

Avaliação do dano em processos de furação de materiais compósitos similares a tecidos ósseos

Lucas Dourado Azevedo

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

Outubro de 2016

Agradecimentos

A realização deste trabalho contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estou grato.

À Professora Doutora Elza Fonseca, agradeço pela orientação, apoio, disponibilidade, pelas sugestões e críticas e pelos conhecimentos transmitidos no decorrer deste trabalho.

À Engenheira Goreti Fernandes, agradeço pela colaboração e disponibilidade demonstradas durante a elaboração deste trabalho.

Ao Engenheiro Jorge Meireles, agradeço pela disponibilidade e incansável ajuda prestada durante os ensaios experimentais.

Um agradecimento especial à minha família pelo apoio incondicional, incentivo, pela amizade e paciência.

Finalmente, aos meus amigos, agradeço pelos momentos, pela compreensão e amizade.

Resumo

Em diferentes áreas da medicina existem processos cirúrgicos que envolvem a furação de tecido ósseo, dependendo o seu sucesso da conjugação de diversos parâmetros. A previsão e o controle dos parâmetros envolvidos são fundamentais para a redução do dano no tecido ósseo. Este trabalho tem como objetivo avaliar o estado de tensão gerado durante o processo de furação utilizando materiais sólidos de espumas de poliuretano rígidas com características similares ao osso humano. Durante a furação dos materiais sólidos são utilizados métodos experimentais, baseados na extensometria e na termografia, para análise das deformações e da temperatura na broca. Os parâmetros envolvidos na furação são a geometria da broca constantes em diferentes testes, sendo variável a velocidade de avanço e a velocidade de rotação. Em simultâneo, foi desenvolvido um modelo numérico de dinâmica explícita, com recurso ao método de elementos finitos, através do programa LS-DYNA. Os resultados permitem obter o campo de tensões nos materiais sólidos em função dos diferentes parâmetros de furação. Para a mesma velocidade de rotação e geometria de broca, a diminuição na velocidade de avanço provoca o aumento das tensões. Para a mesma velocidade de avanço e geometria da broca, o aumento da velocidade de rotação provoca aumento das tensões. Em relação à resistência mecânica da espuma de poliuretano rígida utilizada, e para a zona de medição instrumentada, não há registo de dano no tecido. O dano é provocado na zona de furação pela remoção do material.

Palavras-Chave: Furação, Tensões, Velocidade de rotação, Velocidade de avanço.

Abstract

In different fields of medicine there are surgical procedures that involve the bone tissue drilling, depending on its success of the several parameters combination. The calculation and the control of the involved parameters are critical to reducing the bone tissue damage. This research aims to evaluate the level of generated stresses during the drilling process, using solid rigid polyurethane foams with similar mechanical properties to the human bone. During the drilling of the solid materials are used experimental methods, based on strain gauges and thermography, for measuring the strain in the solid materials and temperature calculation on the drill bit. The involved parameters in drilling are the drill bit geometry, always constant in different tests, varying the rotational speed and the feed-rate. In simultaneous, a numerical explicit dynamic model, using the finite element method, was developed through LS-DYNA program. The results allow to obtain the stresses field in solid materials, function of the different drilling parameters. To the same rotational speed and the drill bit geometry, the feed-rate decreases, and carries out the increase in the level of stresses. To the same feed-rate and the drill bit geometry, the rotational speed increases, and carries out the increase in the level of stresses. Due to the mechanical resistance of the rigid polyurethane foam, for the instrumented measured zone, there is no mechanical tissue damage. The damage is caused in the hole due to the perforation by the material removing.

Keywords: Drilling, Stresses, Rotational speed, Feed rate

Conteúdo

| | |
|--|------|
| Agradecimentos | iii |
| Resumo | v |
| Abstract | vii |
| Conteúdo | ix |
| Lista de tabelas | xiii |
| Lista de figuras | xiv |
| Capítulo 1 | 1 |
| Introdução | 1 |
| 1.1. Contextualização e Objetivos..... | 2 |
| 1.2. Organização dos Capítulos..... | 2 |
| Capítulo 2 | 4 |
| Revisão Bibliográfica | 4 |
| 2.1. Propriedades do Osso Cortical | 5 |
| 2.1.1. Modelação Numérica de Furação Óssea..... | 7 |
| 2.1.2. Modelação do Comportamento Material | 8 |
| 2.2. Extensometria..... | 9 |
| 2.3. Processo de Furação | 10 |
| 2.3.1. Parâmetros da Furação..... | 11 |
| 2.3.1.1. Velocidade de Rotação e Avanço | 11 |
| 2.3.1.2. Geometria da Broca | 12 |
| Capítulo 3 | 15 |
| Componente Experimental | 15 |
| 3.1. Introdução | 16 |
| 3.2. Furação em Material Compósito | 16 |
| 3.2.1. Materiais e Métodos | 16 |
| 3.2.2. Resultados Experimentais em Materiais Compósitos..... | 19 |
| 3.2.2.1. Tensão Normal nos Blocos | 20 |
| 3.2.2.2. Temperatura na Ferramenta | 28 |
| 3.3. Furação em Osso Bovino | 31 |
| 3.3.1. Materiais e Métodos | 31 |

| | |
|---|----|
| 3.3.2. Resultados Experimentais em Materiais <i>ex-vivo</i> | 34 |
| 3.3.2.1. Tensão Normal no Osso <i>ex-vivo</i> | 34 |
| 3.3.2.2. Temperatura na Ferramenta | 35 |
| Capítulo 4 | 37 |
| Componente Numérica | 37 |
| 4.1. Introdução | 38 |
| 4.2. Método de Elementos Finitos..... | 39 |
| 4.3. Modelo Dinâmico de Furação | 43 |
| 4.3.1. Modelação do Comportamento Material | 46 |
| 4.3.2. Contacto e Remoção do Material | 47 |
| 4.4. Análise de Tensões..... | 49 |
| Capítulo 5 | 52 |
| Comparação de Resultados | 52 |
| 5.1. Introdução | 53 |
| 5.2. Análise de Tensões..... | 53 |
| 5.2.1. Tensão Normal em Função do Tempo de Furação..... | 53 |
| 5.2.2. Tensão Normal em Função da Velocidade de Avanço..... | 56 |
| Capítulo 6 | 59 |
| Conclusões e Trabalhos Futuros | 59 |
| 6.1. Conclusões | 60 |
| 6.2. Trabalhos Futuros..... | 61 |
| Referências Bibliográficas | 63 |
| Anexo A | 72 |
| Anexo B | 73 |
| Anexo C | 74 |
| Anexo D | 75 |
| Anexo E | 76 |
| Anexo F | 77 |
| Anexo G | 78 |
| Anexo H | 79 |
| Anexo I | 80 |
| Anexo J | 81 |

| | |
|----------------------|----|
| Anexo L | 82 |
| Anexo M | 83 |
| Anexo N | 84 |
| Anexo O | 86 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Aplicações dos modelos de comportamento do material. | 8 |
| Tabela 2. Características da espuma rígida de poliuretano. | 16 |
| Tabela 3. Parâmetros de furação..... | 18 |
| Tabela 4. Parâmetros introduzidos na máquina termográfica. | 19 |
| Tabela 5. Valores médios e desvio padrão dos valores de tensão. | 28 |
| Tabela 6. Temperatura na broca, °C. | 30 |
| Tabela 7. Parâmetros de furação..... | 33 |
| Tabela 8. Valores médios do desvio padrão e da tensão normal. | 34 |
| Tabela 9. Temperatura na ferramenta, °C..... | 35 |
| Tabela 10. Resumo das diferenças entre os métodos de integração temporal..... | 40 |
| Tabela 11. Propriedades mecânicas utilizadas na análise numérica [20]. | 47 |
| Tabela 12. Resultados da tensão normal para tempo de furação, MPa. | 49 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Organização estrutural do osso humano [4]. | 5 |
| Figura 2. Curva tensão-deformação [6]. | 6 |
| Figura 3. Blocos em material compósito da Sawbones. | 17 |
| Figura 4. Disposição dos extensômetros. | 17 |
| Figura 5. Setup experimental utilizado na furação de materiais compósitos. | 18 |
| Figura 6. Estrutura envolvida em tecido negro. | 19 |
| Figura 7. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=25$ mm/min e 600 RPM, Bloco 1. | 21 |
| Figura 8. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=25$ mm/min e 1200 RPM, Bloco 1. | 22 |
| Figura 9. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=50$ mm/min e 600 RPM, Bloco 2. | 23 |
| Figura 10. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=50$ mm/min e 1200 RPM, Bloco 2. | 24 |
| Figura 11. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=75$ mm/min e 600 RPM, Bloco 3. | 25 |
| Figura 12. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=75$ mm/min e 1200 RPM, Bloco 3. | 26 |
| Figura 13. Valores máximos de tensão, $V_R= 600$ RPM. | 27 |
| Figura 14. Valores máximos de tensão, $V_R= 1200$ RPM. | 27 |
| Figura 15. Imagens térmicas do bloco 1. | 29 |
| Figura 16. Imagens térmicas do bloco 2. | 29 |
| Figura 17. Imagens térmicas do bloco 3. | 29 |
| Figura 18. Temperaturas de pico, $V_R= 600$ RPM. | 31 |
| Figura 19. Temperaturas de pico, $V_R= 1200$ RPM. | 31 |
| Figura 20. Osso femoral bovino. | 32 |
| Figura 21. Disposição dos extensômetros. | 32 |
| Figura 22. Setup experimental na furação de ossos ex-vivo. | 33 |
| Figura 23. Valores máximos de tensão. | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 24. Imagens termográficas registadas (a) antes e (b) após a furação. | 35 |
| Figura 25. Temperatura na ferramenta registadas no final da furação. | 36 |
| Figura 26. Aplicação dos métodos de integração temporal. | 40 |
| Figura 27. Elemento SOLID164 do ANSYS® [62]. | 43 |
| Figura 28. Modelo CAD da broca utilizada. | 43 |
| Figura 29. Modelo CAD reduzido da broca (esq.) e modelo em formato IGES (dir.)... | 43 |
| Figura 30. Diferentes modelos do bloco compósito. | 44 |
| Figura 31. Malha de elementos finitos de tamanho variável. | 45 |
| Figura 32. Malha de elementos finitos uniforme em todo o modelo. | 45 |
| Figura 33. Distribuição da tensão equivalente de von Mises para 600 RPM, MPa. | 50 |
| Figura 34. Distribuição da tensão equivalente de von Mises para 1200 RPM, MPa. | 51 |
| Figura 35. Resultados experimentais da tensão normal em função do tempo de furação para 600 RPM. | 53 |
| Figura 36. Resultados numéricos da tensão normal em função do tempo de furação para 600 RPM. | 54 |
| Figura 37. Resultados experimentais da tensão normal em função do tempo de furação para 1200 RPM. | 55 |
| Figura 38. Resultados numéricos da tensão normal em função do tempo de furação para 1200 RPM. | 55 |
| Figura 39. Tensão normal de pico para a profundidade total de furação a 600 RPM. ... | 57 |
| Figura 40. Tensão normal de pico para a profundidade total de furação a 1200 RPM. . | 57 |
| Figura 41. Distribuição da tensão equivalente de von Mises para a furação total do bloco, MPa. | 58 |

Capítulo 1

Introdução

1.1. Contextualização e Objetivos

Em áreas da medicina há processos cirúrgicos que envolvem a furação do tecido ósseo, dependendo o seu sucesso da conjugação de diferentes parâmetros. A análise e o controlo dos parâmetros envolvidos em processos de furação são fundamentais para a prevenção do dano provocado no tecido ósseo.

Os estudos com o objetivo de prever os esforços gerados no tecido ósseo e compreender a influência dos parâmetros em processos de furação são ainda escassos. Além disso, os resultados obtidos são, muitas vezes, contraditórios. Daí a importância e a relevância que se pretende com o presente trabalho.

O trabalho apresentado é o seguimento de anteriores desenvolvimentos de investigação nesta área, para a caracterização dos diferentes parâmetros de furação na geração de dano, térmico e mecânico, em estruturas ósseas [1] [2] [3].

Este trabalho tem como objetivo avaliar as tensões desenvolvidas em materiais compósitos, com propriedades similares ao tecido ósseo cadavérico, e ossos *ex-vivo* de bovino submetidos a furações. Serão desenvolvidas metodologias experimentais para a análise do dano obtido na estrutura com base nos parâmetros envolvidos: velocidade de rotação e velocidade de avanço variáveis, e geometria da broca constante. Apresenta-se ainda uma metodologia numérica, desenvolvida com base na construção de modelos de dinâmica explícita 3D para análise estrutural por elementos finitos, validada pelos resultados experimentais obtidos.

Este trabalho científico foi realizado no âmbito de uma Bolsa de Iniciação Científica na Unidade LAETA 50022, apoio FCT/MEC e cofinanciado pelo FEDER, referência RH LAETA UMNMEE 13/16, maio a novembro de 2016.

