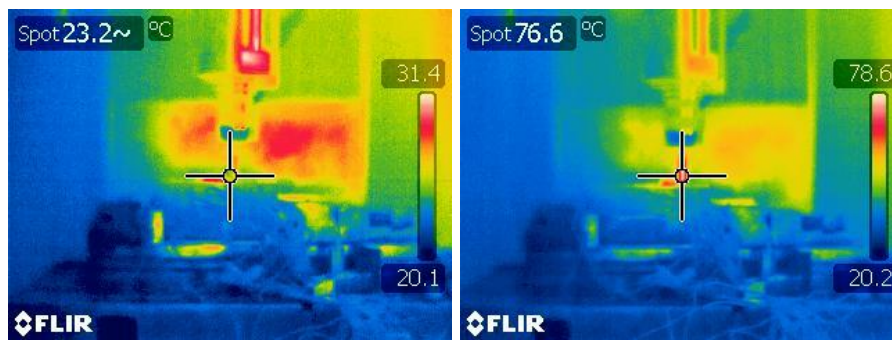


Figura 11. Imagens térmicas do BL1, lado A, F6

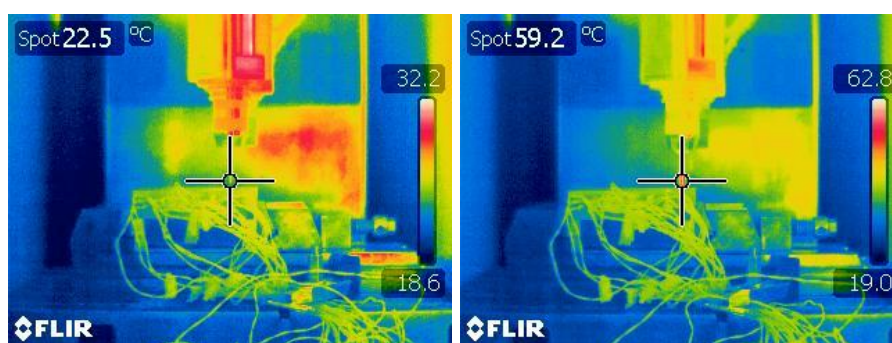


Figura 12. Imagens térmicas do BL2, lado A, F7

No Anexo F encontram-se as restantes imagens retiradas com a câmara termográfica. Na Tabela 2 apresentam-se todos os valores das temperaturas registadas na broca antes e após cada furação.

Tabela 2. Temperatura na broca, °C.

		Bloco 1 (600RPM)				Bloco 2 (1200RPM)			
		Lado A		Lado B		Lado A		Lado B	
		CI	SI	CI	SI	CI	SI	CI	SI
F1	Entrada	23,2		22,3		19,2		21,3	
	Saída	26,3		53,4		39,1		23,8	
F2	Entrada		23,6		24		19,7		22,8
	Saída		95,7		96,1		76,9		27
F3	Entrada	23,9		23,7		18,8		23,1	
	Saída	47,3		50,5		27,7		24,4	
F4	Entrada		23,8		24		18,9		23,4
	Saída		85,9		98,4		96,2		66,2
F5	Entrada			23,7		20,1		20,7	
	Saída			31,1		36,5		36,3	
F6	Entrada		23,2		23,5		21,9		19,4
	Saída		76,6		68,8		89,8		76,8
F7	Entrada	23,5		23,7		22,5		19,3	
	Saída	54,1		28,2		59,2		30,4	
F8	Entrada		23,7		23,6		22,9		20,1
	Saída								

Através da Tabela 2, com as temperaturas registadas na broca imediatamente antes e após as furações, verifica-se a diferença nas temperaturas dos furos com e sem irrigação. Nos furos realizados sem irrigação, a temperatura à saída da broca atingiu quase sempre valores entre os 75°C e os 100°C, sendo a temperatura máxima registada de 98,4°C no furo 4, lado B do BL1. Nos furos com irrigação, a temperatura à saída da broca foi mais reduzida, normalmente entre os valores 30°C e 60°C, sendo a maior temperatura registada de 59,2°C no BL2, lado A e furo 7.

Através destes resultados, não é fácil concluir qual a velocidade de rotação que provoca maior temperatura na broca. Serão necessários ensaios adicionais para esta verificação.

3.2 Furação em Osso Bovino

3.2.1 Materiais e Métodos

Para a realização deste modelo experimental foram utilizadas 8 amostras de ossos *ex-vivo* de fêmur de bovinos, e ainda dois blocos de material compósito da *Sawbones* para auxílio na posterior comparação dos resultados, conforme referido no capítulo anterior.

Na Figura 13 encontra-se uma imagem de amostra de osso e dos blocos antes da furação.

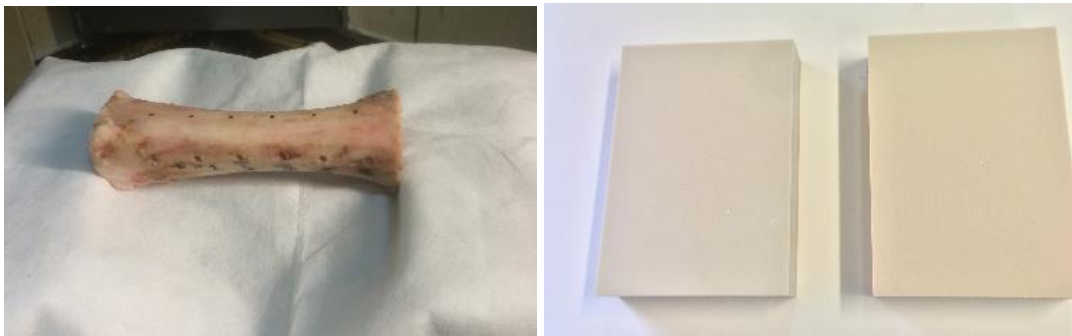


Figura 13. Osso bovino e blocos da *Sawbones* antes da furação

Previamente às furações, as amostras de osso *ex-vivo* foram devidamente preparadas e limpas, tendo sido removidos os tecidos moles através de técnicas apropriadas e congeladas até à data de furação [15].

As amostras foram denominadas de 1 até 8, e os blocos por bloco 1 (BL1) e bloco 2 (BL2). Nos blocos realizaram-se um total de 8 furos em cada bloco, enquanto nas amostras 6 ou 7 furos, de acordo com a dimensão de cada amostra. Para os blocos e amostras, considerou-se o espaçamento entre furos de 20mm. A profundidade da furação das amostras foi de 8 mm e nos blocos 30mm.

A velocidade de avanço utilizada foi igual para as amostras e blocos, sendo de 50mm/min. A velocidade de rotação foi 800RPM para as amostras 1, 2, 3 e 6 e bloco 2, e 900RPM para as amostras 4, 5, 7 e 8 e bloco 1. Todos os parâmetros de furação estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de furação

Parâmetros de furação	Bloco 2	Amostras 1, 2, 3 e 6	Bloco 1	Amostras 4, 5, 7 e 8
Tempo de furação	36s	10s	36s	10s
Velocidade de rotação	800RPM		900RPM	
Diâmetro da broca	4mm			
Velocidade de avanço	50mm/min			

A temperatura ambiente registada durante as furações foi semelhante para todas as amostras e blocos, aproximadamente 20°C. As temperaturas dos blocos eram próximas à temperatura ambiente, entre 19 e 21°C. Nas amostras, contrariamente, a temperatura era significativamente diferente, entre os 13 e os 16°C. Houve duas exceções, a amostra 8 encontrava-se próxima dos 12°C e a amostra 7 aproximava-se dos 8°C.

Durante os ensaios, o equipamento utilizado, exceto as amostras de osso bovino e blocos, foi o referido no capítulo anterior. Na Figura 14 estão presentes as imagens do equipamento utilizado.



Figura 14. Equipamento utilizado na furação do osso bovino e blocos

As imagens recolhidas pela câmara termográfica foram tratadas para posterior análise de resultados, utilizando o FLIR QuickReport.

3.2.2 Resultados Obtidos

Nestes ensaios, o registo da temperatura apenas foi efetuado na ferramenta de corte.

3.1.2.2. Temperatura na Broca

A Tabela 4 representa as temperaturas à entrada e saída de cada furação para as diferentes amostras e blocos. As temperaturas dos furos 1 das amostras 2, 3, 4 e 6 e do furo 5

da amostra 5 não foram consideradas para posterior análise, uma vez que, a captação de imagem não foi efetuada corretamente.

Tabela 4. Temperaturas na broca, para a furação do material ex-vivo e compósito

		Temperaturas							
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Amostra 4	Entrada	19,4	20,3	20,7	20,7	20,2	20,5		
	Saída	50,6	55,0	60,4	60,4	68,6	67,8		
Amostra 5	Entrada	19,3	20,5	20,7	20,5	20,8	20,5		
	Saída	62,0	65,2	65,6	68,9	80,2	60,5		
Amostra 7	Entrada	18,3	19,5	19,3	19,1	20,6	20,5	20,6	
	Saída	56,2	56,4	55,6	52,8	62,5	53,4	54,1	
Amostra 8	Entrada	19,6	19,9	19,9	20,1	21,0	21,1		
	Saída	56,9	62,0	56,0	54,3	53,1	53,1		
Bloco 1	Entrada	20,8	20,0	20,8	21,0	21,4	20,1	20,6	20,2
	Saída	97,7	74,0	92,5	87,6	91,0	91,9	92,8	90,2
Amostra 1	Entrada	18,0	20,2	20,1	21,3	21,0	20,2	20,3	
	Saída	54,1	60,4	64,1	61,5	66,0	59,8	56,3	
Amostra 2	Entrada	20,0	21,0	21,0	20,8	19,9	20,6	19,5	
	Saída	Não Existe	74,6	72,0	72,5	63,1	62,7	65,6	
Amostra 3	Entrada	20,1	20,7	20,2	19,0	20,8	18,8		
	Saída	46,2	53,1	56,0	53,7	53,3	47,2		
Amostra 6	Entrada	19,7	19,5	20,2	19,3	20,4	18,2		
	Saída	46,5	50,4	52,9	52,4	55,6	51,2		
Bloco 2	Entrada	21,6	20,7	20,8	20,9	20,9	20,4	20,3	19,2
	Saída	88,2	90,7	86,8	88,1	88,3	93,9	87,1	92,5

Os resultados foram analisados de acordo com a variação de temperatura, ΔT , entre a temperatura inicial e a temperatura final de cada furação. A temperatura inicial (representa a temperatura ambiente) apresenta-se relativamente próxima em todas as furações encontrando-se entre os 18 e 22°C. A temperatura final foi diferente de furação para furação, registrando-se alguma discrepância entre amostras e blocos.

Os resultados foram analisados, em todas as amostras sendo recolhidos os valores máximos, mínimos, médios e o desvio padrão das temperaturas à entrada, saída e da variação (ΔT). No Anexo G encontram-se disponíveis todas as tabelas relativas a estes resultados.

Posteriormente realizou-se uma análise, para a velocidade de rotação utilizada de 800 ou 900RPM. Na Tabela 5 estão presentes os valores da média e desvio padrão do ΔT total em todas as furações a 800RPM para as amostras 1, 2, 3 e 6 e bloco 2, função do número de amostras (n). Na Tabela 6 estão presentes as tabelas relativas à média e desvio padrão do ΔT total em todas as furações a 900RPM para as amostras 4, 5, 7 e 8 e bloco 1, em função de n.

Tabela 5. Variação de temperatura no material *ex-vivo* e compósito a 800RPM

800RPM	Total <i>ex-vivo</i> (n=23)	Total compósito (n=8)
Média, °C	39,02	68,85
Desvio Padrão, °C	7,06	3,05

Tabela 6. Variação de temperatura no material *ex-vivo* e compósito a 900RPM

900RPM	Total <i>ex-vivo</i> (n=23)	Total compósito (n=8)
Média, °C	39,02	69,10
Desvio Padrão, °C	5,24	6,76

Através das Tabelas 5 e 6 verifica-se que, a variação de temperaturas (ΔT) média é superior nos blocos em relação às amostras. Para a velocidade de 800RPM (bloco 2 e amostras 1, 2, 3 e 6) o ΔT médio foi 68,85°C com desvio padrão de 3,05°C para o material compósito e ΔT médio de 39,02°C com desvio padrão de 7,06°C para o material *ex-vivo*, uma diferença de aproximadamente 30°C entre material *ex-vivo* e compósito. Para as furações com velocidade de rotação de 900RPM (bloco 1 e amostras 4, 5, 7 e 8) a situação foi semelhante sendo o ΔT médio para o material compósito de 69,10°C com desvio padrão de 6,76°C e o ΔT médio do material *ex-vivo* de 39,02°C com desvio padrão de 5,24°C.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos foi elaborada a Tabela 7, em forma de resumo.

Tabela 7. Resultados obtidos

Velocidade rotação (RPM)	Material compósito				Estudo <i>ex-vivo</i>			
	n	Média °C	Desvio padrão °C	[Intervalo] °C	n	Média °C	Desvio padrão °C	[Intervalo] °C
800	8	68,85	3,05	[66-73,5]	23	39,02	7,06	[28,4-53,6]
900	8	69,10	6,76	[54-76,9]	23	39,02	5,24	[32-48,4]

A Tabela 7 representa as diferenças entre as duas velocidades de rotação (800 e 900RPM) para o material compósito e amostras de ossos bovinos.

Como referido anteriormente, foram utilizados um total de 8 furos nos blocos de material compósito e um total de 23 furos nas amostras de ossos bovinos.

Analisando os dados referentes ao estudo do material compósito verifica-se que o ΔT médio é idêntico nas duas velocidades registando-se um ΔT médio de 68,85°C para 800RPM e 69,1°C para 900RPM, diferença não significativa. A principal razão para esta proximidade deve-se ao valor das velocidades serem bastante próximas (800 vs 900RPM). O valor do desvio padrão foi, porém, muito diferente nas duas velocidades sendo de 6,76°C para as 900RPM e 3,05°C para as 800RPM. A razão para esta discrepância de valores deve-se ao intervalo dos valores, no bloco 1 (900RPM) a gama de valores foi de 54°C a 76,9°C, muito superior ao do bloco 2 (800RPM) em que a variação de temperatura mínima foi de 66°C e a máxima de 73,5°C.

No estudo *ex-vivo*, o ΔT médio foi idêntico para as duas velocidades de rotação, com valor de 39,02°C. O desvio padrão registado apresenta um valor superior para 800RPM sendo 7,06°C enquanto para 900RPM foi de 5,24°C. O maior desvio padrão para as 800RPM deve-se à maior gama da variação de temperatura nesta velocidade registando-se um ΔT mínimo de 28,4°C e máximo de 53,6°C, enquanto para 900RPM regista-se um ΔT mínimo de 32°C e um máximo de 48,4°C.

Analisando ambos os materiais, compósito e ossos de fémur bovino, a variação de temperatura média foi significativamente superior no material compósito. Para ambas as velocidades, o ΔT médio do material compósito foi aproximadamente mais 30°C em relação ao ΔT médio do material *ex-vivo*. Esta diferença está em parte relacionada com o facto de a temperatura do material compósito ser superior à temperatura do material

ex-vivo. Outro fator que influenciou esta diferença deve-se à profundidade dos furos. A profundidade dos furos nos blocos foi de 30mm, enquanto nas amostras foi de 8mm, sendo o tempo de furação superior nos blocos (36s) em relação às amostras (10s). Quanto maior o tempo de furação, maior será também o aquecimento da ferramenta de corte.

No entanto, observa-se que as temperaturas alcançadas pela ferramenta de corte em material *ex-vivo* não são demasiado elevadas para poder provocar qualquer efeito de necrose térmica no osso. Estas observações tornam-se importantes para incrementar o conhecimento nesta área e contribuir na escolha de parâmetros de furação para ajuda em intervenções clínicas.

Capítulo 4

Componente Numérica

4.1. Introdução

Com o objetivo de comparação dos valores experimentais foi realizada uma componente numérica através de um programa de elementos finitos, o *Ansys®*. A componente numérica permite a obtenção de resultados concordantes com os experimentais, com menor necessidade de recursos e um controlo preciso das variáveis envolvidas. Nesta área, têm sido apresentados alguns trabalhos cujo objetivo é o cálculo de distribuição de temperaturas em regime transiente, atendendo a diferentes variáveis em estudo [16], [17], [18].

No presente trabalho, efetuou-se uma análise térmica em regime transiente de um único furo para as duas velocidades de rotação, 600 e 1200RPM, e para a situação com e sem irrigação. Posteriormente foi efetuada uma análise com 8 furos em simultâneo, com e sem irrigação, para as duas velocidades. No total construíram-se 6 modelos numéricos.

A escolha do elemento, a criação de uma boa malha de elementos finitos e inclusão correta das propriedades térmicas do material são essenciais para obter uma boa convergência dos resultados [19]. Em ambos os modelos utilizou-se o elemento finito *SOLID 70* representado na Figura 15. É um elemento térmico 3D e tem a capacidade de condução de calor, possuindo a opção de formação de elementos tetraédricos [20], [21].

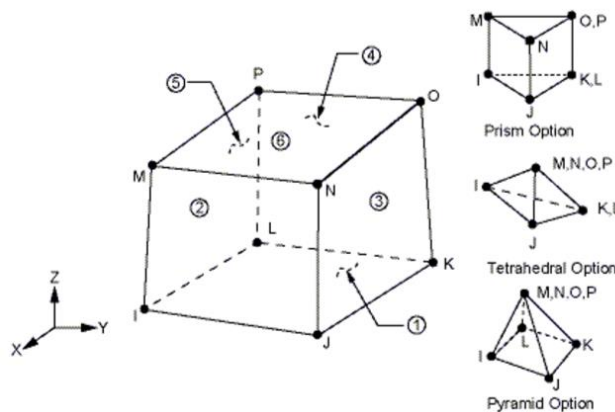


Figura 15. Elemento *SOLID70* do *Ansys®* [22]

4.2 Propriedades dos Materiais

As propriedades térmicas necessárias para a realização dos modelos são a massa específica, a condutividade e o calor específico do material compósito e do aço. Na Tabela 8 encontram-se os valores das propriedades para os materiais envolvidos [23], [24].

Tabela 8. Propriedades dos materiais

Propriedades térmicas	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)
Material Compósito	800,00	0,40	1260,00
Aço	7850,00	53,00	439,80

4.3 Parâmetros de Furação

As condições fronteira térmicas necessárias para a análise numérica são o fluxo de calor produzido pela broca durante a furação (q), o efeito da irrigação através da convecção em alguns furos (α) e a temperatura inicial do modelo (T_i).

Para o cálculo do fluxo de calor gerado pela broca recorreu-se à Eq. (1) [7]:

$$q = \frac{P_c}{V} (W/m^3) \quad (1)$$

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

O valor da potência total de corte é obtido pela soma da potência derivada da força de corte, P_f , com a potência derivada da torção de corte, P_m , como representado na Eq. (2):

$$P_c = P_f + P_m (W) \quad (2)$$

Para o cálculo das potências P_f e P_m recorreu-se à Eq. (3) e à Eq. (4):

$$P_f = V_a \times F_{fw} (W) \quad (3)$$

$$P_m = \frac{M_w \times n \times 2\pi}{60} (W) \quad (4)$$

onde V_a representa a velocidade de avanço (m/s), F_{fw} a força de corte axial (N), M_w o momento torsor (N.m) e n a velocidade de rotação (RPM).

O valor da velocidade de avanço, foi constante e igual a 50mm/min. Considerou-se uma velocidade de rotação igual a 600RPM ou 1200RPM, para cada um dos modelos.

Para o cálculo da força de corte axial foi necessário recorrer a trabalhos experimentais de outros autores. Assim, utilizaram-se os valores obtidos experimentalmente por M. T. Hillery *et al.* de $F_{fw}=45\text{N}$ para $n=600\text{RPM}$ e $F_{fw}=25\text{N}$ para $n=1200\text{RPM}$. O valor do momento torsor para $n=600\text{RPM}$, obtido recorrendo ao mesmo trabalho experimental, teve o valor $M_w=0.0132\text{N.m}$ [7]. Para $n=1200\text{RPM}$ o cálculo do momento torsor foi obtido através da lei da potência, admitindo-se que esta era igual para as duas velocidades, conforme a Eq. (4).

Na Tabela 9 apresentam-se os valores das variáveis necessárias no cálculo do fluxo do calor e das potências derivadas, para os dois blocos.

Tabela 9. Parâmetros utilizados na furação

	V_f (m/s)	n (RPM)	F_{fw} (N)	M_w (N.m)
BL1	$0,83 \times 10^{-3}$	600	45,00	$1,32 \times 10^{-2}$
BL2	$0,83 \times 10^{-3}$	1200	25,00	$0,66 \times 10^{-2}$

Na Tabela 10 encontra-se os valores da potência total de corte, volume da broca e fluxo de calor para os dois blocos.

Tabela 10. Fluxo do calor para os dois blocos

	P_c (W)	V (m ³)	q (W/m ³)
BL1	0,87	$3,77 \times 10^{-7}$	$2,30 \times 10^6$
BL2	0,85	$3,77 \times 10^{-7}$	$2,26 \times 10^6$

A irrigação utilizada na componente experimental é, no modelo numérico, representada pelo efeito da convecção (α) com o valor de $\alpha=25\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. A temperatura inicial no modelo experimental não foi constante, mas próxima nos 2 blocos, aproximando-se de $22,5^\circ\text{C}$ no BL1 e 20°C no BL2. Todas as condições fronteira necessárias para o desen-

volvimento da componente numérica, para os 4 modelos (600RPM com e sem irrigação e 1200RPM com e sem irrigação) encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11. Condições fronteira para os diferentes modelos

	α (W/m ² .°C)	Ti (°C)	q (W/m ³)
600RPM, SI	-	22,50	2,30x10 ⁶
600RPM, CI	25,00	22,50	2,30x10 ⁶
1200RPM, SI	-	20,00	2,26x10 ⁶
1200RPM, CI	25,00	20,00	2,26x10 ⁶

4.4 Análise Térmica

4.4.1 Modelo Numérico com Um Furo

A análise térmica foi realizada em regime transiente durante 36 segundos correspondente ao tempo de furação de cada furo, no modelo experimental. A malha de elementos finitos utilizada foi gerada de forma automática, com dimensão de elementos igual a 1mm. Na Figura 16 encontra-se o modelo de 1 furo com a malha utilizada.

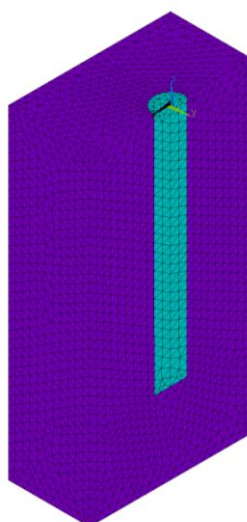


Figura 16. Malha utilizada para os 4 modelos de 1 furo

Na Figura 17 apresentam-se os resultados do campo de temperaturas no bloco para o tempo de 36s nos 4 modelos, com uma escala de temperaturas entre 20°C e 31,95°C, correspondente aos valores mínimo e máximo obtidos nos diferentes modelos.

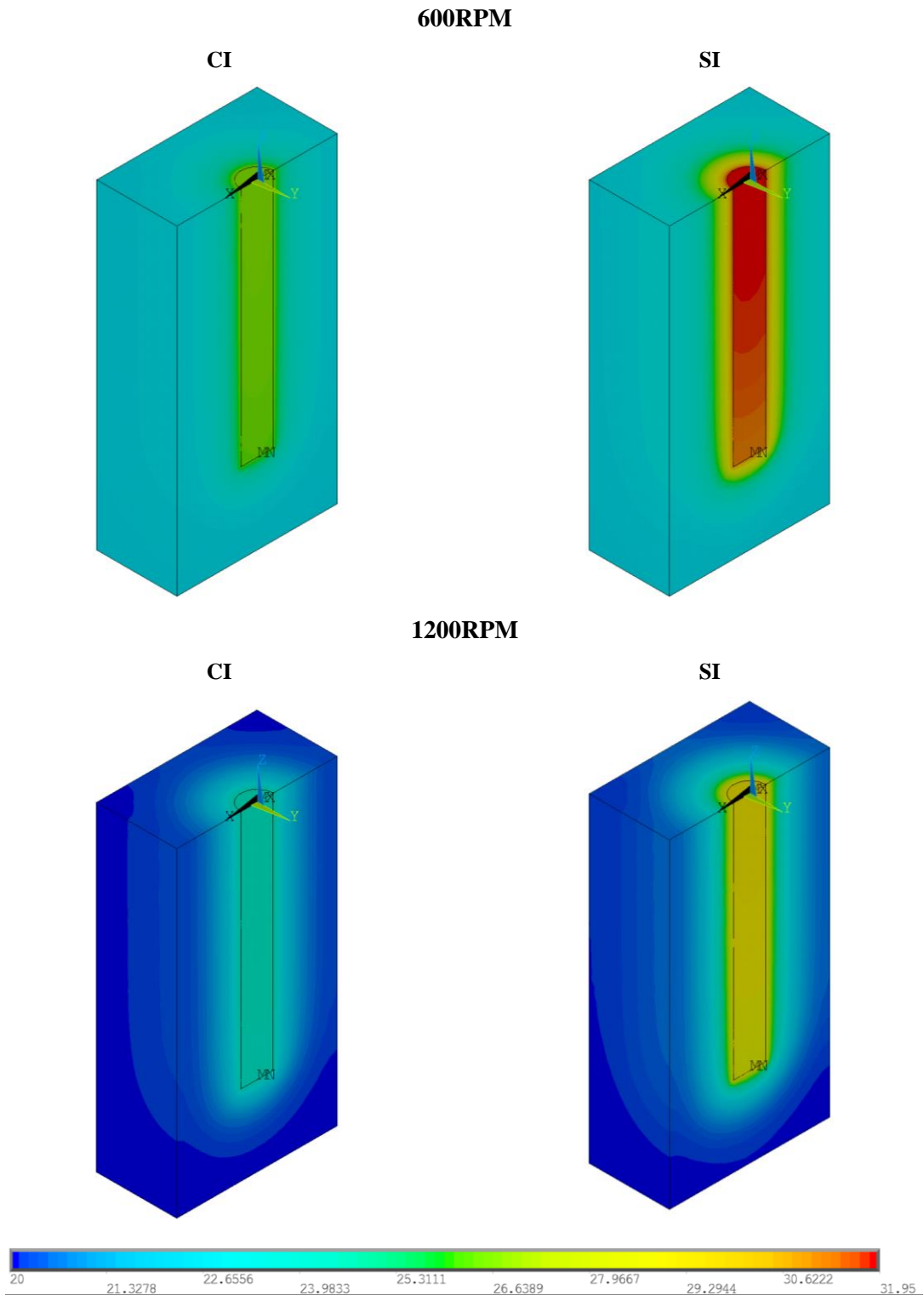


Figura 17. Temperaturas no final da furação com 600RPM e 1200RPM, CI/SI

Analisando a Figura 17, verifica-se que as temperaturas nos furos SI são superiores às temperaturas nos furos CI. As temperaturas mínimas no modelo com 600RPM têm valor igual a 22,5°C e no modelo com 1200RPM têm valor igual a 20°C correspondente à temperatura inicial em cada modelo. Verifica-se ainda que, os furos com velocidade de 600RPM (BL1) registam uma temperatura superior aos furos com velocidade de 1200RPM (BL2). A maior temperatura registada no local de furação ocorreu no modelo de 600RPM, sem irrigação, igual a 31,94°C e a menor temperatura registada no local de furação ocorreu no modelo de 1200RPM, com irrigação, sendo de 24,48°C.