1.2. Organização dos Capítulos

O presente trabalho foi organizado em seis 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 docu-

mento ainda se encontram disponíveis anexos que auxiliam a compreensão dos resultados. Em relação à apresentação dos capítulos, e como breve descrição:

- 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;
- no capítulo 3 apresenta-se a componente experimental relativa à furação em material compósito, com os resultados obtidos utilizando diferentes velocidades de rotação e de avanço. Também estão presentes, neste capítulo, todos os procedimentos e materiais utilizados;
- o capítulo 4 apresenta a componente numérica do processo de furação para obtenção das tensões;
- o capítulo 5 apresenta a comparação de resultados entre os modelos experimental e numérico;
- finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões gerais da investigação realizada e possíveis trabalhos a realizar no futuro.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Propriedades do Osso Cortical

O osso tem um arranjo variado de estruturas materiais em diversas escalas que trabalham em conjunto para executar diversas funções mecânicas, químicas e biológicas. O suporte estrutural, a proteção de órgãos vitais e o armazenamento de células são alguns exemplos das funções do tecido ósseo. O comportamento de um corpo sob o efeito de uma carga é função não só da sua forma e estrutura, mas também das propriedades do material pelo qual é constituído. O conhecimento das propriedades mecânicas do osso humano revela-se de extrema importância para a compreensão do mecanismo de fraturas ósseas, bem como para o projeto de dispositivos e operações ortopédicas. Para entender estas propriedades é importante estudar as propriedades mecânicas dos seus componentes bem como a relação estrutural entre eles nos vários níveis de organização estrutural hierárquica. Estes níveis e estruturas são: (1) macroestrutura, osso cortical (compacto) e osso trabecular (poroso ou esponjoso); (2) microestrutura, sistemas haverianos e osteócitos; (3) nanoestrutura, fibras de colagénio [4]. Esta estrutura é organizada de forma hierárquica e tem um arranjo e orientação irregular, no entanto otimizada, fazendo do osso um material heterogéneo e anisotrópico.

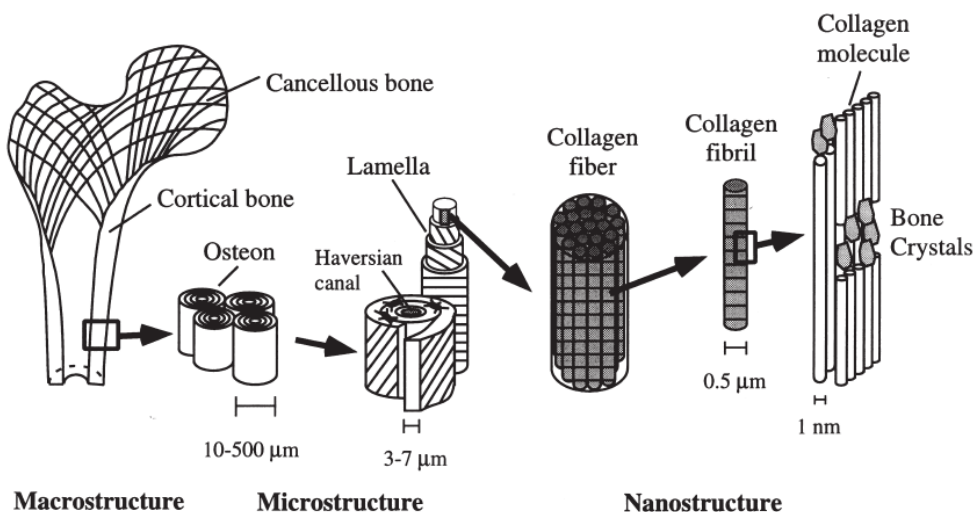


Figura 1. Organização estrutural do osso humano [4].

As propriedades físicas do osso dependem do tipo de tecido e da forma como é organizado para realizar as funções mecânicas. As propriedades estruturais do osso são estabe-

lecionadas em resposta ao carregamento a que normalmente estão sujeitas, e sendo o osso um tecido dinâmico a sua estrutura pode ser alterada em resposta a novos padrões de carga. O osso cortical e trabecular possuem uma organização estrutural complexa com o objetivo de maximizar a resistência e minimizar a massa [5].

Os testes mecânicos do tecido ósseo são essenciais para a compreensão tanto da função como da resposta ao carregamento. As propriedades mecânicas do osso cortical podem ser determinadas recorrendo a uma variedade de métodos. Consequentemente, cada teste revela diferentes detalhes acerca do comportamento mecânico, e são necessários diferentes testes para uma descrição completa da resposta mecânica do tecido ósseo. O resultado básico de um teste mecânico é a curva tensão-deformação (Figura 2).

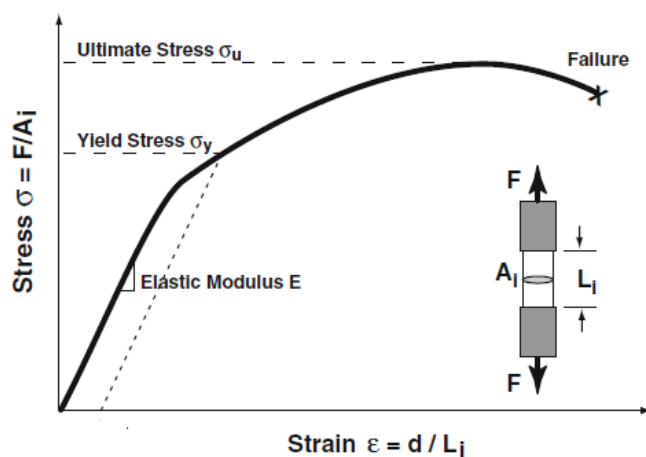


Figura 2. Curva tensão-deformação [6].

As propriedades mecânicas do osso cortical têm sido estudadas por diversos autores ao longo dos anos. Reilly e Burstein (1975) estudaram as propriedades do tecido cortical humano e bovino para diferentes tipos de carregamentos [7]. A influência da idade na degradação das propriedades mecânicas do tecido ósseo femoral humano foi estudada por Currey *et al.* (1996) [8]. As propriedades elásticas do osso cortical e trabecular humano foram medidas através de uma investigação experimental conduzida por Rho *et al.* (1998) [9].

2.1.1. Modelação Numérica de Furação Óssea

A previsão dos esforços gerados durante a furação óssea é essencial para o sucesso de vários procedimentos ortopédicos. Estes esforços, quando excessivos, podem causar dano térmico e mecânico no osso. A modelação numérica de processos de furação óssea ajuda na análise, compreensão e definição dos parâmetros envolvidos com vista a reduzir o dano induzido e promover a regeneração do tecido ósseo.

São reportados pela literatura vários modelos numéricos, utilizando o método de elementos finitos, com o objetivo de prever os esforços de corte e compreender a influência de diferentes parâmetros em processos de furação óssea.

A influência dos parâmetros de furação na temperatura atingida pelo osso cortical foi investigada por Sezek *et al.* (2012) através do método de elementos finitos com validação experimental [10]. Ainda no mesmo ano, foi desenvolvido um modelo numérico para previsão dos esforços de corte com validação experimental por Lee *et al.* (2012). Segundo os autores, o modelo numérico revelou bastante precisão na previsão dos valores médios dos esforços de corte [11].

Lughmani *et al.* (2013) desenvolveram um modelo de elementos finitos tridimensional (3D) para previsão de forças axiais durante a furação óssea. O modelo apresentado incorpora as características dinâmicas envolvidas no processo de furação. Os valores médios críticos obtidos pela análise numérica, para um conjunto de parâmetros de furação, estão próximos dos valores obtidos experimentalmente [12].

Tu *et al.* (2013) desenvolveram um modelo de elementos finitos 3D baseado num material análogo ao osso cortical. O modelo foi utilizado para simular a subida de temperatura óssea durante a furação. Neste estudo foi desenvolvido um método de análise para a obtenção dos valores da temperatura na proximidade do furo e foi discutida a influência da velocidade de avanço na distribuição da temperatura [13].

O efeito dos furos para a fixação interna de fraturas femorais na resistência do osso foi investigado por Fox *et al.* (2014) através da análise de elementos finitos com validação experimental. Neste estudo foram gerados modelos femorais intactos e fraturados para o cálculo dos limites de tensão à tração e compressão [14].

2.1.2. Modelação do Comportamento Material

Em processos de corte e furação, diferentes modelos têm sido desenvolvidos e utilizados com o objetivo de reproduzir o comportamento do osso cortical. Dos mais reportados pela literatura, destacam-se os modelos de Johnson-Cook e de Cowper-Symonds.

O modelo de Johnson-Cook é frequentemente aplicado na análise do comportamento dinâmico de ligas metálicas e está pré-implementado em códigos de elementos finitos como ANSYS®/LS-DYNA [15]. Segundo Alam *et al.* (2009), o efeito da temperatura na tensão de cedência pode ser negligenciado devido às pequenas variações na temperatura [16]. Este modelo é definido pela Eq. (1):

$$\sigma_Y = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\varepsilon_0} \right) \right) \quad (1)$$

onde:

σ_y – tensão de cedência, MPa;

A, B, C e n – constantes do material;

$\dot{\varepsilon}$ – a intensidade da velocidade de deformação plástica, s^{-1} ;

ε_p – a deformação plástica;

O modelo de Cowper-Symonds, utilizado neste trabalho como modelo representativo do comportamento dos blocos compósitos, será apresentado detalhadamente no Capítulo 4.

Estes modelos, apesar de serem inicialmente desenvolvidos e utilizados na maquinação de metais, foram aplicados com sucesso na modelação de processos de corte e furação de tecido ósseo com recurso a elementos finitos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Aplicações dos modelos de comportamento do material.

| Aplicação | Modelo de Comportamento Material | Autores |
|-----------|----------------------------------|---|
| Corte | Johnson-Cook | Alam <i>et al.</i> (2009) [16], Alam <i>et al.</i> (2010) [17], Hage <i>et al.</i> (2013) [18], Santiuste <i>et al.</i> (2014) [19] |
| Furação | Cowper-Symonds | Lughmani <i>et al.</i> (2015) [12], Fernandes <i>et al.</i> (2015) [20] |
| | Johnson-Cook | Alam <i>et al.</i> (2013) [21], |

2.2. Extensometria

A extensometria é uma técnica experimental que permite medir as deformações geradas à superfície de um corpo. Um extensómetro é um dispositivo que mede as diferenças de distância entre dois pontos em corpos sólidos quando o corpo é deformado [22].

Os extensómetros atuam como elementos de deteção dos dispositivos de medição de força e grandezas físicas relacionadas, sendo dispositivos que respondem à deformação mecânica sob alteração da resistência [22].

Existe uma grande variedade de geometrias e aplicações para os extensómetros. Cada modelo é projetado para determinar a deformação ao longo de um eixo definido com o objetivo de ficar corretamente alinhado com o campo de deformações do corpo elástico associado. Os valores de resistência dos extensómetros variam de 100 Ω até a alguns milhares de ohms [22]. É necessária a utilização de um conjunto de aparelhos para transformar a deformação obtida em valores concretos. Além disso, as deformações medidas são geralmente muito pequenas originando variações no sinal elétrico na mesma proporção, não podendo ser lidas diretamente, tornando-se necessário a utilização de um sistema de medição. Para a realização de medições com grande precisão, o extensómetro deve ser escolhido e instalado com o maior cuidado. O corpo em estudo deve ser corretamente limpo de forma a promover uma boa adesão entre este e o extensómetro, evitando erros de leitura.

Uma das primeiras utilizações de extensómetros em tecido ósseo foi um estudo do mecanismo de lesão craniana num canino. Neste estudo, as deformações ósseas foram medidas utilizando um extensómetro ligado a um osciloscópio [23].

Os extensómetros têm sido utilizados para medição de deformações ósseas *in vitro* desde 1950. No entanto, só passadas duas décadas é que surgiu o interesse na medição de deformações fisiológicas, este interesse aliado ao avanço tecnológico dos extensómetros levou à proliferação de estudos sobre medições de deformações ósseas [24]. Medições de deformações *in vivo* foram usadas por Hylander *et al.* (1987) para analisar padrões de carga e movimentos da mandíbula durante a mastigação em suínos [25]. Estudos semelhantes com o objetivo de comparar mudanças em padrões de carga com características

anatômicas e histológicas do tecido ósseo foram realizados por Goodship *et al.* (1979), Rubin e Lanyon (1984) [26] [27]. A relação entre as alterações morfológicas do tecido ósseo induzido por implantes e a deformação induzida por estes foi estudada por Carter *et al.* (1981) com recurso à extensometria [28].

2.3. Processo de Furação

A furação óssea é uma operação mecânica largamente realizada em procedimentos cirúrgicos ortopédicos. O processo de furação pode ser definido como o corte através de arranque de aparas, com base em dois movimentos simultâneos, movimento de rotação (de corte) e movimento de translação (de avanço) [29].

Uma furação segura e eficiente requer destreza e instrumentos apropriados. Com o avanço tecnológico, as ferramentas utilizadas em procedimentos cirúrgicos que envolvem furação óssea têm sido aprimoradas, no entanto, o sucesso de uma furação ainda depende bastante da experiência e destreza do cirurgião [30]. Apesar da precisão e exatidão na execução do furo, existem diversos fatores relacionados com o processo de furação que se não forem corretamente estabelecidos podem induzir dano no tecido ósseo.

Operações de furação por si só podem causar dano no tecido ósseo. Investigações nesta área são mais focadas no dano térmico induzido durante a furação, o que pode levar à necrose térmica do osso, ou seja, morte do tecido ósseo devido ao excesso de temperatura. Enquanto não existe um consenso definitivo em relação ao valor crítico e a sua duração, Eriksson e Albrektsson (1984) mostraram que um aumento de temperatura no osso cortical acima de 50°C implica redução na capacidade regenerativa do tecido ósseo [31]. Segundo Lundskog (1972), ocorrerá necrose óssea se o tecido estiver exposto a uma temperatura de 50°C durante 30 segundos [32]. Eriksson e Albrektsson (1983) demonstraram que a elevação de temperatura acima de 47°C durante 1 minuto tem elevado potencial osteonecrotico [33].

A aplicação de grandes esforços durante a furação óssea pode resultar em dano para o tecido ósseo, promovendo a formação de fissuras o que diminui significativamente a resistência do tecido ósseo [34].