Apesar das temperaturas serem maiores no modelo com 600RPM, a temperatura inicial nesse modelo também é superior. Na Tabela 12 estão presentes as temperaturas mínimas (T_i), máximas (T_m) e variação da temperatura (ΔT) para os 4 modelos.

Tabela 12: Variação da temperatura para os 4 modelos

	T_i (°C)	T_m (°C)	ΔT (°C)
600RPM, SI	22,50	31,94	9,44
600RPM, CI	22,50	26,69	4,19
1200RPM, SI	20,00	29,26	9,26
1200RPM, CI	20,00	24,48	4,48

Analisando a Tabela 12, verifica-se que a variação de temperatura é maior nos modelos SI comparativamente aos modelos CI. Relativamente às duas velocidades, nos furos SI a variação da temperatura é superior para 600RPM (BL1), no entanto, nos furos CI a variação da temperatura é superior para 1200RPM (BL2). A maior variação de temperatura registou-se no modelo de 600RPM, sem irrigação, 9,44°C, e a menor variação de temperatura registou-se, também no modelo de 600RPM, com irrigação, com valor igual a 4,19°C. De referir que, estes resultados, estão em concordância com os resultados experimentais, onde a temperatura era superior no BL1 nos furos SI, mas inferior no BL1 nos furos CI.

4.4.2 Modelo Numérico com Oito Furos

O modelo numérico com 8 furos teve como objetivo aproximar os resultados ao modelo experimental, para tentar perceber qual a influência que o calor gerado num determinado furo pode ter nos furos mais próximos. De forma alternada, foram simulados 4 furos CI e outros 4 SI, correspondendo ao modelo experimental. Construíram-se dois modelos, um para 600RPM e outro para 1200RPM.

A análise térmica foi realizada em regime transiente durante o tempo total de 728s correspondente ao total de furação e arrefecimento dos oitos furos, tal como no modelo experimental, com 36s de furação e 55s de arrefecimento para cada furo.

A malha de elementos finitos utilizada é, também, automática com elementos cuja dimensão é de 2mm. Na Figura 18 encontra-se o modelo com a malha utilizada.

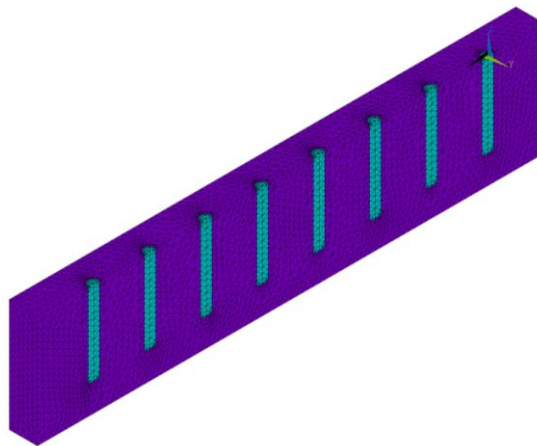


Figura 18. Malha utilizada para os 2 modelos de 8 furos

Na Figura 19 apresentam-se os resultados obtidos das temperaturas no final da furação de cada furo para 600RPM, onde foi utilizada uma escala uniforme entre 22,5 e 32,1°C correspondendo à temperatura mínima e máxima registada durante a simulação numérica. Na Figura 20 apresentam-se os resultados obtidos no final da furação de cada furo para 1200RPM. Foi utilizada uma escala uniforme entre 20 e 29,35°C correspondendo à temperatura mínima e máxima registada durante a simulação.

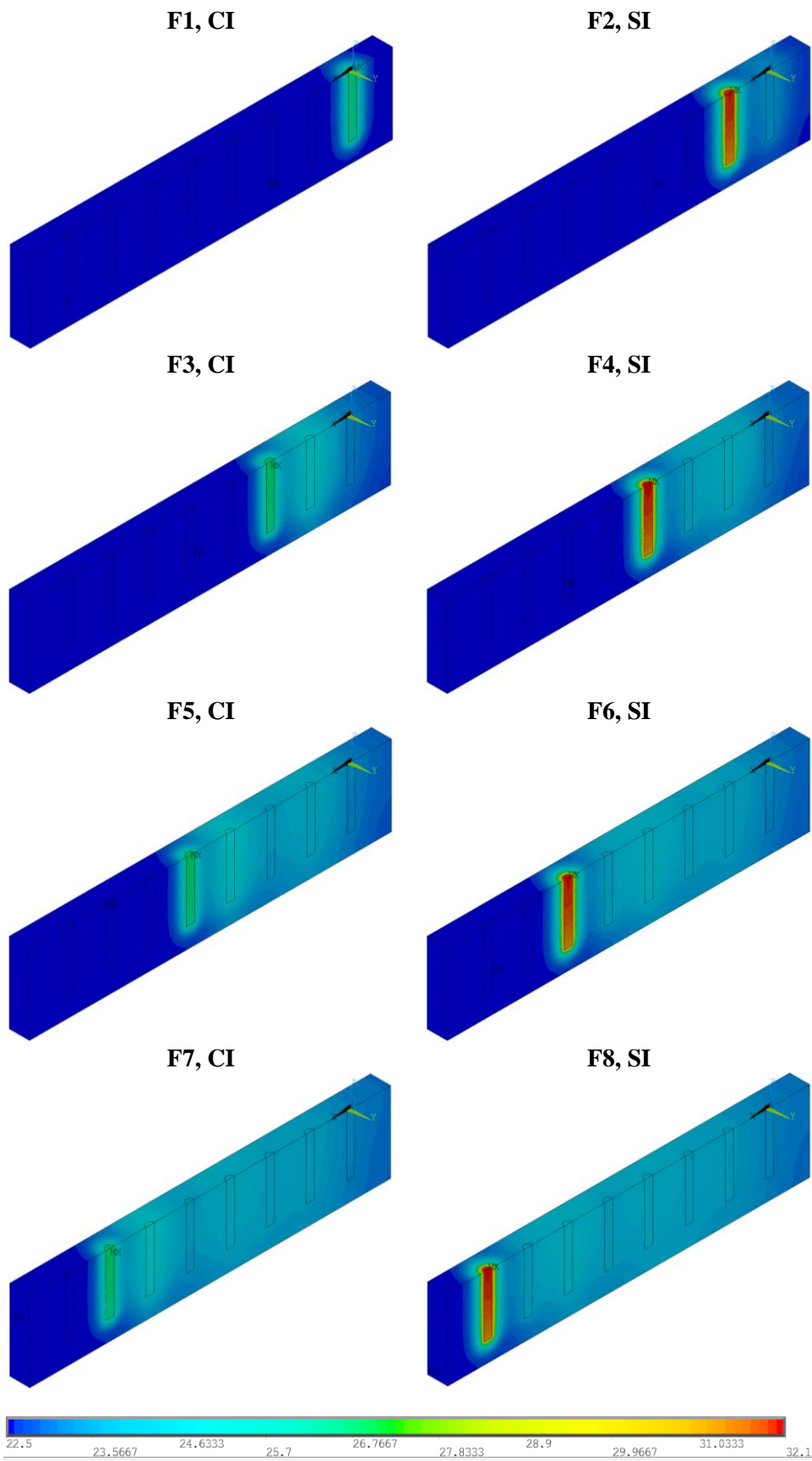


Figura 19. Temperaturas no final de cada furação, com 600RPM

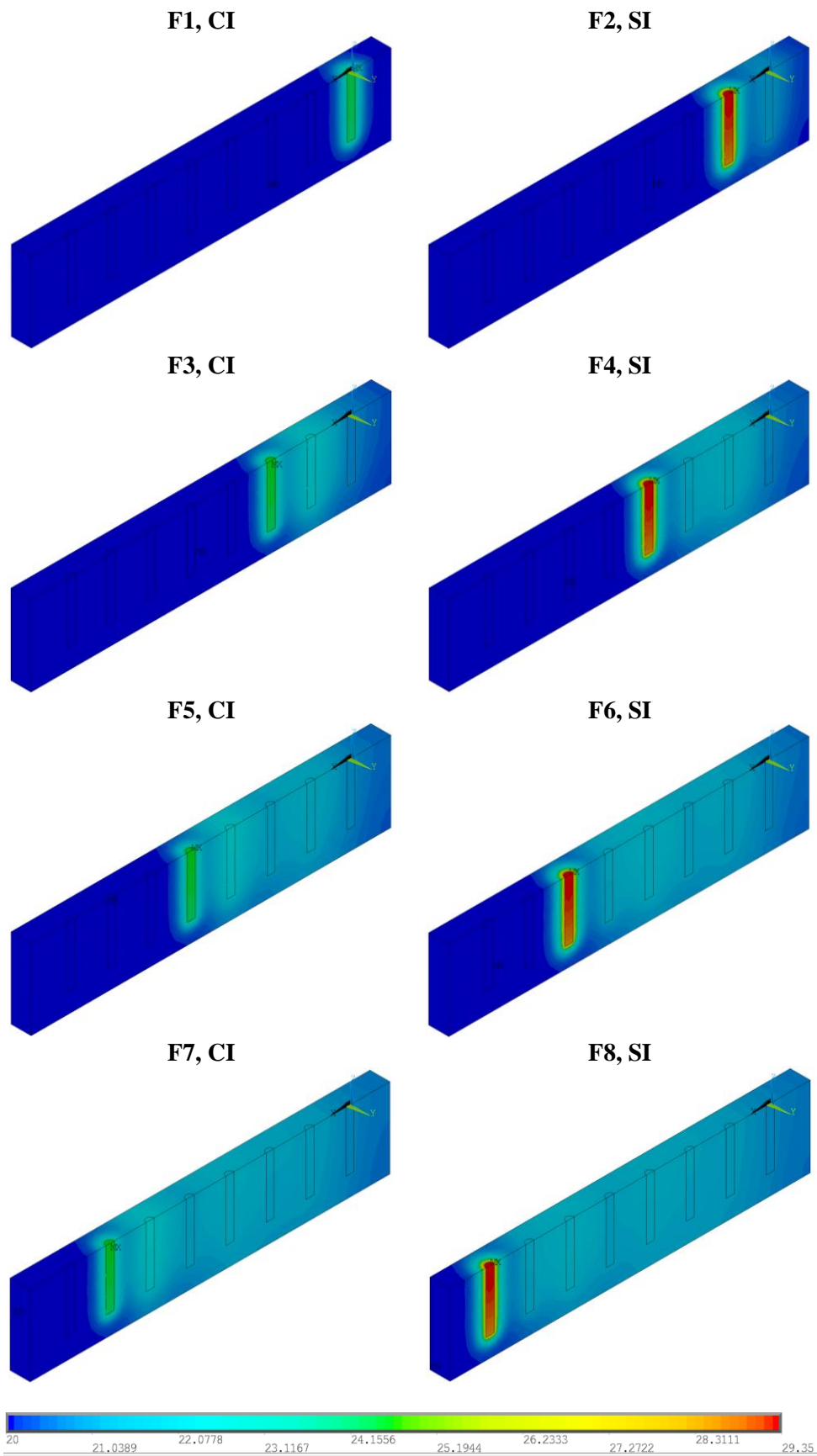


Figura 20. Temperaturas no final de cada furação, com 1200RPM

Através das Figuras 19 e 20 verifica-se que a furação de um determinado furo tem ligeira influência na temperatura dos furos anteriores, mas não nos furos seguintes. Com esta análise, conclui-se ainda, que as temperaturas dos furos CI foram muito inferiores às dos furos SI, e que as temperaturas entre os furos SI foram próximas entre si, ocorrendo o mesmo nos furos CI. As temperaturas apresentadas na Figura 19 (600RPM) foram superiores às temperaturas apresentadas na figura 20 (1200RPM).

4.4.3 Comparação do Modelo Numérico e Experimental

Para comparar os resultados obtidos nos 4 modelos numéricos com os resultados experimentais nas três posições (T, M e R) e para os dois lados (A e B) foram realizados diferentes gráficos comparativos. Na Figura 21 estão presentes os resultados para o lado A (termopares à mesma distância do local de furação) nos 4 modelos.