2.3.1. Parâmetros da Furação

Existem vários parâmetros que são fundamentais para o sucesso de um procedimento cirúrgico ortopédico. Na furação óssea, uma correta conjugação dos parâmetros envolvidos permite reduzir ou até evitar o dano provocado neste tipo de procedimentos. A idade do paciente, o género e as patologias associadas variam de pessoa para pessoa e têm influência nas propriedades do tecido ósseo. Estes fatores influenciam os esforços de corte e a geração de temperatura durante a furação óssea. A velocidade de rotação, a velocidade de avanço e a geometria da broca são os parâmetros mais estudados e reportados pela literatura. Para a medição destes parâmetros e a sua influência em processos de furação óssea têm sido realizadas diversas investigações. A maioria dos trabalhos focam a influência dos parâmetros no dano provocado pelo aquecimento excessivo do tecido ósseo, já os trabalhos que são focados no dano mecânico provocado pela furação são escassos e os resultados chegam, em alguns casos, a ser contraditórios.

2.3.1.1. Velocidade de Rotação e Avanço

As conclusões sobre a influência da velocidade de rotação em processos de furação óssea reportadas pela literatura não são consistentes. Alguns investigadores sugerem que um aumento na velocidade de rotação provoca aumento na temperatura, enquanto outros sugerem precisamente o contrário. Vaughan e Peyton (1951) estudaram a influência da velocidade de rotação na temperatura durante a preparação de cavidades dentárias e reportaram que o aumento da velocidade de rotação provoca aumento na temperatura gerada [35]. Thompson (1959) reportou um aumento de temperatura com a variação da velocidade de rotação de 125 para 200 RPM durante a inserção de pinos esqueléticos *in vivo* [36].

Ao investigar um fémur humano cadavérico, Matthews e Hirsch (1972) concluíram que a variação da velocidade de rotação de 345 para 2900 RPM não tem impacto significativo na variação de temperatura, no entanto reportaram que o aumento da velocidade de avanço está associada com a descida de temperatura [37]. Estes resultados são confirmados por Augustin *et al.* (2008), que concluíram que o pico de temperatura durante a furação decresce à medida que a velocidade de avanço aumenta [38].

Através dos resultados obtidos por Wiggins e Malkin (1976), é possível concluir que o aumento da velocidade de avanço origina redução da temperatura gerada, no entanto só é aplicável para um conjunto de parâmetros bem definidos. Segundo os autores, a velocidade de avanço deve ser usada em conjunto com outros parâmetros, como irrigação externa ou baixa velocidade de rotação, de forma a reduzir a temperatura no tecido ósseo [39].

A influência de vários parâmetros no aquecimento do tecido ósseo foi estudada por Reingewirtz *et al.* (1997) utilizando um fêmur de bovino. Foi proposto que a temperatura é proporcional à velocidade de rotação numa gama que varia de 400 a 7000 RPM. No entanto, para uma gama de 7000 a 24000 RPM o efeito é contrário [40].

Toews *et al.* (1999) ao examinarem o efeito da velocidade de avanço e rotação na temperatura em osso equino, concluíram que o aumento da velocidade de avanço está associada com a diminuição da temperatura [41].

Através de investigações com base no método de elementos finitos, Sezek *et al.* (2012) concluíram que a temperatura é inversamente proporcional à velocidade de avanço. Com o aumento da velocidade de avanço de 30 para 70 mm/min, para a mesma velocidade de rotação, foi observado uma diminuição da temperatura em 12% [10].

O efeito da velocidade de avanço nos esforços de corte e na energia de corte específica foi investigada por Soriano *et al.* (2013). Segundo o autor, o aumento da velocidade de avanço reduz os esforços de corte e a energia específica de corte durante processos de furação óssea. Este efeito é atribuído à mudança no coeficiente de atrito que ocorre entre a broca e o osso quando a velocidade de avanço aumenta [42].

2.3.1.2. Geometria da Broca

As especificações da broca têm grande influência nos esforços de corte e na geração de temperatura durante processos de furação. Portanto, uma correta escolha destes parâmetros é fundamental para o sucesso da furação. As principais características a ter em consideração na escolha de uma broca são o material, as dimensões e os diferentes ângulos [43].

Vários investigadores realizaram experiências com o objetivo de determinar o efeito do diâmetro da broca na geração de temperatura durante furação óssea. Augustin *et al.*

(2008) estudaram a influência de diferentes parâmetros de furação no aumento de temperatura óssea. Foram utilizados diferentes diâmetros, velocidades de avanço e velocidades de rotação. Concluíram que o aumento do diâmetro da broca provoca aumento na temperatura óssea [38]. Por outro lado, brocas maiores têm flautas maiores o que contribui para uma maior eliminação da apara resultando numa furação mais eficiente com menor aumento da temperatura óssea.

Hufner *et al.* (2005) reportaram que um dos problemas associado com diâmetros pequenos ($\leq 3.2\text{mm}$), é que existe a possibilidade de ocorrência de flexão da broca dentro do osso. O desvio que ocorre desde o ponto real para o ponto planeado inicialmente pode variar de 1 até 10 mm e é significativamente influenciado pelo comprimento da broca e do canal [44]. Adicionalmente foram reportados por Bechtol *et al.* (1956) efeitos negativos com a utilização de diâmetros grandes. Furos com diâmetro superior a 20% do diâmetro do osso reduzem a resistência do osso em 40% [45].

O efeito de diferentes ângulos de ponta e hélice têm sido estudados. Jacob *et al.* (1976) avaliaram brocas com várias combinações de ângulos de ponta e de hélice. A análise destes resultados demonstrou que maiores ângulos de hélice e de ponta aumentam a eficiência da furação e propuseram um ângulo de ponta de 90° [46].

Wiggins e Malkin (1978) mostraram que uma broca com ângulo de ponta de 118° e ângulo de hélice de 28° provoca um esforço de corte significativamente menor quando comparada com uma broca com ângulo de ponta de 60° [47].

Ângulos de ponta entre 110° e 118° foram sugeridos por Saha *et al.* (1982) [48]. Trabalhos mais recentes (Natali *et al.* 1996) confirmam estes resultados, mostrando que um ângulo de ponta de 118° aumenta o desempenho, reduz os esforços de corte e o tempo de furação [49].

Um trabalho recente foi realizado por Paszenda e Basiaga (2009) com o objetivo na determinação de deformações e tensões na broca através de uma análise com base no método de elementos finitos. Os resultados da análise biomecânica de brocas utilizadas em procedimentos cirúrgicos ortopédicos mostraram que para um ângulo de ponta de 90° , as tensões e as deformações são menores do que as registadas para um ângulo de

120° [50]. Ainda os mesmos autores concluíram que, um ângulo de ponta de 120° provoca maior esforço de corte quando comparado com um ângulo de 90° [51].

Capítulo 3

Componente Experimental

3.1. Introdução

A investigação experimental é constituída por diversas técnicas e atividades com o objetivo de recolher toda a informação que se apresente relevante para a resolução do problema. A metodologia experimental assenta na utilização de parâmetros de estudo e no efeito que esses provocam nos comportamentos observados. Sob condições controladas, a variação de parâmetros e a repetição de ensaios permitem a verificação da hipótese inicialmente formulada.

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de uma metodologia experimental, baseada na extensometria e na termografia, para análise das deformações na superfície do material compósito e da temperatura gerada na broca.

3.2. Furação em Material Compósito

3.2.1. Materiais e Métodos

Para a realização da componente experimental foram utilizados três blocos compósitos de espuma rígida de poliuretano, da *Sawbones*. Por apresentarem propriedades mecânicas similares ao osso cortical humano cadavérico, este material compósito revela-se uma boa alternativa para a realização dos testes de furação. As características do material compósito são apresentadas na Tabela 2 [52].

Tabela 2. Características da espuma rígida de poliuretano.

| Características | |
|-----------------|-----------------------|
| Dimensão | 130 x 180 x 40 mm |
| Massa Volúmica | 800 kgm ⁻³ |

Os blocos em material compósito foram previamente preparados para a instrumentação com os extensómetros. Inicialmente foram definidas as marcações onde serão realizados os diferentes furos, garantindo sempre a mesma distância entre o furo e o extensómetro. Posteriormente, procedeu-se à limpeza dos locais destinados à colocação dos extensómetros para uma boa adesão dos mesmos. Na Figura 3 são apresentadas as várias etapas da preparação dos blocos compósitos.

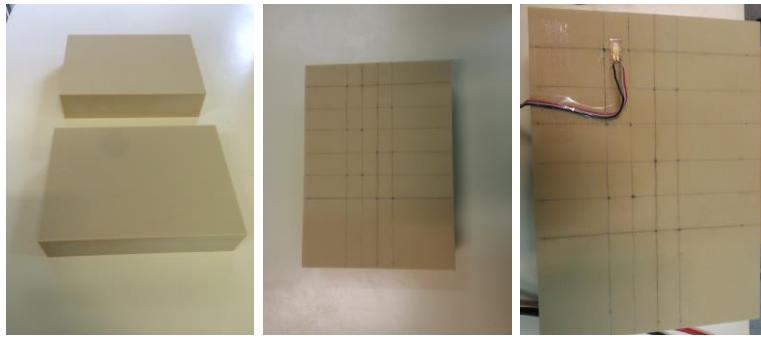


Figura 3. Blocos em material compósito da Sawbones.

Foram utilizados 18 extensômetros lineares para um total de 36 furos, que permitirão efetuar o cálculo das tensões normais nesse ponto e na mesma direção. A Figura 4 representa a disposição dos extensômetros à superfície do bloco compósito, a uma distância dos furos de 3,5 mm ao centro do extensômetro.

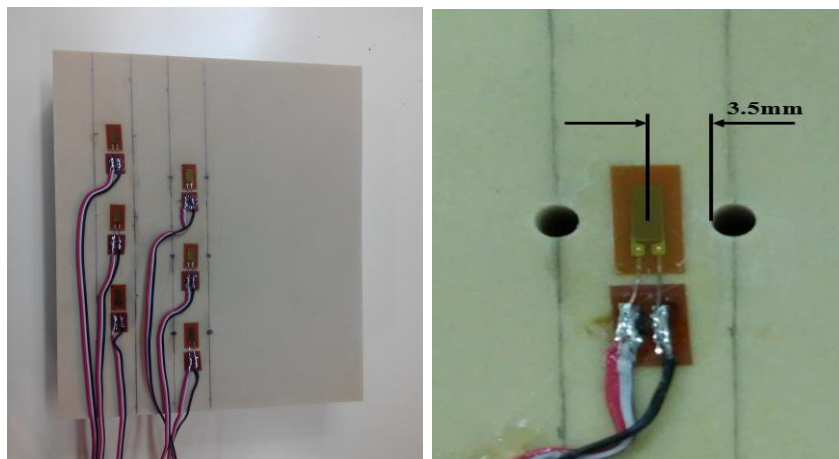


Figura 4. Disposição dos extensômetros.

Para o registo das deformações nos blocos compósitos foram utilizados extensômetros (1-LY18-6/120, $120\Omega \pm 0.35\%$, HBM), colados na superfície dos blocos compósitos e ligados a um sistema de aquisição de dados (Vishay Micro Measurements P3 Strain Indicator Recorder) e a um computador. A furação dos blocos foi efetuada numa máquina CNC (DMC 63V), tendo sido utilizada uma broca de aço rápido sinterizado com 4 mm de diâmetro, 75 mm de comprimento e ângulo de ponta 118° . A Figura 5 representa o *setup* experimental utilizado durante as furações.

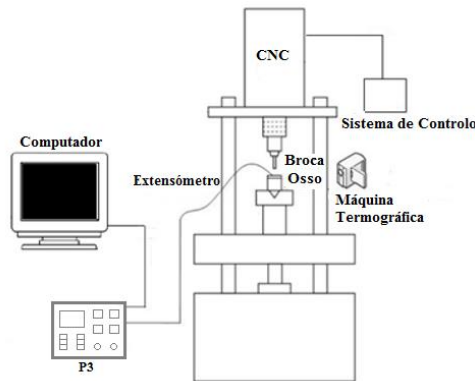


Figura 5. Setup experimental utilizado na furação de materiais compósitos.

Nos parâmetros de furação foram utilizadas diferentes velocidades de avanço, e para cada velocidade de avanço foram utilizadas duas velocidades de rotação. As velocidades de avanço utilizadas foram de 25, 50 e 75 mm/min e para cada uma delas foram utilizadas velocidades de rotação de 600 e 1200 RPM. Todos os parâmetros de furação referidos neste capítulo encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de furação.

| Parâmetros | Bloco 1 | Bloco 2 | Bloco 3 |
|------------------------------|---------------|-----------|-----------|
| Velocidade de avanço, V_f | 25 mm/min | 50 mm/min | 75 mm/min |
| Tempo de Furação, t | 75s + 55s | 36s + 55s | 25s + 55s |
| Velocidade de rotação, V_R | 600, 1200 RPM | | |
| Diâmetro da broca, d | 4 mm | | |
| Angulo de ponta, α | 118° | | |

No modelo experimental, o efeito da temperatura provocado pela furação no bloco não foi contemplado, tendo sido só efetuado o registo de temperaturas na broca. Segundo investigações realizadas, com combinações semelhantes de parâmetros, as temperaturas registadas na zona de medição instrumentada são baixas não ultrapassando o limite suportado pelo osso [3] [13] [53] [54]. Com a utilização dos parâmetros apresentados na Tabela 3, as temperaturas registadas à superfície mantem-se à temperatura ambiente não sendo por isso significativas, o mesmo acontecendo no interior do bloco e próximo do furo, com exceção na zona em contato com a broca. Por este motivo, e ao longo deste trabalho, serão unicamente recolhidas as temperaturas na broca utilizando uma metodologia experimental.

As temperaturas na ferramenta de corte foram registadas, com uma câmara termográfica FLIR®T365, imediatamente antes e após a furação. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente da sala.

A máquina termográfica utilizada tem uma precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, resolução de 320×240 pixels e sensibilidade térmica $<0.05^{\circ}\text{C} + 30^{\circ}\text{C}$. Possui ainda gamas de temperatura entre de -20°C a 120°C , 0°C a 350°C e 200°C a 650°C [55].

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros utilizados para a aquisição das imagens termográficas.

Tabela 4. Parâmetros introduzidos na máquina termográfica.

| | |
|-----------------------------|------|
| Emissividade | 0,70 |
| Temperatura ambiente | 20°C |
| Humidade Relativa | 50% |
| Distância | 1,5m |

Em termografia é comum ocorrer contaminação por fontes externas no registo de imagens. Para evitar erros de leitura devido ao efeito da radiação durante o processo de furação, foi realizada uma estrutura envolvida em tecido negro, apresentada na Figura 6.



Figura 6. Estrutura envolvida em tecido negro.

3.2.2. Resultados Experimentais em Materiais Compósitos

Os resultados obtidos no modelo experimental foram agrupados em função dos resultados das tensões normais dos blocos, em direções conhecidas, e da temperatura da ferramenta de corte.

3.2.2.1. Tensão Normal nos Blocos

Durante o processo de furação óssea são gerados campos de tensão e deformação no material. O estado de tensão normal num ponto foi determinado recorrendo a grandezas medidas experimentalmente, sendo este processo designado por análise experimental de tensões. Recorrendo à extensometria é possível recolher os dados relativos à deformação na superfície da estrutura. As variações de resistência causadas por deformações mecânicas do extensómetro são medidas num circuito de tipo potenciométrico ou ponte de Wheatstone que produz um determinado sinal de saída em termos de diferença de potencial [56]. As medições foram efetuadas utilizando-se a ligação quarto de ponte e o sinal amplificado foi lido e registado. Para o cálculo das deformações recorreu-se à Equação 2 [57]:

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{K}\right) \times 4 \times \left(\frac{V}{\varepsilon^n}\right) \times 10^{-6} \quad (2)$$

Onde K é o fator de calibração do extensómetro (neste caso igual a 2,16) e $\frac{V}{\varepsilon^n}$ representa o sinal lido pelo extensómetro.

Recorrendo à teoria da elasticidade, a relação entre as deformações obtidas e a rigidez do material permitem calcular as tensões normais, através da Equação 3:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3)$$

Onde E representa o módulo de elasticidade e ε representa o valor de deformação.

Para uma melhor análise e compreensão dos resultados, estes foram agrupados de acordo com as velocidades de rotação impostas.

É importante referir que para cada conjugação de parâmetros foram realizados seis furos, no entanto, devido a erros de leitura e calibração, alguns foram rejeitados.

Na Figura 7 são apresentados os resultados das tensões normais obtidos para o Bloco 1 utilizando a velocidade de rotação de 600 RPM.

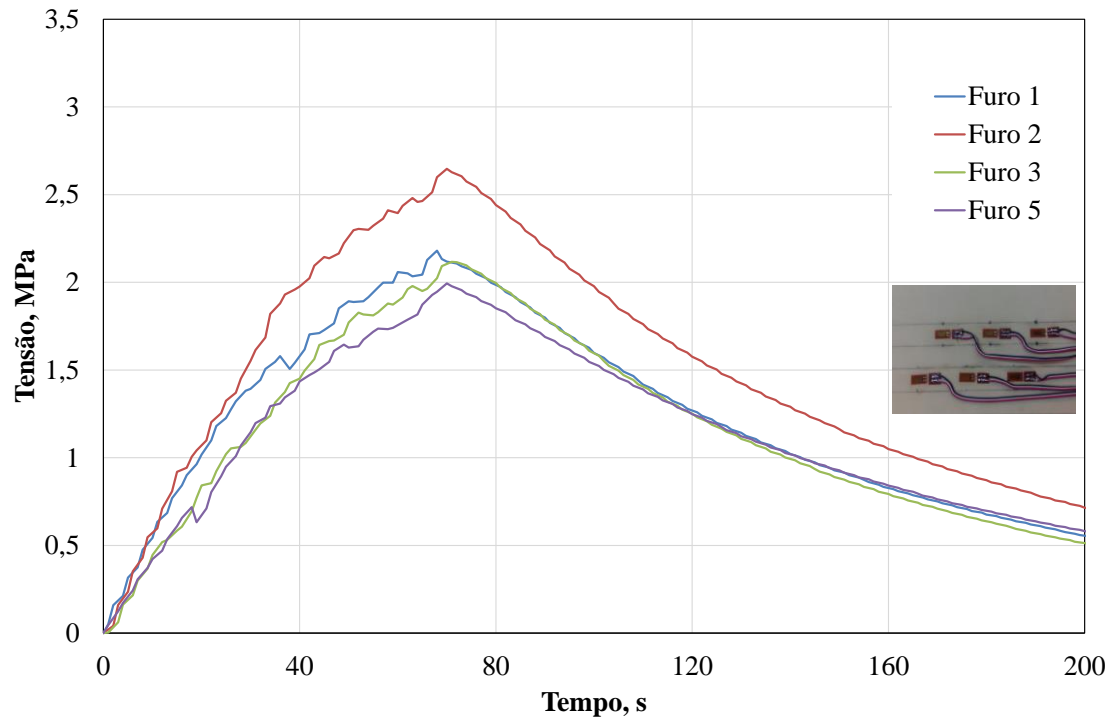


Figura 7. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=25$ mm/min e 600 RPM, Bloco 1.

Analisando os resultados, verifica-se um aumento da tensão normal na direção da leitura do extensômetro, à medida que a ferramenta penetra no bloco compósito. O valor máximo de tensão ocorre no final da furação, quando a ferramenta atinge 30 mm de profundidade correspondente a 72 segundos de furação. Em todos os furos verifica-se uma tendência crescente em termos do valor da tensão até aos 72 segundos, a partir deste instante a tendência é decrescente. O furo 2 apresenta as tensões mais elevadas, ultrapassando os 2,5 MPa. Os restantes furos apresentam valores muito próximos a 2 MPa.

Apesar da tendência crescente do valor da tensão ao longo da furação são perceptíveis pequenas variações próximas do pico de tensão, isto pode ser explicado devido à formação de aparas na superfície do bloco, que influencia a leitura e o registo das deformações.

Os resultados individuais obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 1 com velocidade de rotação igual a 600 RPM são apresentados no Anexo A.

Na Figura 8 são apresentados os resultados de tensões obtidos para o Bloco 1 utilizando a velocidade de rotação de 1200 RPM.

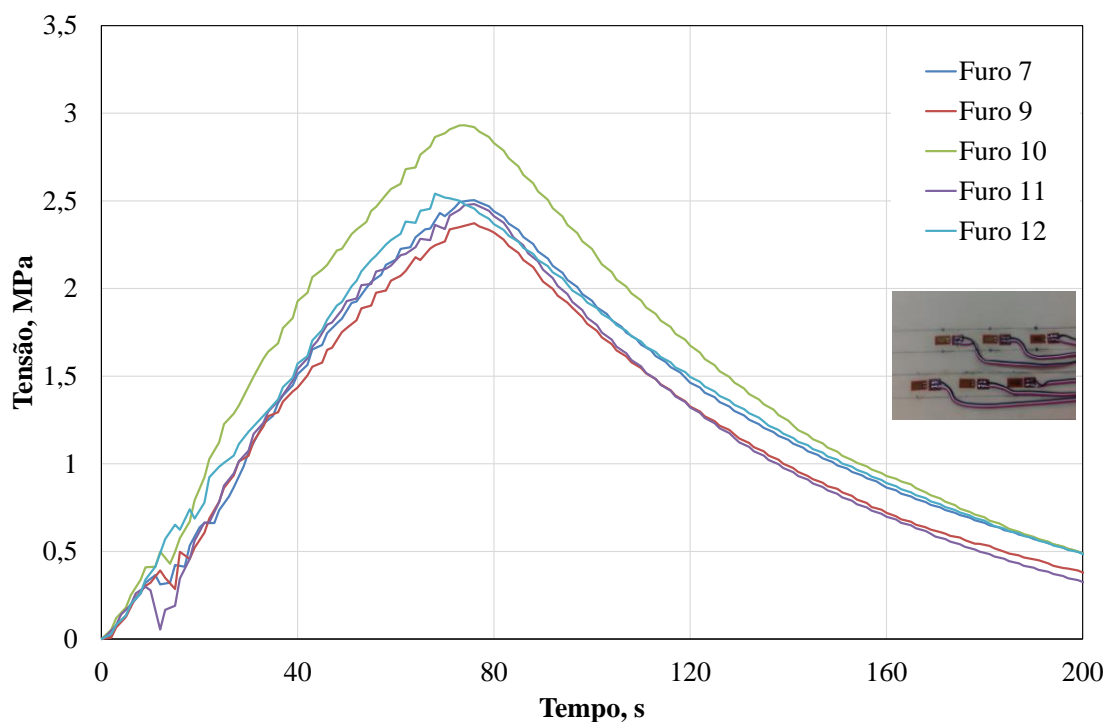


Figura 8. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=25$ mm/min e 1200 RPM, Bloco 1.

Como era expectável, os resultados obtidos permitem observar um aumento médio de tensão normal obtida segundo a instalação do extensómetro, comparando com os resultados anteriores (Bloco 1 com 600 RPM). O furo 10 apresenta os valores de tensão mais elevado, próximo de 3 MPa. Os restantes furos apresentam valores muito próximos entre si, com valor médio de 2,5 MPa. Devido à proximidade de valores, este caso apresenta um bom desvio padrão. Como o único parâmetro que varia nos resultados de cada bloco é a velocidade de rotação, e como não tem influência no tempo de furação, o valor máximo de tensão ocorre precisamente no final da furação, quando a ferramenta atinge 30 mm de profundidade, que corresponde 72 segundos no tempo de furação. Em todos os furos verifica-se uma tendência crescente em termos do valor da tensão até aos 72 segundos, a partir deste instante a tendência é decrescente. Para o Bloco 1, independentemente da velocidade de rotação, quando é atingido o pico de tensão esta diminui rapidamente até estabilizar. Os resultados individuais obtidos para as furações realizadas no Bloco 1 com velocidade de rotação igual a 1200 RPM são apresentados no Anexo B.

Na Figura 9 são as tensões normais obtidas para o Bloco 2 utilizando a velocidade de rotação de 600 RPM.

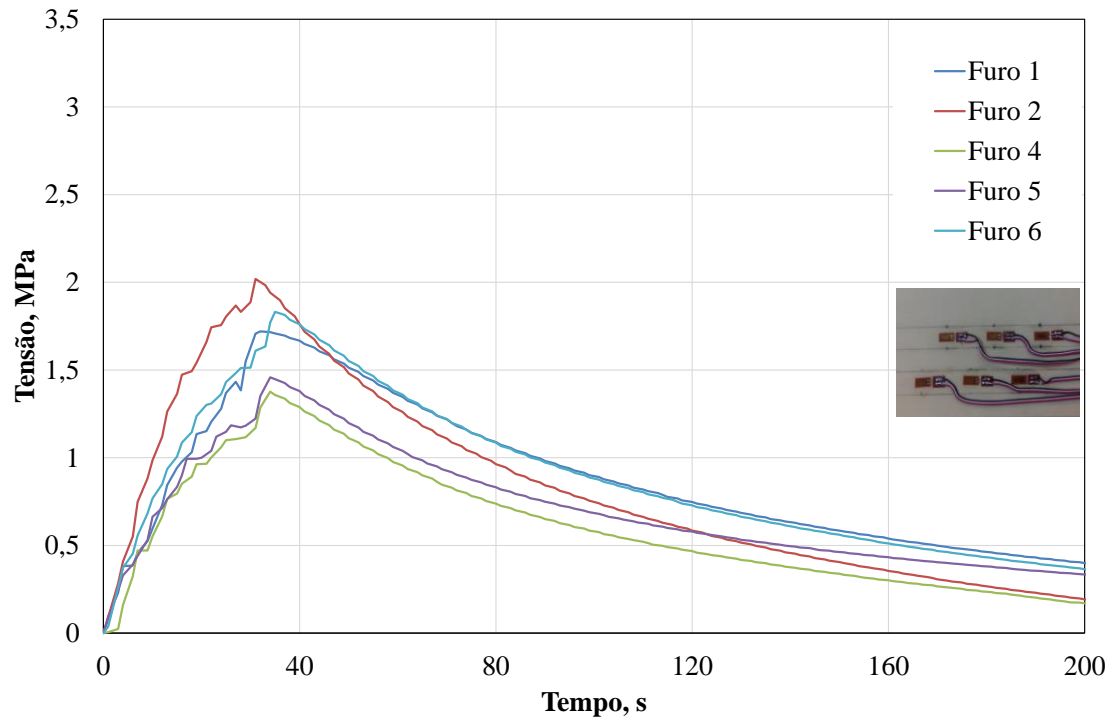


Figura 9. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=50$ mm/min e 600 RPM, Bloco 2.

Analisando os resultados, verifica-se que a tensão normal aumenta à medida que a ferramenta penetra no bloco e o valor máximo ocorre no final da furação, quando a ferramenta atinge 30 mm de profundidade, que corresponde 36 segundos de furação. Em todos os furos verifica-se uma tendência crescente no valor da tensão até 36 segundos, a partir deste instante a tendência é decrescente. Neste caso, não existe tanta proximidade de valores máximos da tensão normal como nos resultados anteriores. O furo 2 apresenta o valor de tensão de pico mais elevado, ultrapassando os 2 MPa. Os furos 1 e 6 apresentam resultados relativamente próximos, com valor de tensão próximo de 1,7 MPa. Os furos 4 e 5 apresentam resultados significativamente mais reduzidos que os restantes, com valores máximos inferiores a 1,5 MPa. Verifica-se que, atingido o pico de tensão, esta decresce de uma forma mais dissimulada do que se verifica no bloco 1, estabelecendo em todos os casos abaixo de 0,5 MPa.