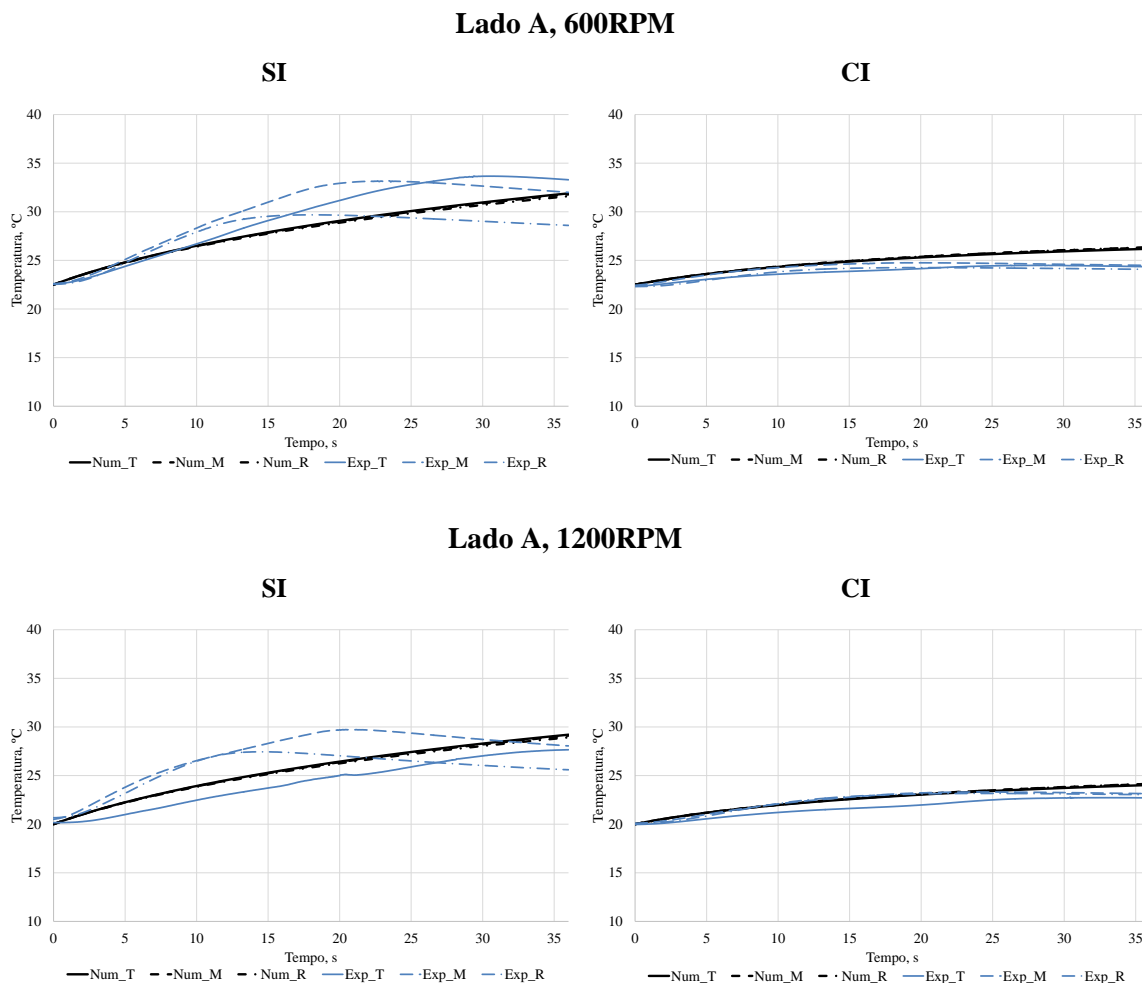


Figura 21. Evolução das temperaturas nos modelos experimental (exp) e numérico (num) no lado A

Analisando a Figura 21, que corresponde ao lado A do bloco, verifica-se que as temperaturas nos modelos numéricos (num) são próximas das temperaturas nos modelos experimentais (exp).

Nos modelos com furos SI, nas duas velocidades, o comportamento da temperatura ao longo do tempo de furação foi ligeiramente diferente entre as componentes experimental e numérica, no entanto, a temperatura no final da furação foi próxima. Nos modelos com furos CI o comportamento das temperaturas e o registo final foram idênticos entre as duas componentes, para ambas as velocidades

Na Figura 22 encontram-se os gráficos do lado B (termopares a distâncias diferentes do local de furação) nos 4 modelos.

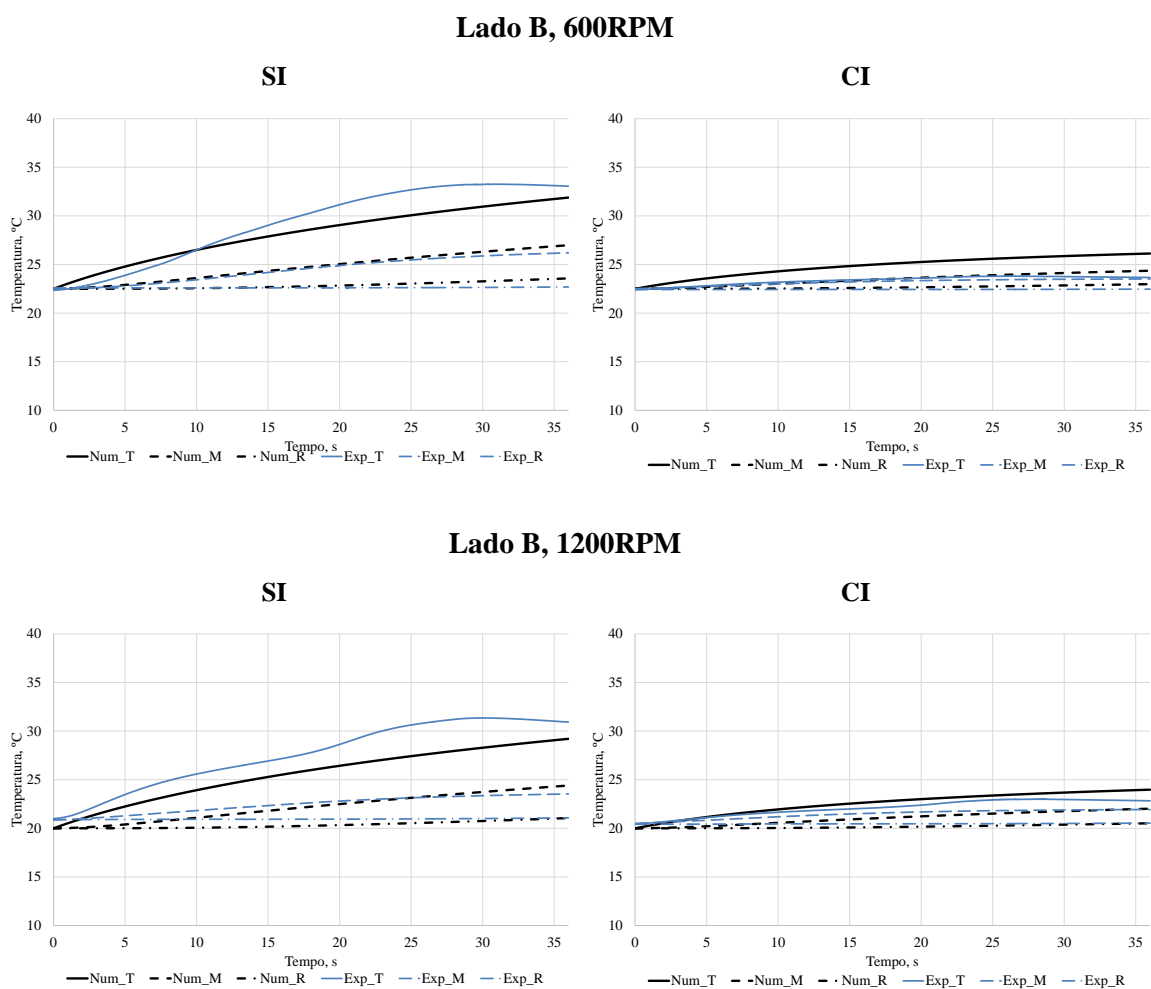


Figura 22. Evolução das temperaturas nos modelos experimental (exp) e numérico (num) no lado B

Analisando a Figura 22 (lado B), verifica-se que as temperaturas nos modelos numéricos são próximas das temperaturas nos modelos experimentais, sendo o comportamento e o registo final idênticos entre as duas componentes.

Na Tabela 13 encontra-se um resumo dos resultados obtidos nos diferentes modelos.

Tabela 13. Comparação das temperaturas obtidos nos diferentes modelos

Modelo	Temperatura	Situação
	SI>CI	Sempre
Material compósito	600RPM>1200RPM	Furos SI
	600RPM≤1200RPM	Furos CI
Modelo numérico	T≈M≈R	Lado A
	T>M>R	Lado B
Osso bovino	800RPM≈900RPM	M. compósito
	800RPM≈900RPM	M. ex-vivo
	M. compósito>M. ex-vivo	Sempre

Os resultados do modelo experimental com material compósito são idênticos aos resultados obtidos com o modelo numérico. Na comparação entre estes modelos apenas duas situações não foram iguais: no modelo experimental os furos com velocidade de 600RPM atingiram temperaturas significativamente maiores que os furos com 1200RPM, enquanto no modelo numérico as temperaturas são ligeiramente superiores. As temperaturas nos diferentes termopares T, M e R do lado A foram próximas no modelo experimental, e no modelo numérico foram idênticas.

No geral, conclui-se que os resultados numéricos são próximos dos obtidos experimentalmente, sendo a simulação computacional um método alternativo e que permite a obtenção de resultados com menores recursos e num menor período de tempo.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as temperaturas desenvolvidas em processos de furação do osso e material compósito, quando submetidos a diferentes parâmetros. A otimização destes parâmetros é de elevada importância para a clínica médica, de forma a reduzir a possibilidade de ocorrência de necrose térmica. Este trabalho fornece informação relevante para a diminuição da temperatura em processos de furação óssea.

Para o registo das temperaturas nos diferentes materiais foram utilizados termopares. Foi também utilizada uma câmara termográfica, para o registo da temperatura na broca. Os parâmetros de furação em análise foram a velocidade de rotação, o uso de irrigação e a distância dos termopares ao local de furação.

Através da componente experimental da furação em material compósito, com a utilização dos termopares, conclui-se que as temperaturas máximas registadas nos furos com irrigação foram menores, levando a uma diminuição até 10°C comparativamente com os furos sem irrigação. Relativamente às duas velocidades de rotação (600 e 1200RPM), as temperaturas para a velocidade de 600RPM foram superiores nos furos SI. Nos furos CI as temperaturas apresentaram valores superiores para a velocidade de 1200RPM, apesar de pouco significativas. Analisando a temperatura nos diferentes locais de furação, no lado A a temperatura foi próxima nas três profundidades do furo analisadas (7, 14 e 21mm), enquanto no lado B, com os termopares mais próximos do local de furação, as temperaturas foram superiores, e nos termopares mais afastados atingiram temperaturas menores.

Com a câmara termográfica registaram-se as temperaturas na broca, concluindo-se que a mesma é superior nos furos SI. A temperatura foi superior na broca em relação ao material atingindo valores até 98,4°C. Com a furação em material compósito não se verificou a temperatura necessária para a ocorrência de necrose térmica em nenhuma furação.

Analisando a componente experimental da furação em osso bovino, verificou-se que as temperaturas atingidas com as duas velocidades (800 e 900RPM) são bastante próximas. Verificou-se que a temperatura no material compósito foi superior à temperatura

no material *ex-vivo*, devido à temperatura inicial dos materiais e à profundidade dos furos.

A componente numérica teve como principal objetivo comparar os resultados obtidos experimentalmente. Com esta componente verificou-se, através do modelo de 1 furo, que as temperaturas ocorridas foram próximas das temperaturas da componente experimental. Os furos SI atingiram temperaturas superiores aos furos CI, a temperatura nos furos SI foi superior com a velocidade de 600RPM, e nos furos CI foi superior com a velocidade de 1200RPM. Através do modelo de 8 furos, e em adição, verificou-se que a furação de um determinado furo não influencia a temperatura do furo seguinte, afetando apenas os anteriores quando a temperatura se encontra a diminuir.

Concluindo, o uso de irrigação é o principal fator de diminuição da temperatura nos processos de furação. Maiores velocidades de rotação originam menores temperaturas quando não utilizada a irrigação. Porém, quando utilizada a irrigação, as temperaturas são próximas para diferentes velocidades, sendo ligeiramente inferiores em velocidades menores.

5.2 Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros propostos para a continuação do estudo deste tema poderão ser:

- Variar outros parâmetros de furação tais como a velocidade de avanço, a geometria da broca e a profundidade do furo, mantendo uma velocidade de rotação constante.
- Utilizar termopares em materiais *ex-vivo* para comparar a temperatura em modelos compósitos e *ex-vivo*.
- Realizar furações mantendo a temperatura no material próxima de 37°C, para simular a temperatura corporal humana, e verificar se as temperaturas se aproximam dos valores necessários para a ocorrência de necrose térmica.

- Na análise termográfica, de modo a reduzir a emissividade presente no local, sugere-se colocar um pano de flanela e cor preta, para que os resultados obtidos sejam os mais próximos da realidade.
- Numericamente, desenvolver um modelo dinâmico explícito de furação.

Referências Bibliográficas

- [1] Drake R. L., Vogl A. W., Mitchell A. W. M. (s. d.). Gray's Anatomy for Students. 2^a Edição. *Churchill Livingstone*. s. l..
- [2] Augustin G., Zigman T., Davila S., Udilljak T., Staroveski T., Brezak D., Babic S. (2012). Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis. *Clinical Biomechanics*. Vol. 27. pp. 313-325.
- [3] Davidson S. R. H. (1999). Heat transfer in bone during drilling. *A thesis for degree of Master of Applied Science Graduate Department of Mechanical and Industrial Engineering Institute of Biomaterials and Biomedical Engineering*. University of Toronto.
- [4] Fonseca E.M.M, Magalhães K., Fernandes M. G., Barbosa M.P., Sousa G. (2014). Numerical model of thermal necrosis due a dental drilling process *Biodental Engineering II*. pp. 69-73.
- [5] Díaz I., Gil J. J., Louredo M. (2013). Bone drilling methodology and tool based on position measurements. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. Vol. 112. pp. 284-292.
- [6] Vela dos Reis P. E. (2005). Furação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica. *Dissertação para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica*. Universidade de Aveiro.
- [7] Hillery M. T., Shuaib I. (1999). Temperature effects in the drilling of human and bovine bone. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 92-93. pp. 302-308.
- [8] Gonçalves D. J. (2010). Avaliação de Ferramentas e Condições de Corte na Furação de Laminados Compósitos. *Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [9] Bertollo N., Walsh W. R. (2011). Drilling of Bone: Practicality, Limitations and Complications Associated with Surgical Drill-Bits. *Biomechanics in Applications*. pp. 53-82.