Os resultados individuais obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 2 com velocidade de rotação igual a 600 RPM são apresentados no Anexo C.

A Figura 10 apresenta os resultados das tensões normais obtidos para o Bloco 2 utilizando velocidade de rotação de 1200 RPM.

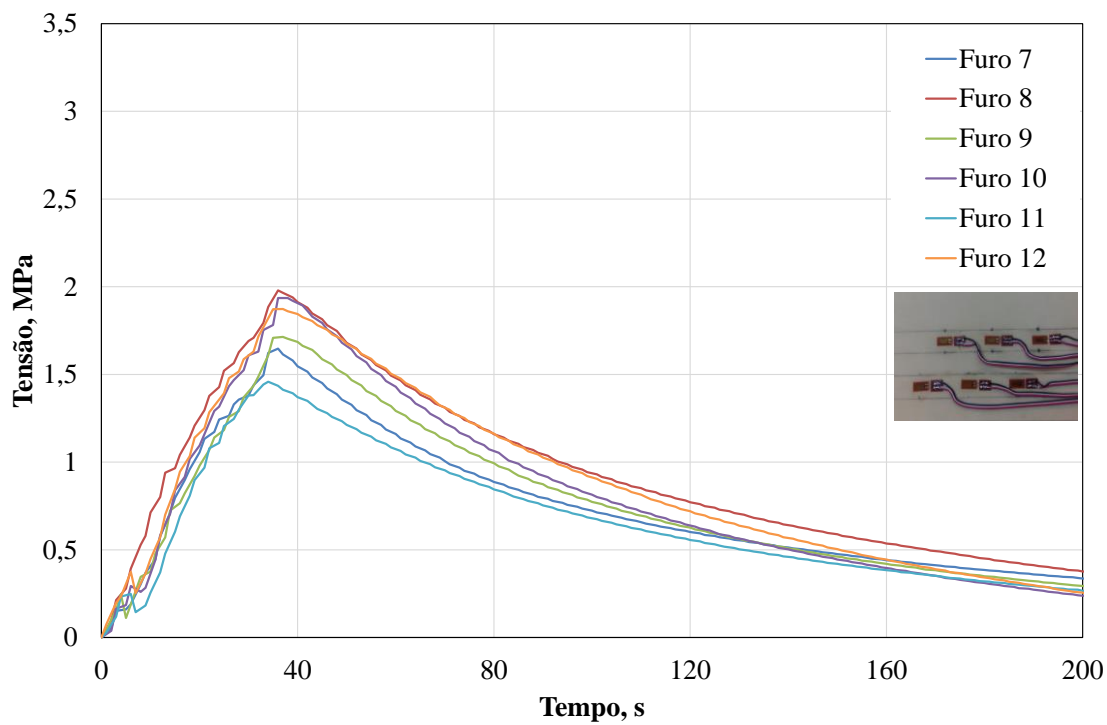


Figura 10. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=50$ mm/min e 1200 RPM, Bloco 2.

Verifica-se um aumento médio da tensão normal em relação ao caso anterior (Bloco 2 com 600 RPM), o que permite concluir acerca do efeito da velocidade de rotação quando os restantes parâmetros são constantes. Como o único parâmetro que varia para os resultados de cada bloco é a velocidade de rotação, e como esta não tem influência no tempo de furação, o valor máximo de tensão ocorre precisamente no final da furação, quando a ferramenta atinge 30 mm de profundidade, que corresponde a 36 segundos de furação. Em todos os furos verifica-se uma tendência crescente nos valores da tensão até aos 36 segundos, a partir deste instante a tendência é decrescente.

Os furos 8, 10 e 12 apresentam valores para a tensão muito próximos de 2 MPa, já os restantes furos apresentam valores mais reduzidos. E à semelhança do caso anterior, a estabilização da tensão ocorre de forma mais dissimulada.

Os resultados individuais obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 2 com velocidade de rotação igual a 1200 RPM são apresentados no Anexo D.

Na Figura 11 são apresentados os resultados obtidos para o Bloco 3 utilizando velocidade de rotação de 600 RPM.

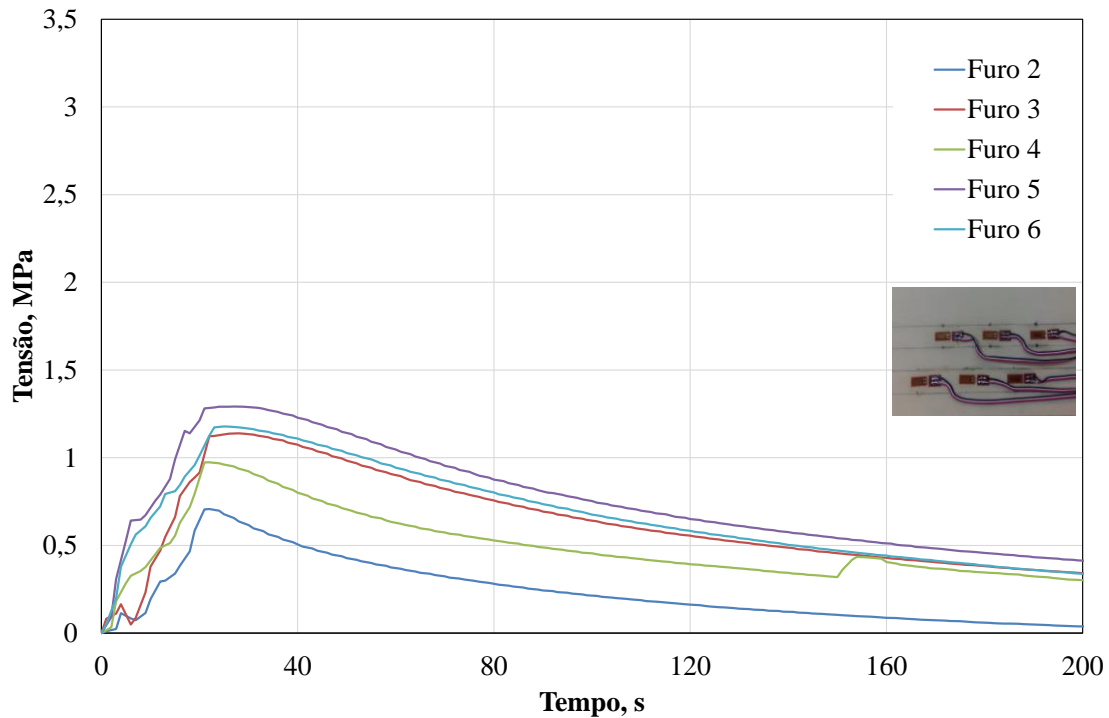


Figura 11. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=75$ mm/min e 600 RPM, Bloco 3.

Pelos resultados obtidos é notória uma drástica diminuição da tensão em comparação com os blocos 1 e 2, o que permite concluir acerca do efeito da velocidade de avanço na obtenção de tensões no bloco compósito. O aumento na velocidade de avanço provoca diminuição da tensão no bloco compósito. Com o aumento da velocidade de avanço, o tempo de furação é menor, o que implica que a tensão de pico seja atingida de forma mais rápida que nos blocos anteriores. Para bloco 3, o pico de tensão é atingido aos 24 segundos com o valor de 1,3 MPa. Os furos 2 e 4 apresentam as tensões normais mais baixas, nunca ultrapassando 1 MPa. Para os furos 3, 5 e 6 a tensão é mais elevada, no entanto nunca ultrapassa 1,5 MPa. Atingido o pico de tensão aos 24 segundos, é possível verificar que a tensão demora mais tempo a estabilizar em comparação com os blocos 1 e 2. Este atraso na estabilização deve-se ao valor atingido, quanto maior a tensão de pico, mais acentuada será a descida até à estabilização.

Os resultados individuais obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 3 com velocidade de rotação igual a 600 RPM são apresentados no Anexo E.

Na Figura 12 são apresentados os resultados obtidos para o Bloco 3 utilizando a velocidade de rotação igual a 1200 RPM.

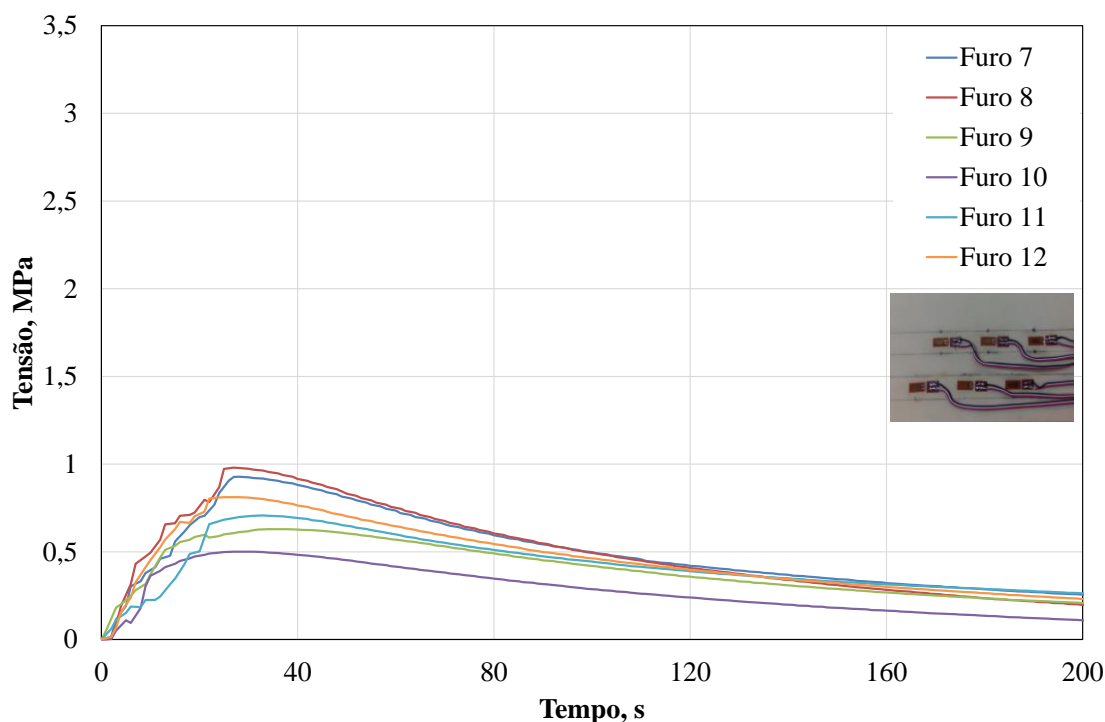


Figura 12. Evolução da tensão em função do tempo para $V_f=75$ mm/min e 1200 RPM, Bloco 3.

Analisando os resultados, verifica-se uma redução média das tensões em comparação com os valores obtidos para o mesmo bloco com diferente velocidade de rotação (600 RPM).

Contrariando a tendência que se verificou em todos os resultados anteriores, para o bloco 3 e para a velocidade de 1200 RPM, a tensão normal na direção da leitura do extensômetro diminuiu com o aumento da velocidade de rotação, para uma velocidade de avanço constante.

À exceção dos furos 7 e 8, nenhum dos restantes furos apresenta um pico bem definido e os valores de tensão são inferiores a 1 MPa, sendo a estabilização da tensão mais lenta.

Os resultados individuais obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 3 com velocidade de rotação igual a 1200 RPM são apresentados no Anexo F.

Para facilitar a análise de resultados entre os diferentes casos em estudo, são apresentados nas Figuras 13 e 14 os valores máximos de tensão normal obtidos de acordo com a velocidade de rotação utilizada.

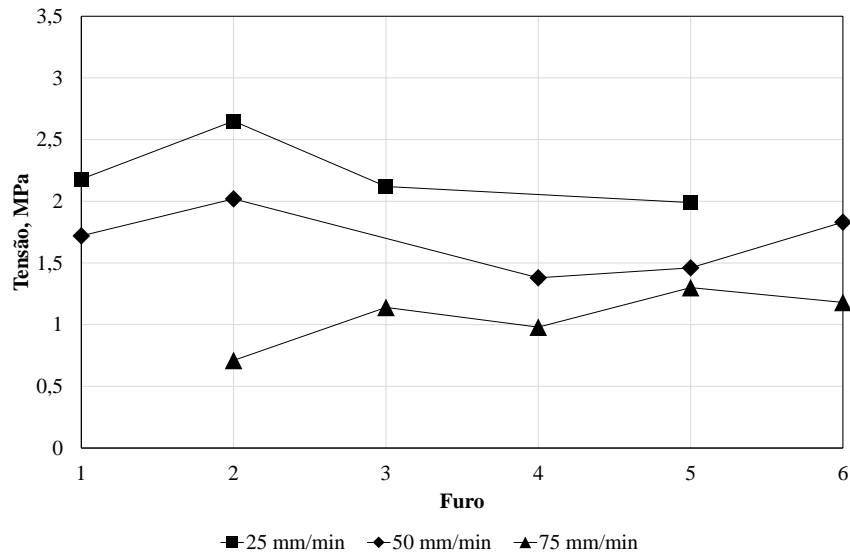


Figura 13. Valores máximos de tensão, $V_R= 600$ RPM.

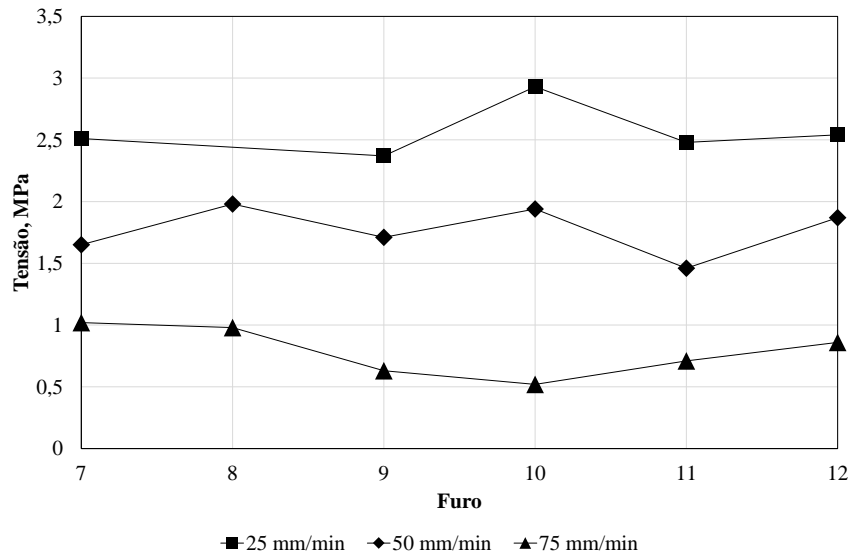


Figura 14. Valores máximos de tensão, $V_R= 1200$ RPM.

Atendendo aos resultados apresentados nas Figuras 13 e 14 é notório que, em processos de furação óssea e para os parâmetros utilizados, o aumento da velocidade de avanço provoca uma diminuição das tensões no bloco compósito. Isto verifica-se para as duas

velocidades de rotação. Para a mesma velocidade de avanço, o aumento na velocidade de rotação provoca tensões mais elevadas.

No entanto, e para os ensaios efetuados, o aumento no dobro da velocidade de rotação não permite concluir o aumento no dobro nas tensões no material. É importante referir que para a velocidade de avanço de 75 mm/min o efeito é contrário, isto é, o aumento da velocidade de rotação provoca diminuição de tensões.

Na Tabela 5 encontra-se representada a média das tensões normais obtidas e o desvio padrão para cada caso em estudo.

Tabela 5. Valores médios e desvio padrão dos valores de tensão.

| Bloco | 1 | | 2 | | 3 | |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 600 | 1200 | 600 | 1200 | 600 | 1200 |
| Velocidade de rotação [RPM] | 600 | 1200 | 600 | 1200 | 600 | 1200 |
| Média das tensões [MPa] | 2,34 | 2,57 | 1,68 | 1,77 | 1,06 | 0,79 |
| Desvio Padrão | 0,25 | 0,19 | 0,24 | 0,18 | 0,2 | 0,18 |

Através da Tabela 5 verifica-se que com o aumento da velocidade de avanço, as tensões normais do bloco tendem a diminuir.

Para a mesma velocidade de avanço, o aumento da velocidade de rotação provoca tensões mais elevadas.

De uma forma geral, os valores do desvio padrão são baixos, o que significa uma boa repetibilidade de resultados.

Independentemente da velocidade de avanço, velocidades de rotação superiores produzem resultados com desvio padrão mais reduzido.

3.2.2.2. Temperatura na Ferramenta

Com o recurso à câmara termográfica foi possível registar as temperaturas na broca imediatamente antes e após cada furação. Nas Figuras 15, 16 e 17 estão disponíveis 2 exemplos de imagens retiradas à entrada e à saída de cada furo, para cada um dos blocos. As restantes imagens termográficas são apresentadas nos Anexos G, H, I, J, L e M.

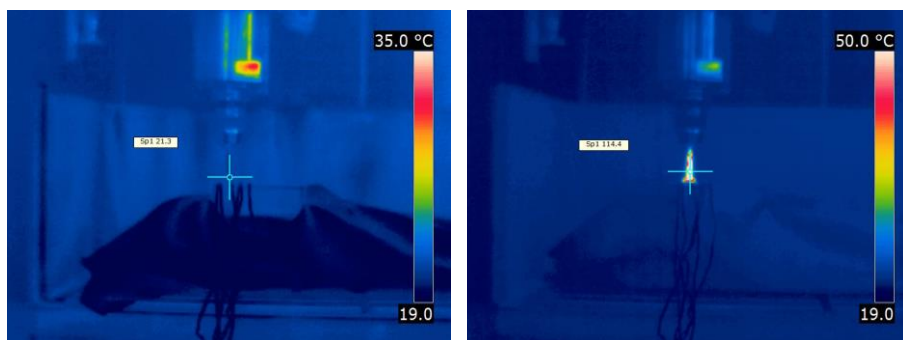


Figura 15. Imagens térmicas do bloco 1.

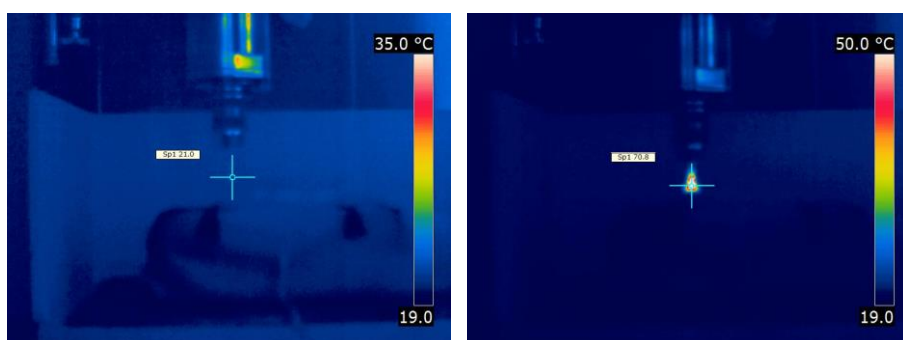


Figura 16. Imagens térmicas do bloco 2.

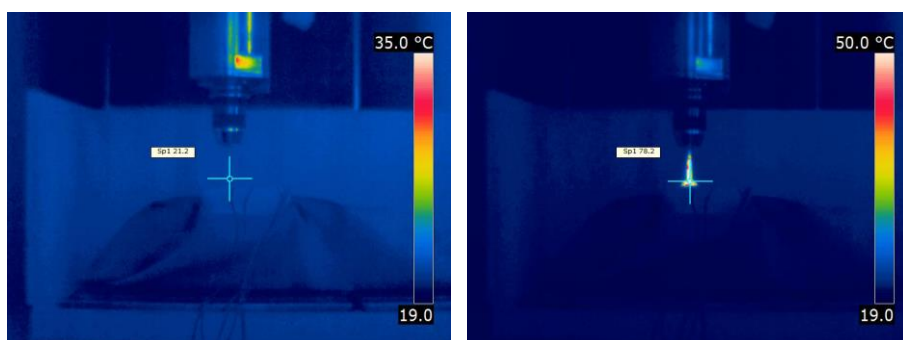


Figura 17. Imagens térmicas do bloco 3.

Na Tabela 6 apresentam-se todos os valores das temperaturas registadas na broca antes e após cada furação nos diferentes blocos.

Tabela 6. Temperatura na broca, °C.

| | | Bloco 1 (25 mm/min) | | Bloco 2 (50 mm/min) | | Bloco 3 (75 mm/min) | |
|--------|---------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|
| | | 600 RPM | 1200 RPM | 600 RPM | 1200 RPM | 600 RPM | 1200 RPM |
| F1/F7 | Entrada | 21,3 | 22,6 | 21 | 21,5 | 21,2 | 21,1 |
| | Saída | 114,4 | 145,8 | 70,8 | 88,5 | 78,2 | 80,1 |
| F2/F8 | Entrada | 22,2 | 21,1 | 21 | 21,4 | 21,1 | 21 |
| | Saída | 102,7 | 136,8 | 97,7 | 91,3 | 77,1 | 90,8 |
| F3/F9 | Entrada | 22,2 | 22,1 | 21,3 | 21,4 | 21 | 21,1 |
| | Saída | 114,2 | 150,3 | 81,1 | 95,1 | 66,7 | 89,3 |
| F4/F10 | Entrada | 21,9 | 22,1 | 21,4 | 21,3 | 21 | 21,1 |
| | Saída | 106,4 | 150,3 | 92 | 108,5 | 71,1 | 98,9 |
| F5/F11 | Entrada | 21,7 | 22,4 | 21,3 | 21,3 | 21 | 21,2 |
| | Saída | 110,9 | 138,3 | 84,3 | 106,7 | 62,4 | 87,5 |
| F6/F12 | Entrada | 22,4 | 21,9 | 21,3 | 22,3 | 20,9 | 21,1 |
| | Saída | 112,6 | 144,3 | 89,4 | 108,1 | 66,9 | 93,7 |

Para facilitar a análise dos resultados obtidos para a temperatura na ferramenta, são apresentados nas Figuras 18 e 19 os valores de pico da temperatura, organizados de acordo com a velocidade de rotação.

Analisando os resultados das Figuras 18 e 19 pode observar-se o efeito da velocidade de avanço e da rotação na variação de temperatura à saída de cada furo. A temperatura de saída varia de acordo com os parâmetros utilizados.

Para a velocidade de avanço constante, o aumento da velocidade de rotação provoca aumento de temperatura, verificando-se esta tendência para todas as situações em estudo. Com a variação da velocidade de avanço, verifica-se uma diminuição da temperatura à medida que esta aumenta.

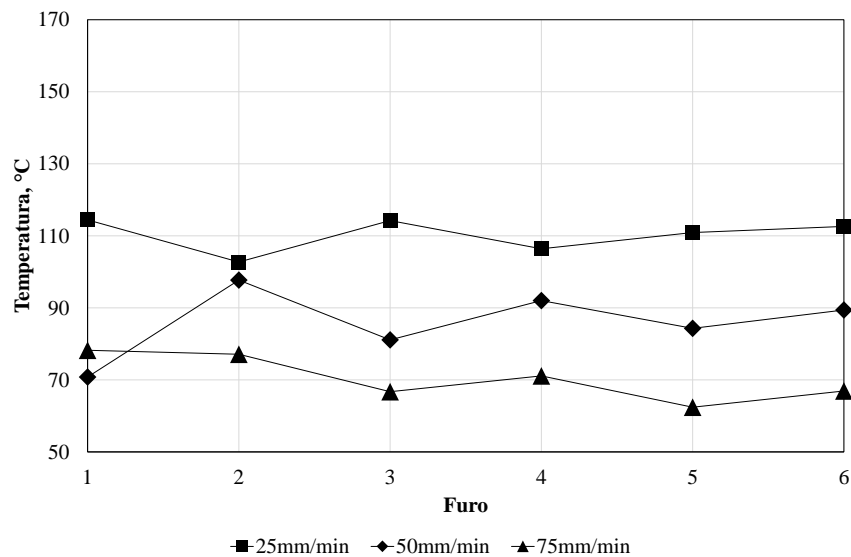


Figura 18. Temperaturas de pico, $V_R= 600$ RPM.

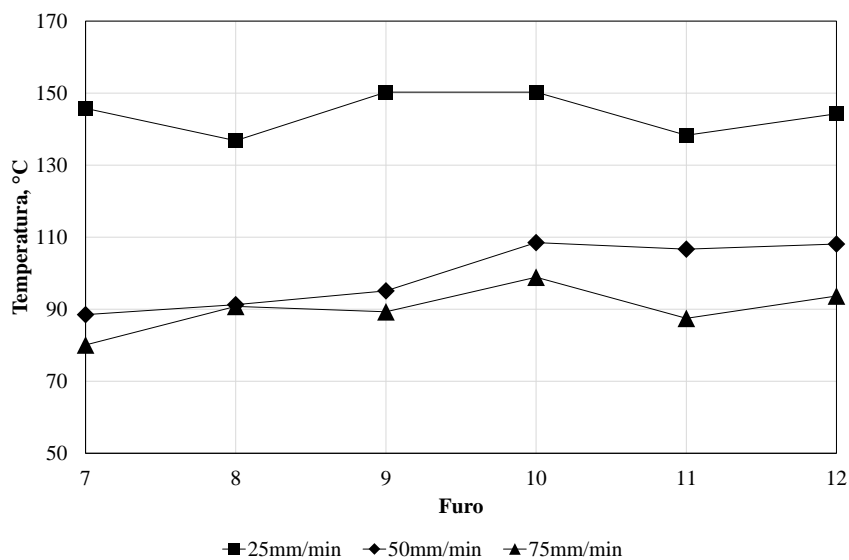


Figura 19. Temperaturas de pico, $V_R= 1200$ RPM.

3.3. Furação em Osso Bovino

3.3.1. Materiais e Métodos

Para completar a metodologia experimental, foram ainda realizados ensaios em 3 amostras de osso femoral bovino *ex-vivo*. A furação em osso bovino é apresentada como uma aplicação do trabalho apresentado, que poderá vir a ser utilizada em outros materiais.

Na Figura 20 são apresentadas as amostras de osso *ex-vivo* devidamente preparadas e congeladas até à data da furação.



Figura 20. Osso femoral bovino.

À semelhança dos blocos compósitos, as amostras de osso bovino foram instrumentadas com extensómetros lineares à superfície para permitir o cálculo das tensões normais nessa mesma direção. As operações de limpeza, marcação dos locais de furação e colagem de extensómetros foram idênticas às realizadas na furação envolvendo blocos compósitos. No total, foram utilizados 5 extensómetros.