- [10] 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. pp. 29-36.
- [11] Kalindindi V. (2004). Optimization of drill design and coolant systems during dental implant surgery. *Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science*. Lexington, Kentucky.
- [12] Salgueiredo E., Almeida F. A., Amaral M., Fernandes A. J., Costa F. M., Silva R. F., Oliveira F. J. (2009). CVD micro/nanocrystalline Diamond (MCD/NCD) bilayer coated odontological drill bits. *Diamond & Related Materials*. Vol. 18. pp. 264-270.
- [13] Sawbones[®] (2015). Biomechanical Test Materials. [ONLINE]. Available: http://www.sawbones.com/UserFiles/Docs/biomechanical_catalog.pdf. *Acedido em: Fevereiro de 2015*.
- [14] ASTM Committee E-20 on Temperature Measurement (1993). Manual on The Use of Thermocouples in Temperature Measurement. 4^a Edição. *ASTM Committee E-20 on Temperature Measurement* Philadelphia.
- [15] Souza P. D., Oliveira F. C., Araujo A. C. (2012). External Thread Milling on Bovine Cortical Bone. *VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Maranhão, Brasil.
- [16] Fernandes M. G. A., Vaz M., Natal Jorge R. M., Fonseca E. M. M. (2014). Avaliação Térmica da Furação no Osso Cortical com e sem Irrigação. *9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*. Aveiro.
- [17] Fernandes M. G. A., Natal R., Fonseca E. M. M. (2014). Modelo 3D para análise térmica durante o processo de furação do osso cortical. *9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*. Aveiro.
- [18] Silva J. C. P., Fonseca E. M. M., Fernandes M. G. A. (2015). Avaliação da temperatura em materiais compósitos sob processos de furação com e sem irrigação. *6º Congresso Nacional de Biomecânica*. Monte Real, Leiria.

- [19] Miller S. F., Shih A. J. (2007). Thermo-Mechanical Finite Element Modeling of the Friction Drilling Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 129. pp. 531-538.
- [20] Sampaio C. S. T. (2014). Avaliação térmica provocada pela furação no tecido ósseo. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Tecnologia Biomédica*. Instituto Politécnico de Bragança.
- [21] Monteiro D. C. A. (2013). Avaliação da necrose térmica numa mandíbula humana provocada pela furação. *Relatório da Unidade Curricular de Projeto em Engenharia Biomédica*. Instituto Politécnico de Bragança.
- [22] Ansys[®] (2015). SOLID70 Element Description. Ansys[®].
- [23] Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General Rules – Structural fire design, ENV 1993 – 1-2: 1995.
- [24] Sampaio C., Fonseca E., Pereira A, Queijo L. (2014). Avaliação térmica provocada pela furação óssea. *II Encontro de Jovens Investigadores*. Instituto Politécnico de Bragança.