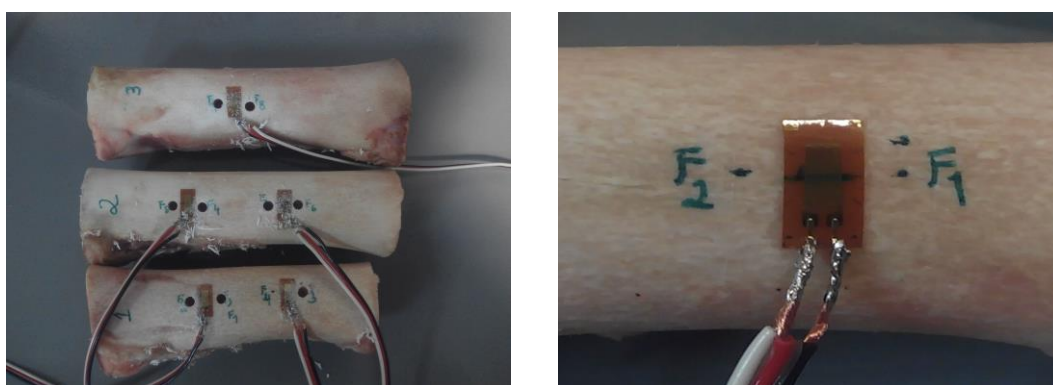


Figura 21. Disposição dos extensómetros.

Para o registo das deformações nas amostras de osso femoral bovino foram utilizados extensómetros (1-LY18-6/120, $120\Omega \pm 0.35\%$, HBM), colados na superfície do osso e ligados ao mesmo sistema de aquisição de dados (Vishay Micro Measurements P3 Strain Indicator Recorder) e a um computador. A furação dos ossos *ex-vivo* foi efetuada numa máquina de furação vertical, tendo sido utilizada uma broca de aço rápido sinteri-

zado com 4 mm de diâmetro, 75 mm de comprimento e ângulo de ponta 118°. Na Figura 22 está representado o *setup* experimental utilizado para a realização da aplicação.

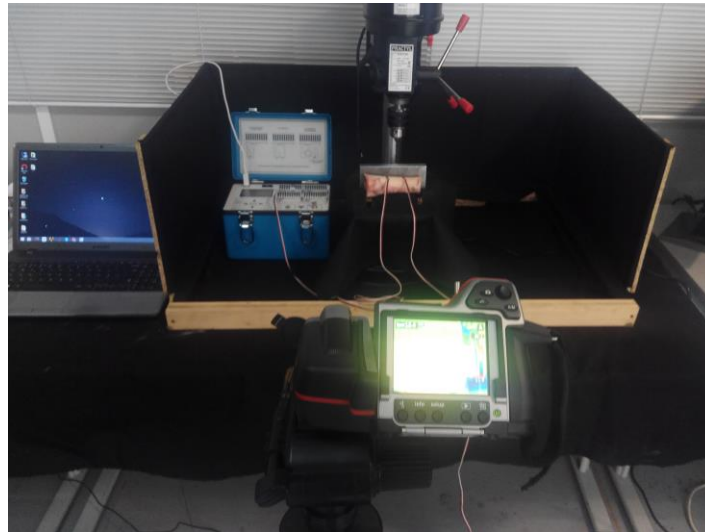


Figura 22. Setup experimental na furação de ossos ex-vivo.

Uma vez que se trata de uma máquina de furação manual, a velocidade de avanço imposta depende exclusivamente do operador, não existindo controlo desse parâmetro. Este equipamento permite a utilização de diferentes velocidades de rotação. Com a medição do tempo de furação e da espessura da diáfise cortical de cada amostra óssea perfurada, foi determinada uma velocidade de avanço média. Os parâmetros de furação estão sumarizados na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros de furação.

| | | | |
|-------------------------------------|-------------|-----|------|
| Velocidade de Rotação [RPM] | 520 | 900 | 1370 |
| Velocidade de Avanço (média) | 17,5 mm/min | | |
| Tempo de Furação (média) | 22s | | |
| Diâmetro da Broca | 4 mm | | |
| Profundidade (média) | 6,2 mm | | |
| Ângulo de Ponta | 118° | | |

As temperaturas na ferramenta de corte foram registadas, com recurso a uma câmara termográfica FLIR®T365, imediatamente antes e após a furação. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente da sala. As características da máquina e os parâmetros definidos para a recolha das imagens termográficas já foram referidos anteriormente.

3.3.2. Resultados Experimentais em Materiais *ex-vivo*

Os resultados obtidos neste modelo experimental podem ser agrupados em função das tensões normais no osso e da temperatura da ferramenta de corte.

3.3.2.1. Tensão Normal no Osso *ex-vivo*

Os valores máximos da tensão normal em função da velocidade de rotação são apresentados na Figura 23.

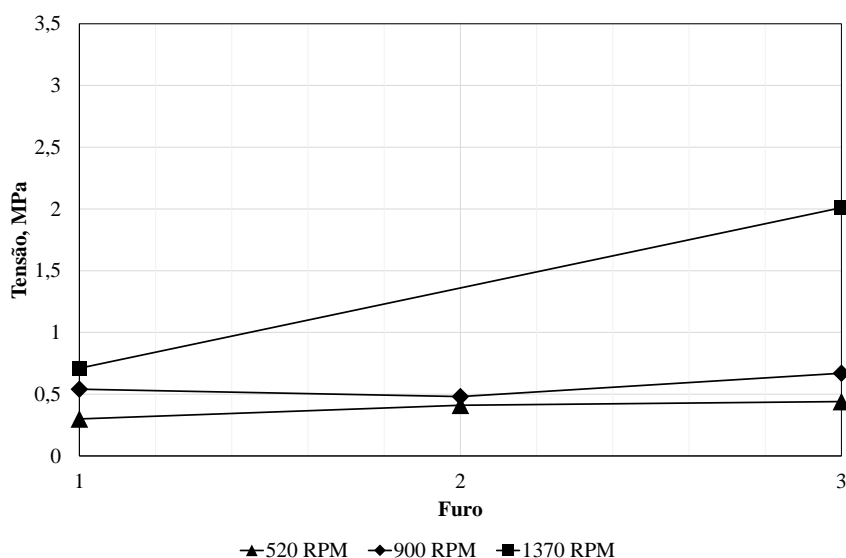


Figura 23. Valores máximos de tensão.

À semelhança dos resultados obtidos para furação em material compósito, é possível verificar, que para uma velocidade de avanço média constante, há aumento da tensão normal no osso com o aumento da velocidade de rotação. Na Tabela 8 representa-se a média das tensões normais no osso *ex-vivo* e o desvio padrão para cada caso em estudo.

Tabela 8. Valores médios do desvio padrão e da tensão normal.

| Velocidade de rotação [RPM] | 520 | 900 | 1370 |
|---------------------------------|------|------|------|
| Média das tensões normais [MPa] | 0,38 | 0,56 | 1,51 |
| Desvio Padrão | 0,06 | 0,08 | 0,8 |

Através da Tabela 8 verifica-se que para uma velocidade de avanço média constante, o aumento da velocidade de rotação provoca tensões mais elevadas. De uma forma geral,

os valores do desvio padrão são baixos, o que significa uma boa repetibilidade de resultados.

3.3.2.2. Temperatura na Ferramenta

Na Figura 24 são apresentados alguns exemplos de imagens termográficas de furação em osso femoral bovino obtidas para a análise da temperatura na ferramenta. As restantes imagens são apresentadas no Anexo N.

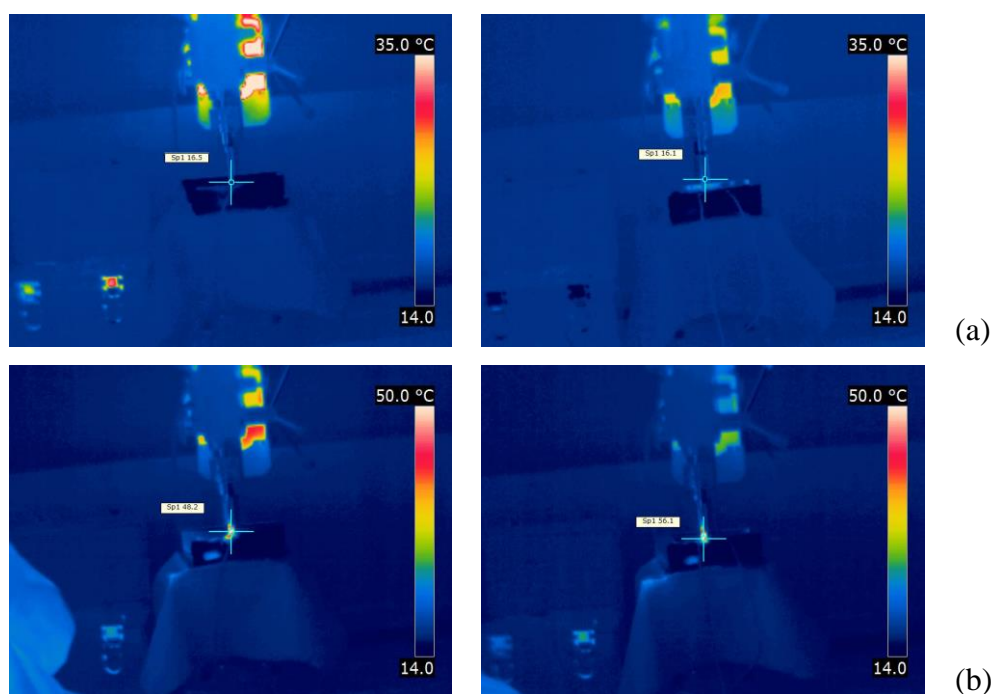


Figura 24. Imagens termográficas registadas (a) antes e (b) após a furação.

A temperatura registada imediatamente antes e após a furação de osso bovino é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9. Temperatura na ferramenta, °C.

| Furo | 520 RPM | | 900 RPM | | 1370 RPM | |
|------|---------|-------|---------|-------|----------|-------|
| | Entrada | Saída | Entrada | Saída | Entrada | Saída |
| 1 | 16 | 52,3 | 16,1 | 56,1 | 16,9 | 59 |
| 2 | 15,8 | 43,7 | 16,8 | 49,8 | 16,2 | 54,2 |
| 3 | 16,5 | 48,2 | 16,7 | 54 | 16,4 | 62,8 |

As temperaturas máximas registadas à saída do furo correspondem à furação com velocidade de rotação superior (1370 RPM) e, à semelhança dos resultados relativos à fura-

ção de blocos compósitos, verifica-se que o aumento da velocidade de rotação provoca aumento na temperatura do osso.

Para facilitar a análise dos resultados obtidos para a temperatura na ferramenta, são apresentados na Figura 25 os valores de pico da temperatura, organizados de acordo com a velocidade de rotação.

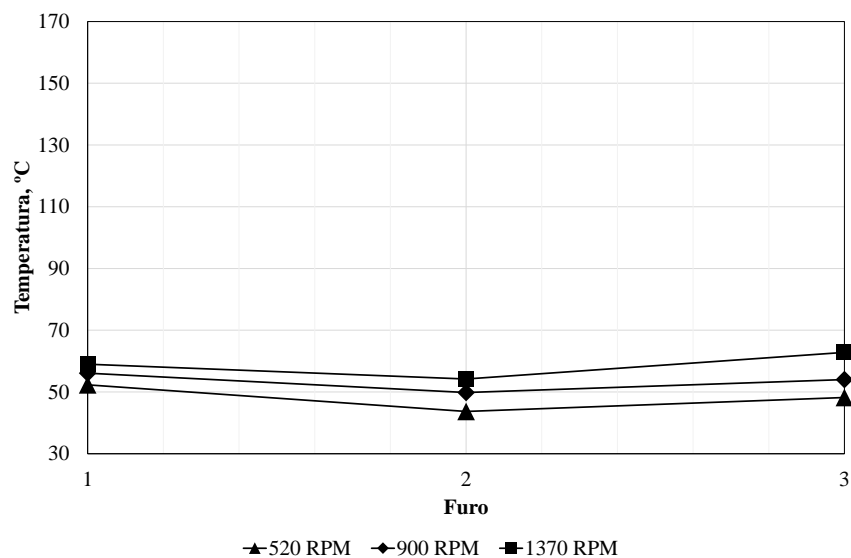


Figura 25. Temperatura na ferramenta registadas no final da furação.

Capítulo 4

Componente Numérica

4.1. Introdução

A furação óssea é um dos procedimentos mais utilizados em ortopedia, sendo que ao longo das últimas décadas foram realizados diversos estudos para compreender este processo complexo.

A previsão das variáveis do processo, como a força, a distribuição de tensões e a temperatura, desempenham um papel significativo na concepção de ferramentas e na otimização das condições de furação. Estas variáveis podem ser estudadas através de metodologias experimentais, que são dispendiosas e demoradas, especialmente quando são utilizadas muitas variáveis e implicam diversos equipamentos, por vezes indisponíveis. Devido a estas dificuldades, têm surgido novas abordagens, destacando-se a utilização de métodos de modelação numérica através do uso de elementos finitos (MEF).

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento de um modelo numérico, com base num programa de elementos finitos, o ANSYS®. Foi utilizado o algoritmo do LS-DYNA, por se tratar de um problema de análise estrutural complexo, em regime dinâmico, não-linear material, contato, grandes deformações e por envolver cálculo explícito contemplando durações de tempo pequenas. O modelo desenvolvido será calibrado e validado com os resultados obtidos experimentalmente. O modelo numérico permitirá obter os campos de tensão no material compósito em função do processo de furação utilizado. O modelo de simulação desenvolvido neste trabalho é mecânico, não tendo sido contemplado o efeito de cargas térmicas provocadas pela furação. As temperaturas que ocorrem no bloco não são consideradas críticas, conforme justificação efetuada na componente experimental deste trabalho. Sendo que as temperaturas registadas na broca permitiram ainda concluir que os tecidos ósseos não alcançam valores críticos de aquecimento, em concordância com a bibliografia [3] [13] [53] [54].