Anexos

Anexo A

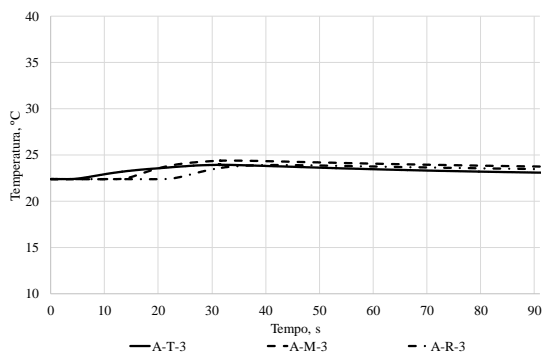
Desenho SolidWorks

Anexo B

Gráficos de cada furo nas diferentes posições T, M e R no BL1 lado A

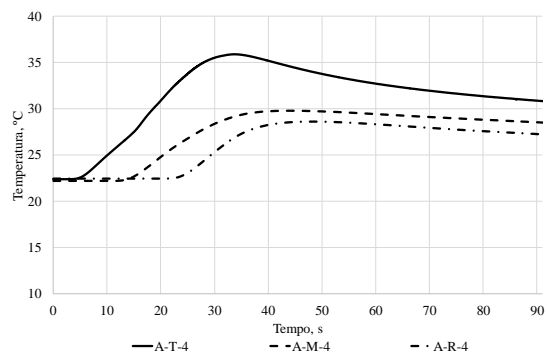
CI

F3

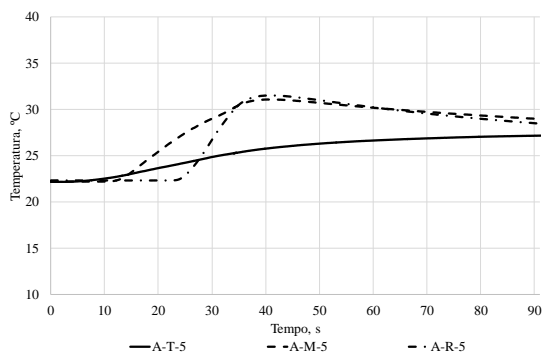


SI

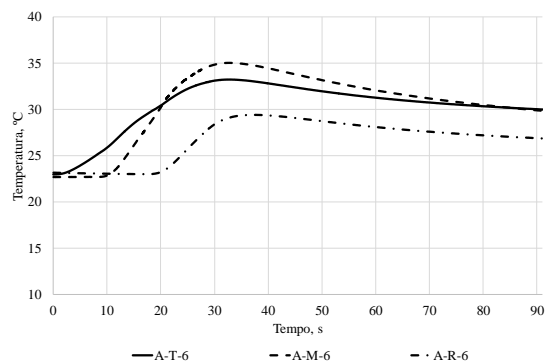
F4



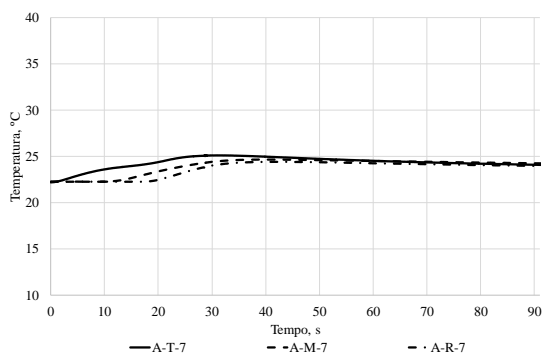
F5



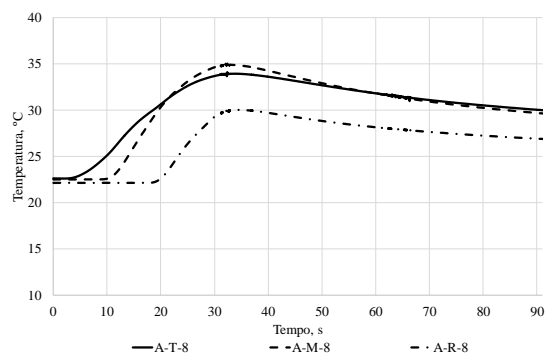
F6



F7

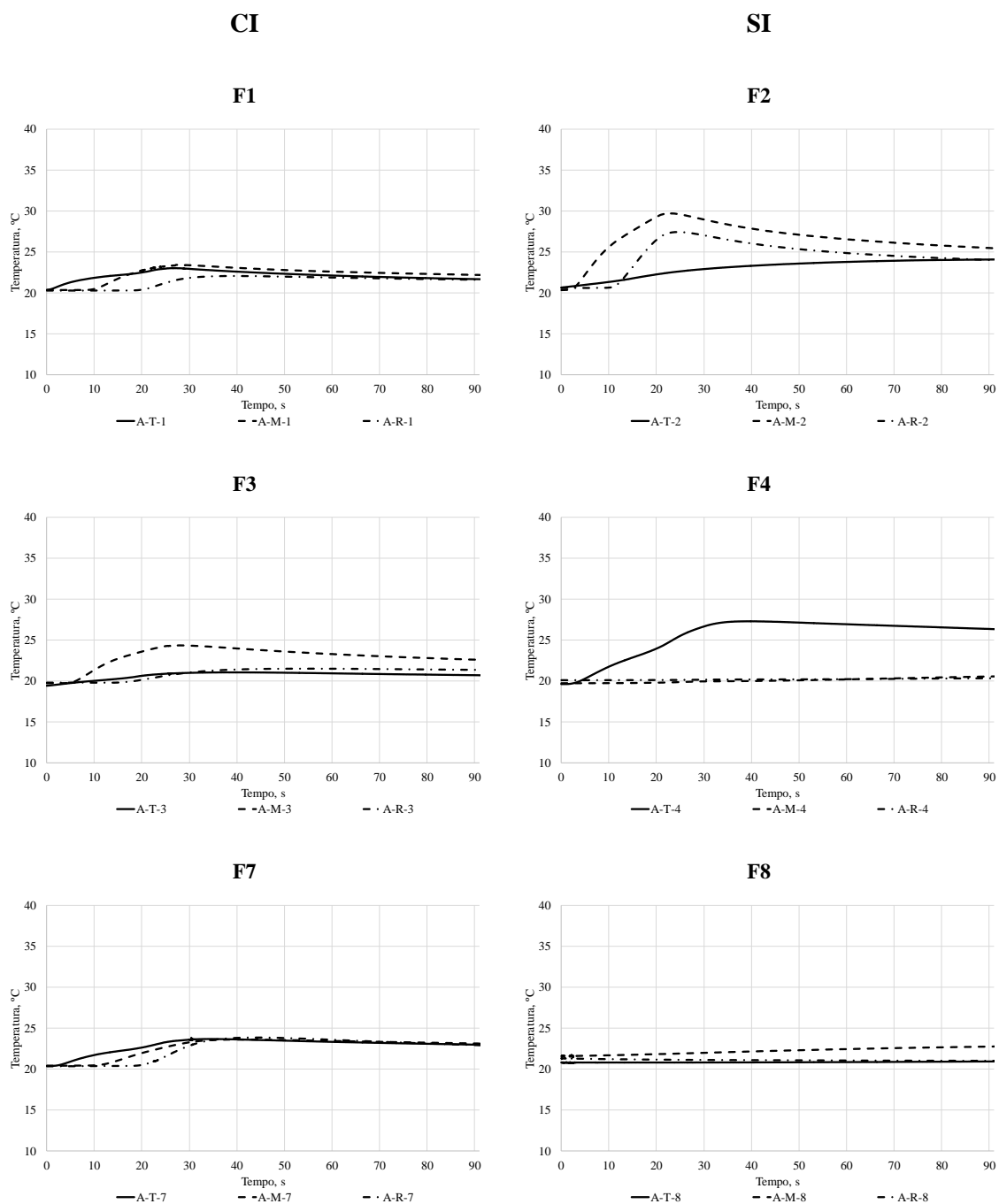


F8



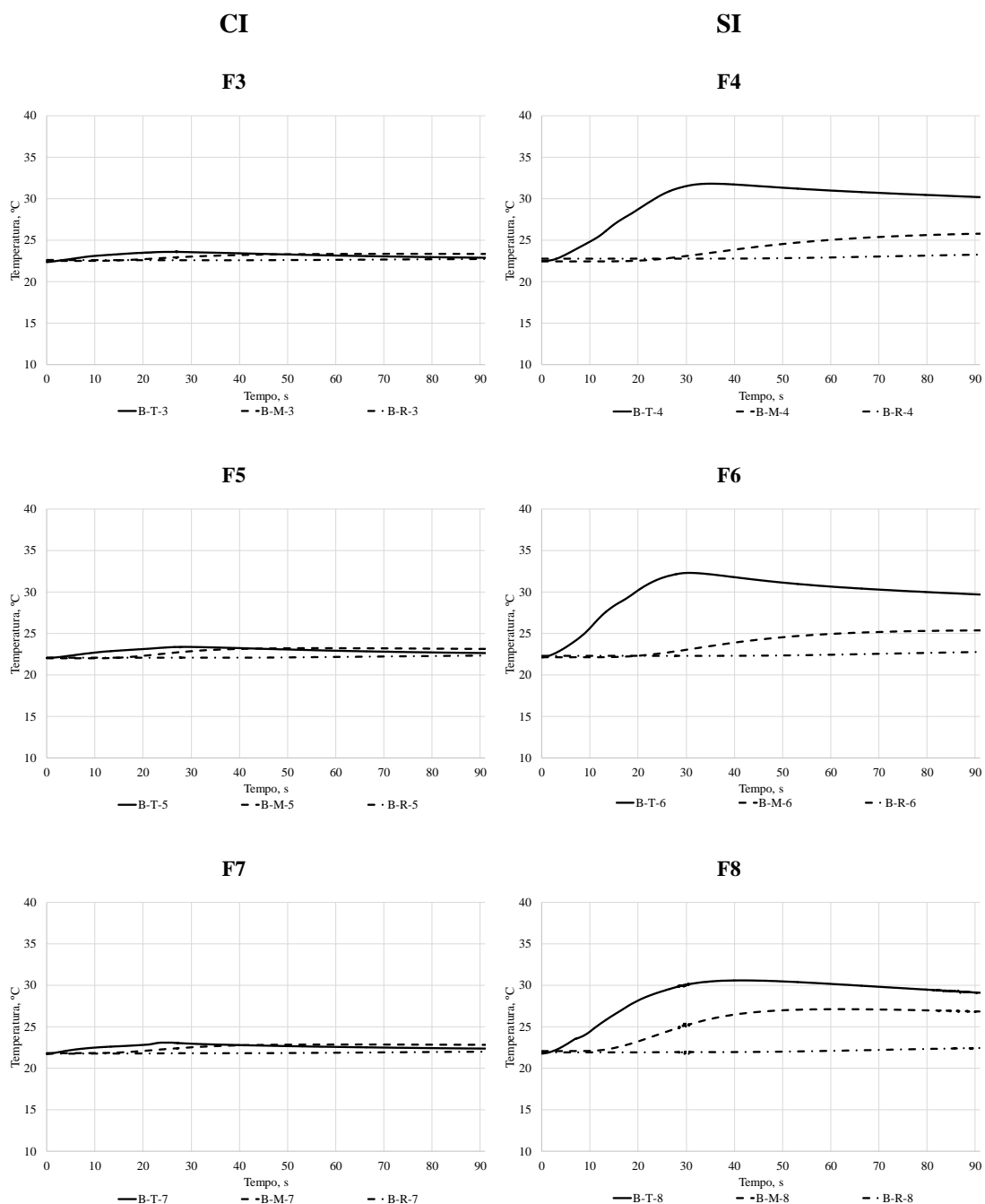
Anexo B

Gráficos de cada furo nas diferentes posições T, M e R no BL2 lado A



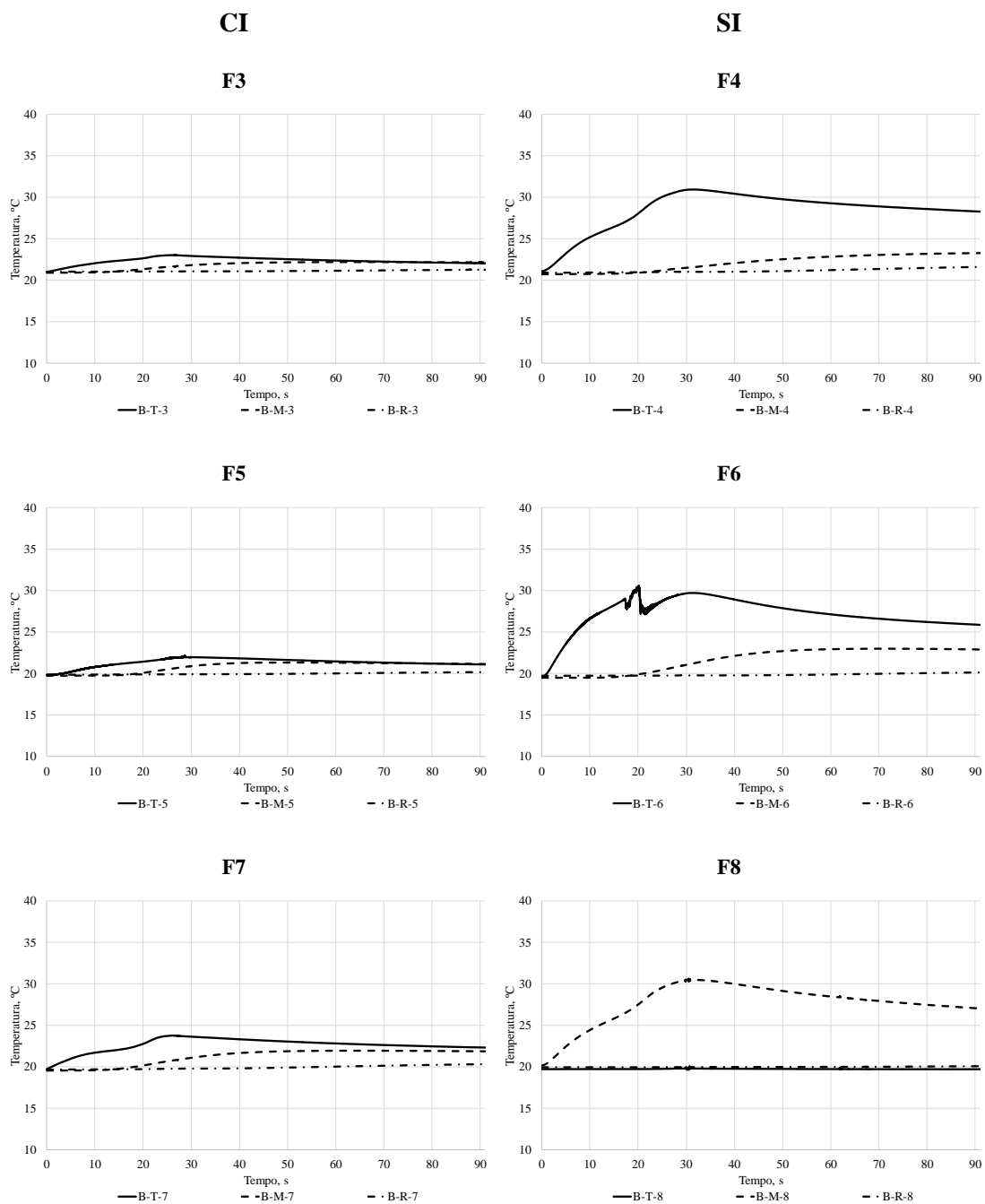
Anexo B

Gráficos de cada furo nas diferentes posições T, M e R no BL1 lado B



Anexo B

Gráficos de cada furo nas diferentes posições T, M e R no BL2 lado B



Anexo C

Tabelas de cada furo nas diferentes posições T, M e R no BL1 lado A

CI				SI			
F1				F2			
	A-T-1	A-M-1	A-R-1		A-T-2	A-M-2	A-R-2
Máx, °C	24,43	25,34	24,54	Máx, °C	31,62	33,56	31,14
Mín, °C	22,26	22,21	22,21	Mín, °C	22,33	22,17	22,38
Média, °C	22,86	23,13	22,93	Média, °C	26,28	25,86	25,05
Variação, °C	2,16	3,13	2,32	Variação, °C	9,29	11,39	8,76
F3				F4			
	A-T-3	A-M-3	A-R-3		A-T-4	A-M-4	A-R-4
Máx, °C	24,02	24,45	23,95	Máx, °C	35,91	29,79	28,65
Mín, °C	22,41	22,33	22,41	Mín, °C	22,40	22,23	22,47
Média, °C	22,85	23,13	23,01	Média, °C	27,75	25,99	25,17
Variação, °C	1,61	2,12	1,54	Variação, °C	13,52	7,55	6,19
F5				F6			
	A-T-5	A-M-5	A-R-5		A-T-6	A-M-6	A-R-6
Máx, °C	27,29	31,12	31,55	Máx, °C	33,25	35,07	29,45
Mín, °C	22,17	22,19	22,32	Mín, °C	22,98	22,67	23,00
Média, °C	25,07	25,86	25,40	Média, °C	27,99	27,53	25,57
Variação, °C	5,12	8,92	9,22	Variação, °C	10,27	12,40	6,45
F7				F8			
	A-T-7	A-M-7	A-R-7		A-T-8	A-M-8	A-R-8
Máx, °C	25,13	24,69	24,43	Máx, °C	34,11	35,05	30,05
Mín, °C	22,20	22,26	22,27	Mín, °C	22,62	22,46	22,18
Média, °C	23,42	23,47	23,26	Média, °C	27,55	27,24	25,18
Variação, °C	2,94	2,43	2,16	Variação, °C	11,48	12,59	7,87

Anexo C

Tabelas de cada furo nas diferentes posições T, M e R no BL2 lado A

CI				SI			
F1				F2			
	A-T-1	A-M-1	A-R-1		A-T-2	A-M-2	A-R-2
Máx, °C	23,04	23,47	22,10	Máx, °C	24,13	29,73	27,44
Mín, °C	20,36	20,35	20,31	Mín, °C	20,38	20,36	20,58
Média, °C	21,24	21,54	21,14	Média, °C	23,12	24,04	22,98
Variação, °C	2,69	3,11	1,79	Variação, °C	3,75	9,37	6,87
F3				F4			
	A-T-3	A-M-3	A-R-3		A-T-4	A-M-4	A-R-4
Máx, °C	21,08	24,36	21,51	Máx, °C	27,32	21,09	20,64
Mín, °C	19,29	19,71	19,82	Mín, °C	19,63	19,75	20,10
Média, °C	20,21	21,53	20,75	Média, °C	24,08	20,66	20,44
Variação, °C	1,79	4,65	1,69	Variação, °C	7,69	1,34	0,55
F5				F6			
	A-T-5	A-M-5	A-R-5		A-T-6	A-M-6	A-R-6
Máx, °C	21,70	23,10	23,50	Máx °C	27,71	21,88	24,06
Mín, °C	19,11	19,18	19,40	Mín °C	20,14	19,95	20,03
Média, °C	20,53	21,00	21,15	Média °C	24,39	21,43	21,92
Variação, °C	2,59	3,92	4,10	Variação °C	7,57	1,93	4,03
F7				F8			
	A-T-7	A-M-7	A-R-7		A-T-8	A-M-8	A-R-8
Máx, °C	23,85	23,62	23,91	Máx, °C	21,40	23,16	22,57
Mín, °C	20,35	20,36	20,31	Mín, °C	20,68	21,30	20,92
Média, °C	22,19	22,20	21,93	Média, °C	21,05	22,56	21,14
Variação, °C	3,50	3,26	3,60	Variação, °C	0,73	1,86	1,65

Anexo C

Tabelas de cada furo nas diferentes posições T, M e R no BL1 lado B

CI				SI			
F1				F2			
	B-T-1	B-M-1	B-R-1		B-T-2	B-M-2	B-R-2
Máx, °C	25,10	24,64	23,55	Máx, °C	39,41	28,38	24,69
Mín, °C	23,42	23,05	23,15	Mín, °C	22,81	22,82	23,27
Média, °C	23,88	23,95	23,37	Média, °C	29,34	26,29	24,25
Variação, °C	1,68	1,59	0,40	Variação, °C	16,60	5,56	1,42
F3				F4			
	B-T-3	B-M-3	B-R-3		B-T-4	B-M-4	B-R-4
Máx, °C	23,66	23,36	22,86	Máx, °C	31,84	25,95	23,94
Mín, °C	22,33	22,51	22,55	Mín, °C	22,53	22,43	22,62
Média, °C	22,71	23,00	22,75	Média, °C	27,37	24,66	23,40
Variação, °C	1,33	0,85	0,30	Variação, °C	9,32	3,52	1,32
F5				F6			
	B-T-5	B-M-5	B-R-5		B-T-6	B-M-6	B-R-6
Máx, °C	23,41	23,25	22,49	Máx, °C	32,34	25,44	23,39
Mín, °C	22,06	22,05	22,11	Mín, °C	22,11	22,14	22,29
Média, °C	22,56	22,66	22,32	Média, °C	27,49	24,49	23,03
Variação, °C	1,35	1,20	0,38	Variação, °C	10,22	3,30	1,10
F7				F8			
	B-T-7	B-M-7	B-R-7		B-T-8	B-M-8	B-R-8
Máx, °C	23,12	22,89	22,17	Máx, °C	30,62	27,18	23,04
Mín, °C	21,67	21,83	21,79	Mín, °C	21,74	22,08	21,57
Média, °C	22,20	22,46	22,04	Média, °C	26,59	25,31	22,66
Variação, °C	1,45	1,07	0,38	Variação, °C	8,88	5,10	1,47

Anexo C

Tabelas de cada furo nas diferentes posições T, M e R no BL2 lado B

CI

F1

	B-T-1	B-M-1	B-R-1
Máx, °C	23,29	22,41	21,44
Min, °C	21,02	20,85	20,94
Média, °C	21,87	21,86	21,28
Variação, °C	2,27	1,56	0,51

F3

	B-T-3	B-M-3	B-R-3
Máx, °C	23,09	22,19	21,50
Min, °C	20,86	20,93	21,04
Média, °C	21,74	21,76	21,35
Variação, °C	2,23	1,27	0,46

F5

	B-T-5	B-M-5	B-R-5
Máx, °C	22,17	21,33	20,28
Min, °C	19,84	19,75	19,84
Média, °C	20,65	20,58	20,13
Variação, °C	2,33	1,59	0,44

F7

	B-T-7	B-M-7	B-R-7
Máx, °C	23,79	21,93	20,53
Min, °C	19,50	19,54	19,66
Média, °C	21,48	21,08	20,25
Variação, °C	4,29	2,39	0,87

SI

F2

	B-T-2	B-M-2	B-R-2
Máx, °C	31,81	24,39	21,91
Min, °C	20,87	20,55	20,73
Média, °C	26,11	23,23	21,56
Variação, °C	10,94	3,84	1,18

F4

	B-T-4	B-M-4	B-R-4
Máx, °C	30,95	23,41	22,09
Min, °C	21,00	20,70	20,92
Média, °C	26,06	22,72	21,72
Variação, °C	9,95	2,71	1,18

F6

	B-T-6	B-M-6	B-R-6
Máx, °C	30,62	23,01	20,57
Min, °C	19,57	19,50	19,71
Média, °C	24,31	21,84	20,30
Variação, °C	11,05	3,51	0,86

F8

	B-T-8	B-M-8	B-R-8
Máx, °C	21,61	30,85	20,98
Min, °C	19,51	20,08	19,85
Média, °C	20,36	24,96	20,23
Variação, °C	2,10	10,78	1,13

Anexo D

Tabelas comparativas entre furos CI e furos SI, BL1

Lado A

	CI				SI			
	F1	F3	F5	F7	F2	F4	F6	F8
Posição T	Máx, °C	24,43	24,02	25,13	31,62	35,91	33,25	35,11
	Mín, °C	22,26	22,41	22,20	22,33	22,40	22,98	22,62
	Média, °C	22,86	22,85	23,42	26,28	27,75	27,99	27,55
	Variação, °C	3,13	1,61	2,94	9,29	13,52	10,27	11,48
Posição M	Máx, °C	25,34	24,45	24,69	33,56	29,79	35,07	35,05
	Mín, °C	22,21	22,33	22,26	22,17	22,23	22,67	22,46
	Média, °C	23,13	23,13	23,47	25,86	25,99	27,53	27,24
	Variação, °C	3,13	2,12	2,43	11,39	7,55	12,40	12,59
Posição R	Máx, °C	24,54	23,95	24,43	31,14	28,65	29,45	30,05
	Mín, °C	22,21	22,41	22,27	22,38	22,47	23,00	22,18
	Média, °C	22,93	23,01	23,26	25,05	25,17	25,57	25,18
	Variação, °C	2,32	1,54	2,16	8,76	6,19	6,45	7,87

Lado B

	CI				SI				
	F1	F3	F5	F7	F2	F4	F6	F8	
Posição T	Máx, °C	25,10	23,66	23,41	23,11	39,41	31,84	32,34	30,62
	Mín, °C	23,42	22,33	22,06	21,67	22,81	22,53	22,11	21,74
	Média, °C	23,88	22,71	22,56	22,20	29,34	27,37	27,49	26,59
	Variação, °C	1,68	1,33	1,35	1,45	16,60	9,32	10,22	8,88
Posição M	Máx, °C	24,64	23,36	23,25	22,89	28,38	25,95	25,44	27,18
	Mín, °C	23,05	22,51	22,05	21,83	22,82	22,43	22,14	22,08
	Média, °C	23,95	23,00	22,66	22,46	26,29	24,66	24,49	25,31
	Variação, °C	1,59	0,85	1,20	1,07	5,56	3,52	3,30	5,10
Posição R	Máx, °C	23,55	22,86	22,43	22,17	24,69	23,94	23,39	23,04
	Mín, °C	23,15	22,55	22,11	21,79	23,27	22,62	22,29	21,57
	Média, °C	23,37	22,75	22,20	22,04	24,25	23,40	23,03	22,66
	Variação, °C	0,40	0,30	0,33	0,38	1,42	1,32	1,10	1,47

Anexo D

Tabelas comparativas entre furos CI e furos SI, BL2

Lado A

	CI				SI				
	F1	F3	F5	F7	F2	F4	F6	F8	
Posição T	Máx, °C	23,04	21,08	21,70	23,85	24,13	27,32	27,71	21,39
	Mín, °C	20,36	19,29	19,11	20,35	20,38	19,63	20,14	20,68
	Média, °C	21,24	20,21	20,47	22,19	23,12	24,08	24,39	21,05
	Variação, °C	2,69	1,79	2,59	3,50	3,75	7,69	7,57	0,72
Posição M	Máx, °C	23,47	24,36	23,10	23,62	29,73	21,09	21,88	23,16
	Mín, °C	20,35	19,71	19,18	20,36	20,36	19,75	19,95	21,30
	Média, °C	21,54	21,53	21,05	22,20	24,04	20,66	21,43	22,56
	Variação, °C	3,11	4,65	3,92	3,26	9,37	1,34	1,93	1,86
Posição R	Máx, °C	22,10	21,51	23,50	23,91	27,44	20,64	24,06	22,57
	Mín, °C	20,31	19,82	19,40	20,31	20,58	20,10	20,03	20,92
	Média, °C	21,14	20,75	21,24	21,93	22,98	20,44	21,92	21,14
	Variação, °C	1,79	1,69	4,10	3,60	6,86	0,55	4,03	1,65

Lado B

	CI				SI				
	F1	F3	F5	F7	F2	F4	F6	F8	
Posição T	Máx, °C	23,29	23,09	22,17	23,79	31,81	30,95	30,62	21,61
	Mín, °C	21,02	20,86	19,84	19,50	20,87	21,00	19,57	19,51
	Média, °C	21,87	21,74	20,93	21,48	26,11	26,06	24,31	20,36
	Variação, °C	2,27	2,23	2,33	4,29	10,94	9,95	11,05	2,10
Posição M	Máx, °C	22,41	22,19	21,33	21,93	24,39	23,41	23,01	30,85
	Mín, °C	20,85	20,93	19,75	19,54	20,55	20,70	19,50	20,08
	Média, °C	21,86	21,76	20,72	21,08	23,23	22,72	21,84	24,96
	Variação, °C	1,56	1,27	1,59	2,39	3,84	2,71	3,51	10,77
Posição R	Máx, °C	21,44	21,50	20,28	20,53	21,91	22,09	20,57	20,98
	Mín, °C	20,94	21,04	19,84	19,66	20,73	20,92	19,71	19,85
	Média, °C	21,28	21,35	20,07	20,25	21,56	21,72	20,30	20,23
	Variação, °C	0,51	0,46	0,44	0,87	1,18	1,18	0,86	1,13

Anexo E

Tabelas comparativas entre furos com 600RPM e furos com 1200RPM, lado A

Com irrigação

		600RPM (BL1)				1200RPM (BL2)			
		F1	F3	F5	F7	F1	F3	F5	F7
Posição T	Máx, °C	24,43	24,02		25,13	23,04	21,08	21,70	23,85
	Mín, °C	22,26	22,41		22,20	20,36	19,29	19,11	20,35
	Média, °C	22,86	22,85		23,42	21,24	20,21	20,53	22,19
	Variação, °C	2,16	1,61		2,94	2,69	1,79	2,59	3,50
Posição M	Máx, °C	25,34	24,45		24,69	23,47	24,36	23,10	23,62
	Mín, °C	22,21	22,33		22,26	20,35	19,71	19,18	20,36
	Média, °C	23,13	23,13		23,47	21,54	21,53	21,00	22,20
	Variação, °C	3,13	2,12		2,43	3,11	4,65	3,92	3,26
Posição R	Máx, °C	24,54	23,95		24,43	22,10	21,51	23,50	23,91
	Mín, °C	22,21	22,41		22,27	20,31	19,82	19,40	20,31
	Média, °C	22,93	23,01		23,26	21,14	20,75	21,93	21,93
	Variação, °C	2,32	1,54		2,16	1,79	1,69	4,10	3,60

Sem irrigação

		600RPM (BL1)				1200RPM (BL2)			
		F2	F4	F6	F8	F2	F4	F6	F8
Posição T	Máx, °C	31,62	35,91	33,25	34,11	24,13	27,32	27,71	21,39
	Mín, °C	22,33	22,40	22,98	22,62	20,38	19,63	20,14	20,68
	Média, °C	26,28	27,75	27,99	27,55	23,12	24,08	24,39	21,05
	Variação, °C	9,29	13,52	10,27	11,48	3,75	7,69	7,57	0,72
Posição M	Máx, °C	33,56	29,79	35,07	35,05	29,73	21,09	21,88	23,16
	Mín, °C	22,17	22,23	22,67	22,46	20,36	19,75	19,95	21,30
	Média, °C	25,86	25,99	25,99	27,24	24,04	20,66	21,43	22,56
	Variação, °C	11,39	7,55	7,55	12,59	9,37	1,34	1,93	1,86
Posição R	Máx, °C	31,14	28,65	29,45	30,05	27,44	20,64	24,06	22,57
	Mín, °C	22,38	22,47	23,00	22,18	20,58	20,10	20,03	20,92
	Média, °C	25,05	25,17	25,57	25,18	22,98	20,44	21,92	21,14
	Variação, °C	8,76	6,19	6,45	7,87	6,86	0,55	4,03	1,65

Anexo E

Tabelas comparativas entre furos com 600RPM e furos com 1200RPM, lado B

Com irrigação

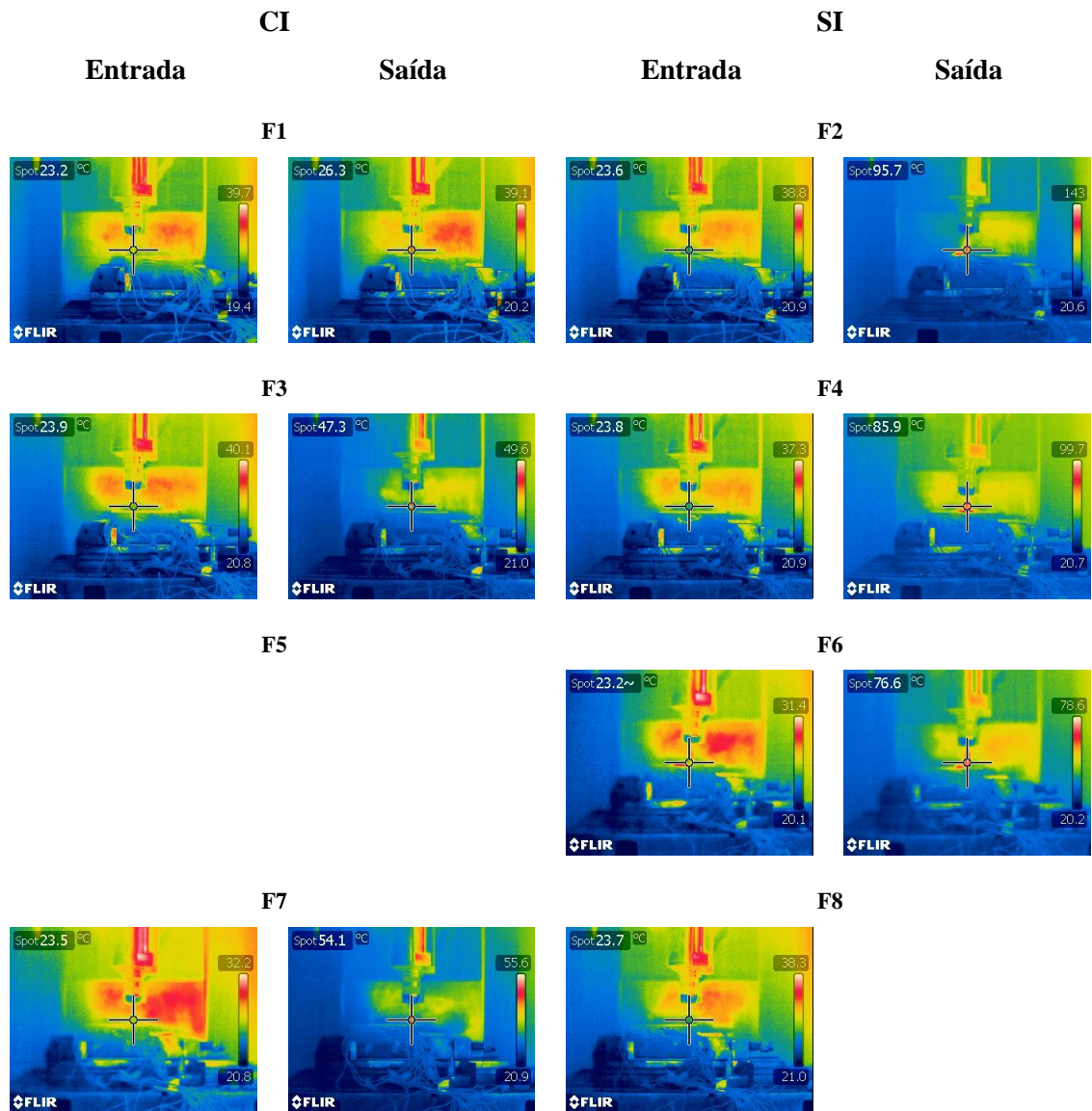
		600RPM (BL1)				1200RPM (BL2)			
		F1	F3	F5	F7	F1	F3	F5	F7
Posição T	Máx, °C	25,10	23,66	23,41	23,12	23,29	23,09	22,17	23,79
	Mín, °C	23,42	22,33	22,06	21,67	21,02	20,86	19,84	19,50
	Média, °C	23,88	22,71	22,56	22,20	21,87	21,74	20,65	21,48
	Variação, °C	1,68	1,33	1,35	1,45	2,27	2,23	2,33	4,29
Posição M	Máx, °C	24,64	23,36	23,25	22,89	22,41	22,19	21,33	21,93
	Mín, °C	23,05	22,51	22,05	21,83	20,85	20,93	19,75	19,54
	Média, °C	23,95	23,00	22,66	22,46	21,86	21,76	20,58	21,08
	Variação, °C	1,59	0,85	1,20	1,07	1,56	1,27	1,59	2,39
Posição R	Máx, °C	23,55	22,86	22,43	22,17	21,44	21,50	20,28	20,53
	Mín, °C	23,15	22,55	22,11	21,79	20,94	21,04	19,84	19,66
	Média, °C	23,37	22,75	22,20	22,04	21,28	21,35	20,13	20,25
	Variação, °C	0,40	0,30	0,33	0,38	0,51	0,46	0,44	0,87

Sem irrigação

		600RPM (BL1)				1200RPM (BL2)			
		F2	F4	F6	F8	F2	F4	F6	F8
Posição T	Máx, °C	39,41	31,84	32,34	30,62	31,81	30,95	30,62	21,61
	Mín, °C	22,81	22,53	22,11	21,74	20,87	21,00	19,57	19,51
	Média, °C	29,34	27,37	27,49	26,59	26,11	26,06	24,31	20,36
	Variação °C	16,60	9,32	10,22	8,88	10,94	9,95	11,05	2,10
Posição M	Máx, °C	28,38	25,95	25,44	27,18	24,39	23,41	23,01	30,85
	Mín, °C	22,82	22,43	22,14	22,08	20,55	20,70	19,50	20,08
	Média, °C	26,29	24,66	24,49	25,31	23,23	22,72	21,84	24,96
	Variação °C	5,56	3,52	3,30	5,10	3,84	2,71	3,51	10,77
Posição R	Máx, °C	24,69	23,94	23,39	23,04	21,91	22,09	20,57	20,98
	Mín, °C	23,27	22,62	22,29	21,57	20,73	20,92	19,71	19,85
	Média, °C	24,25	23,40	23,03	22,66	21,56	21,72	20,30	20,23
	Variação, °C	1,42	1,32	1,10	1,47	1,18	1,18	0,86	1,13

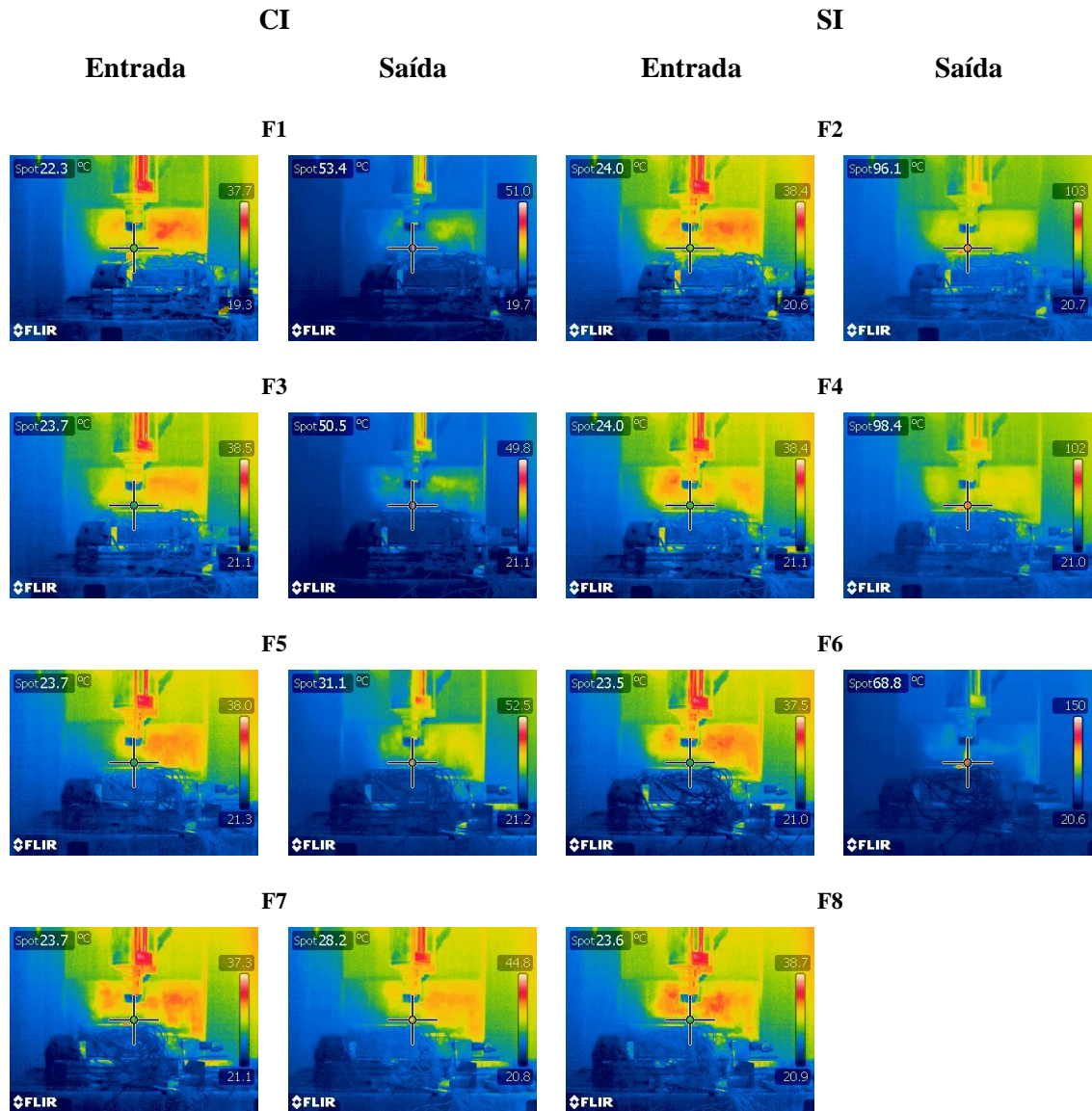
Anexo F

Imagens termográficas antes e após cada furação (BL1, lado A)



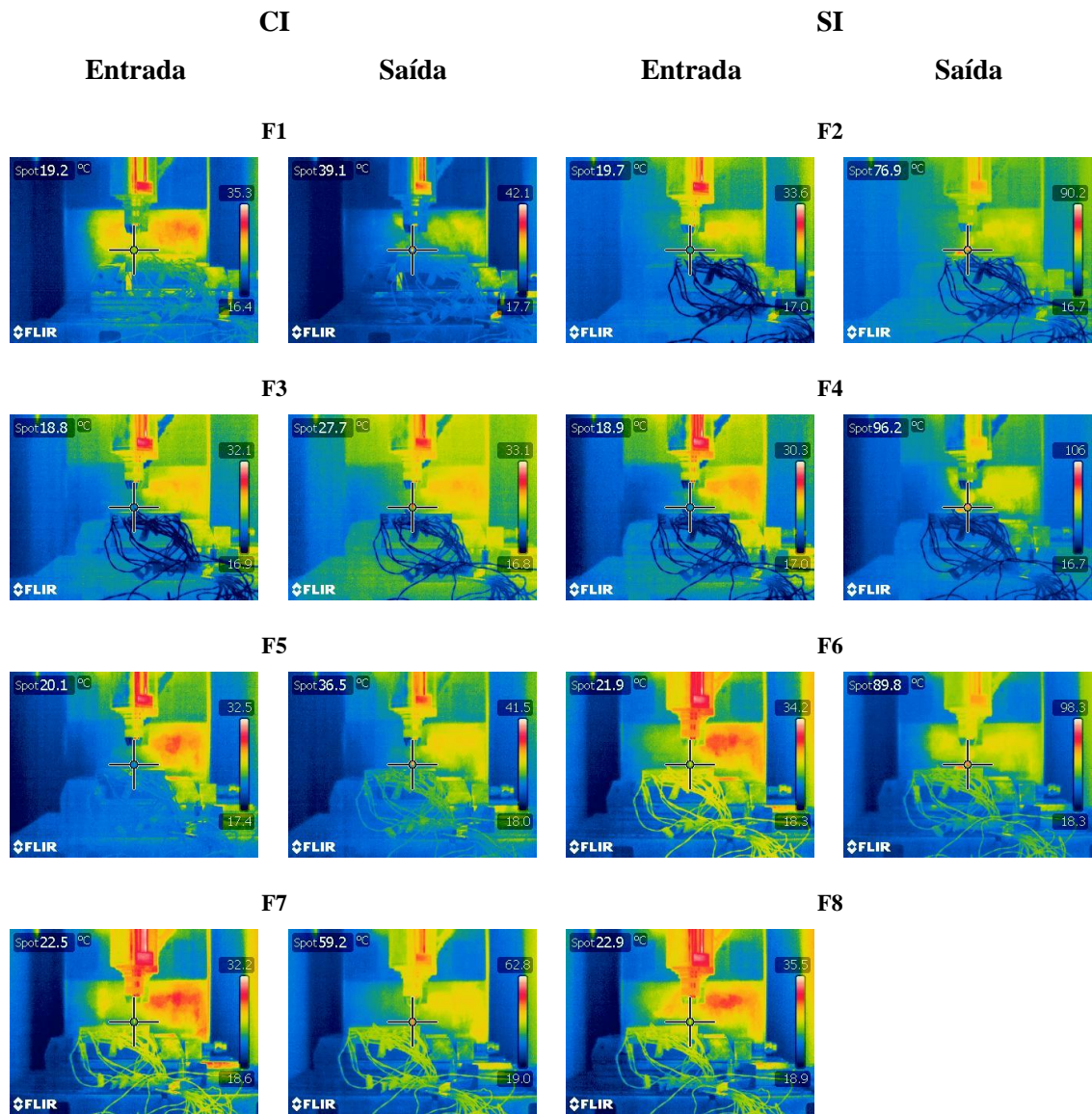
Anexo F

Imagens termográficas antes e após cada furação (BL1, lado B)



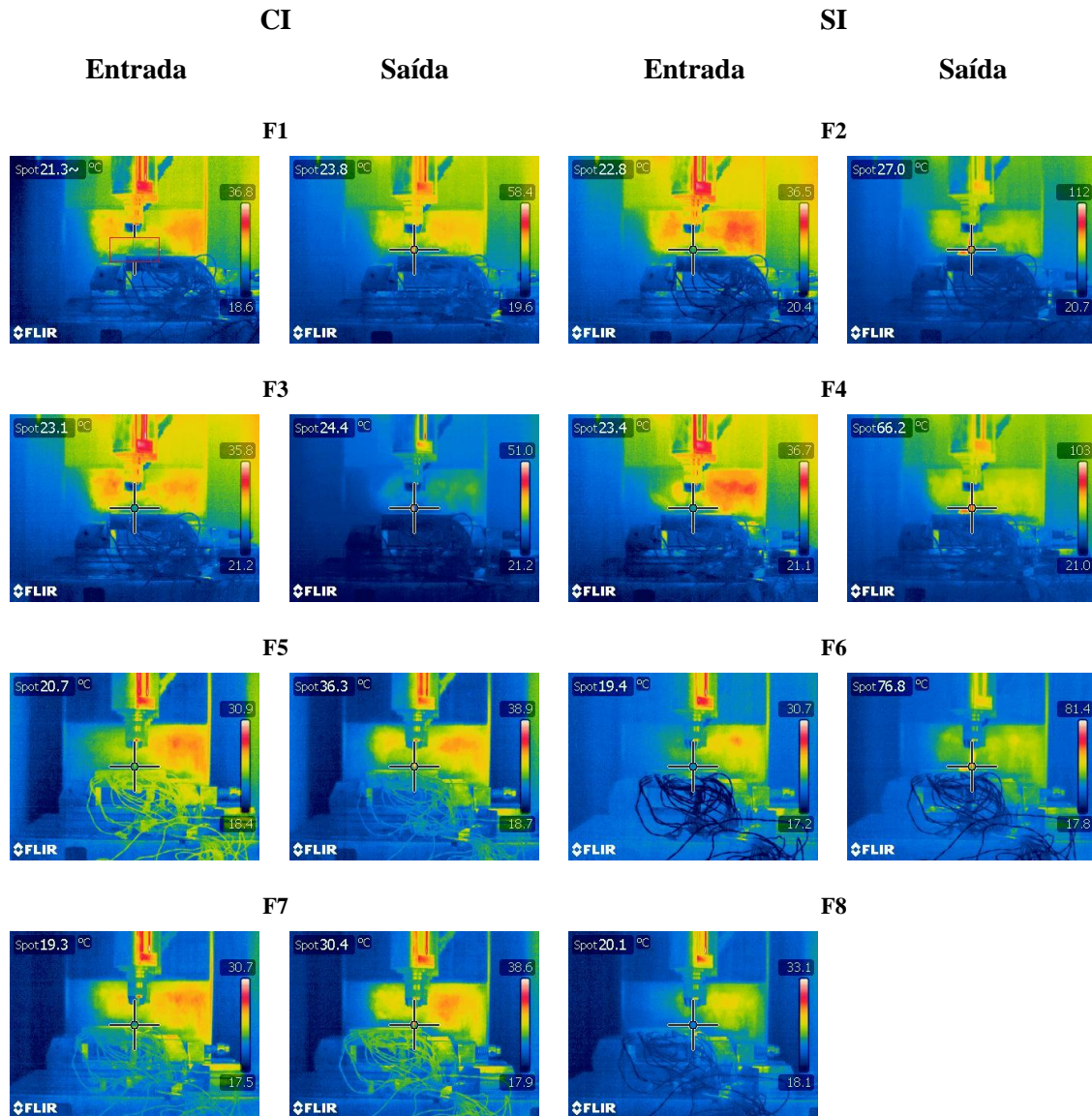
Anexo F

Imagens termográficas antes e após cada furação (BL2, lado A)



Anexo F

Imagens termográficas antes e após cada furação (BL2, lado B)



Anexo G

Tabelas de cada amostra e blocos

800RPM

Amostra 1	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	21,30	18,00	20,16	1,06	7
Saída	66,00	54,10	60,31	4,14	7
Total			40,16	3,85	7

Amostra 2	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	21,00	19,50	20,47	0,63	6
Saída	74,60	62,70	68,42	5,23	6
Total			74,95	4,81	6

Amostra 3	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	20,80	18,80	19,90	0,94	5
Saída	56,00	47,20	52,66	3,27	5
Total			32,76	2,84	5

Amostra 6	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	20,40	18,20	19,52	0,87	5
Saída	55,60	50,40	52,50	1,99	5
Total			32,98	1,53	5

Bloco 2	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	21,60	20,30	20,80	0,69	8
Saída	93,90	86,80	89,01	2,62	8
Total			68,85	3,05	8

900RPM

Amostra 4	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	20,70	20,20	20,48	0,23	5
Saída	68,60	55,00	62,44	5,71	5
Total			41,96	5,76	5

Amostra 5	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	20,70	19,30	20,30	0,57	5
Saída	68,90	60,50	64,44	3,29	5
Total			44,14	3,09	5

Amostra 7	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	20,60	18,30	19,70	0,89	7
Saída	62,50	52,80	55,86	3,24	7
Total			36,16	3,17	7

Amostra 8	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	21,10	19,60	20,27	0,63	6
Saída	62,00	53,10	55,90	3,36	6
Total			35,63	3,81	6

Bloco 1	Máx, °C	Min, °C	Média, °C	Desvio padrão	n
Entrada	21,40	20,00	20,67	0,49	8
Saída	97,70	74,00	89,64	6,96	8
Total			69,10	6,76	8