Finalmente, o modelo numérico desenvolvido pode facilmente ser ajustado com novas variáveis do processo de furação, permitindo assim prever o dano no tecido ósseo.

4.2. Método de Elementos Finitos

A necessidade de investigar e prever o comportamento em tecidos biológicos quando submetidos a solicitações mecânicas levou à utilização de metodologias computacionais, inicialmente desenvolvidas para outro tipo de problemas de análise em engenharia, em problemas da biomecânica. A utilização do MEF evoluiu desde a sua aplicação em problemas lineares estáticos, elasto-plásticos simples até à resolução de problemas que envolvam não-linearidades, em função de fenómenos como o encruamento material, velocidade de deformação, temperaturas, contato com atrito, estando apto na análise de soluções com origem em elevadas deformações plásticas. O MEF é uma poderosa ferramenta de simulação computacional indicada para diversos problemas de análise em engenharia e simulação de diversos fenómenos físicos. No MEF o sistema contínuo é definido pela divisão em pequenos elementos e descrição das suas propriedades através da resolução de sistemas de equações, cuja solução apresenta o comportamento da totalidade do sistema [58]. Os fenómenos dinâmicos são mais instáveis do que os estáticos, as propriedades dos materiais podem variar com a deformação, o material pode estar sujeito à fadiga, encruamento, degradação química ou térmica, fatores que afetam os resultados. O principal objetivo de uma análise através do MEF é modelar e simular o comportamento de uma determinada estrutura em função de um sistema de cargas. Desta forma, todos os fatores devem ser considerados para garantir a maior aproximação possível à situação real.

A modelação de processos de furação através do MEF apresenta uma grande complexidade, por se tratar de uma análise de uma solução de dinâmica explícita, não-linear, com contato material e remoção de material.

Numa análise dinâmica são formuladas as mesmas condições de equilíbrio, através da discretização em elementos finitos, e em simultâneo são utilizados algoritmos de integração implícitos ou explícitos para obtenção das variáveis do instante t e para o instante seguinte $t+\Delta t$ [59]. O método implícito é em regra indicado para simulações estáticas e o método explícito para simulações dinâmicas, conforme resumo efetuado na Tabela 10. No entanto, há áreas de estudo em que ambos os métodos podem ser utilizados,

classificados como quase estáticos, como por exemplo em simulações de processos de estampagem.

Tabela 10. Resumo das diferenças entre os métodos de integração temporal.

| Método Implícito | Método Explícito |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Indicado para problemas estáticos; • Permite grandes incrementos de tempo (Δt), mas pode haver restrições devido a problemas de convergência; • Médio/Elevado tempo de CPU por incremento; • Requer a inversão da matriz rigidez $[K]$. | <ul style="list-style-type: none"> • Eficiente para problemas dinâmicos altamente não lineares; • Incrementos de tempo (Δt) muito reduzidos; • Reduzido tempo de CPU por incremento; • Não requer montagem da matriz rigidez $[K]$. |

As diferentes áreas de estudo em que os métodos de integração temporal podem ser aplicados são apresentadas na Figura 26.

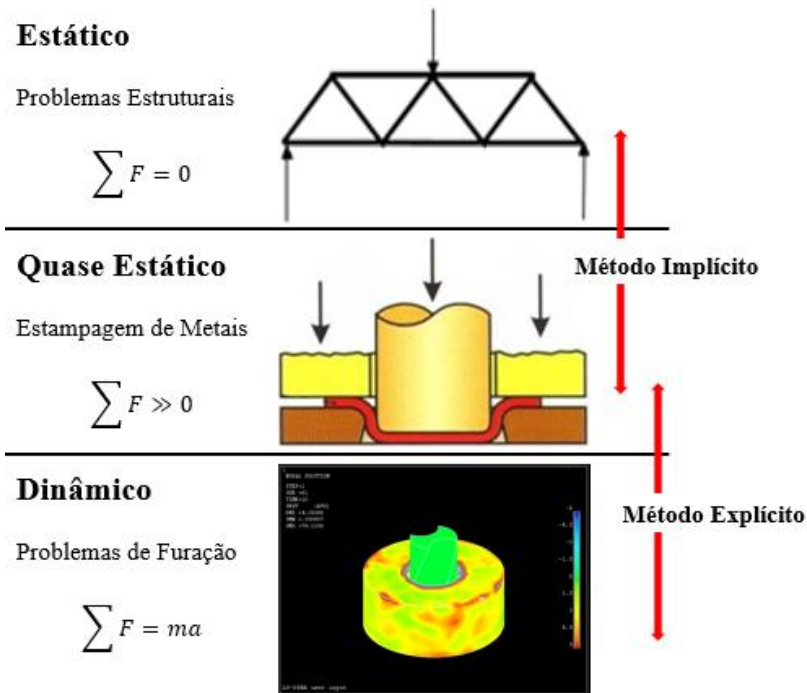


Figura 26. Aplicação dos métodos de integração temporal.

A ilustração das diferenças entre os métodos de integração está relacionada com o cálculo dos deslocamentos em cada nó da malha de elementos finitos. No método implícito, este cálculo é realizado pela inversão da matriz de rigidez $[K]$ e multiplicando pelas forças atuantes $\{F^a\}$, conforme apresentado na Equação 4. Para modelos totalmente lineares, sem contatos, plasticidade material ou grandes deformações, a equação é sem-

pre estável e podem ser utilizados Δt elevados em regime transiente [59]. Para modelos com não linearidades a matriz rigidez é não linear, sendo por esse motivo utilizados Δt mais pequenos para garantir a convergência da solução.

$$\{u_{t+\Delta t}\} = [K]^{-1}\{F_{t+\Delta t}^a\} \quad (4)$$

Nas simulações dinâmicas as acelerações estão presentes no modelo e necessitam de ser calculadas em cada instante de tempo. Assim no método explícito obtém-se o vetor da aceleração $\{\ddot{u}\}$ através da inversão da matriz de massa $[M]$ e multiplicando pela subtração das forças internas $[F^i]$ e externas $[F^e]$, conforme apresentado na Equação 5 [59].

$$\{\ddot{u}_t\} = [M]^{-1}([F_t^e] - [F_t^i]) \quad (5)$$

O resultado obtido para o vetor aceleração $\{\ddot{u}\}$ é utilizado para calcular as velocidades e deslocamentos dos nós no instante seguinte. A atualização dos vetores velocidade $\{\dot{u}\}$ e deslocamento $\{u\}$ é dada por:

$$\{\dot{u}_{t+\Delta t/2}\} = \{\dot{u}_{t-\Delta t/2}\} + \{\ddot{u}_t\}\Delta t_t \quad (6)$$

$$\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{\dot{u}_{t+\Delta t/2}\}\Delta t_{t+\Delta t/2} \quad (7)$$

Finalmente, com a adição do vetor deslocamento à posição atual do nó, é obtida a posição final do nó para o instante $t+\Delta t$, conforme a Equação 8:

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\} \quad (8)$$

onde:

$\{x\}$ – representa a posição final do nó;

$\{x_0\}$ – representa a posição inicial do nó;

$\{u\}$ – é o vetor de deslocamentos.

Na fase de pré-processamento são considerados todos os parâmetros envolvidos no processo: as propriedades dos materiais, as condições de fronteira, o tipo de elemento, os parâmetros de furação e a geometria do modelo (bloco e broca). Para este tipo de análise

foi utilizado o módulo LS-DYNA através do programa ANSYS®. LS-DYNA, desenvolvido pela *Livemore Software Technology Corporation*, é um módulo do programa ANSYS® para análises dinâmicas não-lineares de fenómenos físicos, com aplicação em diversas áreas. As vastas bibliotecas de materiais e elementos, bem como os algoritmos de contato permitem a modelação e a simulação de problemas físicos complexos [60].

Uma análise explícita através do MEF caracteriza-se como um procedimento incremental, que no final de cada incremento atualiza a matriz de rigidez com base nas alterações geométricas e materiais. Posteriormente, uma nova matriz de rigidez é construída e o próximo incremento da carga é aplicado ao sistema. A principal desvantagem deste método é que são necessários incrementos muito pequenos para se obterem resultados precisos e garantir a estabilidade da solução, aumentando o esforço computacional e consequentemente o tempo de simulação [61].

A aplicação de condições fronteira e carregamento no modelo em estudo, para uma análise dinâmica, impõe um conjunto de equações de equilíbrio cuja forma generalizada é dada por:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (9)$$

onde:

$[M]$ – é a matriz de massa;

$[C]$ – é a matriz amortecimento;

$[K]$ – é a matriz de rigidez;

$\{\ddot{u}\}$ – é o vetor de acelerações;

$\{\dot{u}\}$ – é o vetor de velocidades;

$\{u\}$ – é o vetor de deslocamentos;

$\{F^a\}$ – é o vetor de forças aplicadas.

No presente trabalho efetuou-se uma análise dinâmica explícita, utilizando-se o elemento SOLID164, representado na Figura 27. Este elemento finito é utilizado para modelação 3D de estruturas sólidas, sendo constituído por 8 nós com 9 graus de liberdade em cada nó: translação, velocidade e aceleração nas direções nodais x, y e z [62].

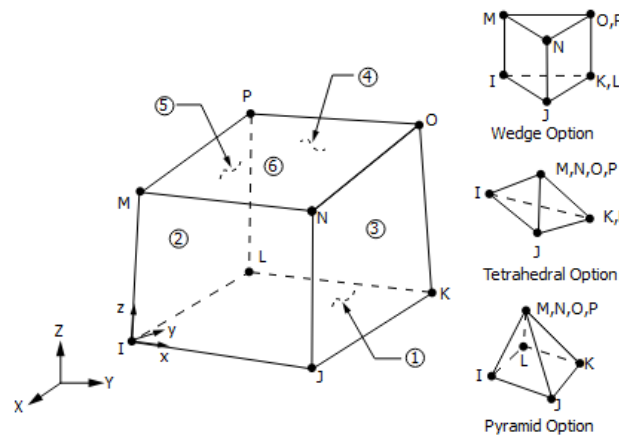


Figura 27. Elemento SOLID164 do ANSYS® [62].

4.3. Modelo Dinâmico de Furação

Para o estudo em causa desenvolveu-se um modelo numérico composto pela broca e bloco. Devido à complexidade da geometria, o modelo CAD da broca foi gerado no programa SolidWorks® (Versão 2015 Student Edition), com dimensões aproximadas a 4 mm de diâmetro e 75 mm de comprimento (Anexo O). O modelo CAD da broca está representado na Figura 28.



Figura 28. Modelo CAD da broca utilizada.

Por se tratar de uma análise dinâmica não-linear, existe um grande esforço computacional associado. Com vista a minimizar o tempo de simulação, o modelo CAD da broca foi reduzido para 7,57 mm de comprimento, conforme representado na Figura 29.

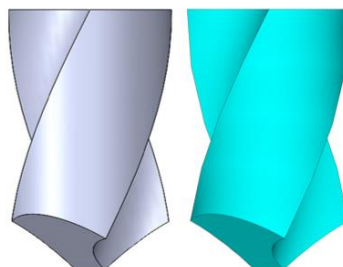


Figura 29. Modelo CAD reduzido da broca (esq.) e modelo em formato IGES (dir.).

O modelo foi posteriormente convertido para o formato *IGES (International Graphics Exchange Standard)* para importação no programa *ANSYS®*.

Ao contrário da broca, o bloco compósito apresenta uma geometria simples, tendo sido efetuada diretamente no programa *ANSYS®*. Numa primeira fase do trabalho foram efetuadas diferentes geometrias do bloco, conforme apresentado na Figura 30. No decurso das simulações computacionais, e com vários testes de convergência de soluções, o modelo do bloco utilizado é cilíndrico e mais reduzido, representativo de uma furação.

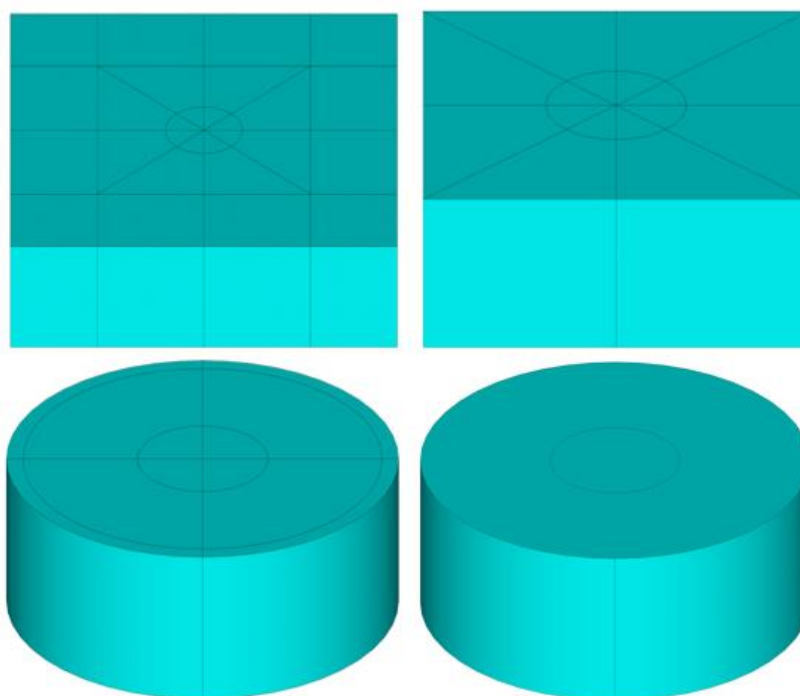


Figura 30. Diferentes modelos do bloco compósito.

A fase seguinte passa pela definição das propriedades dos materiais e a malha de elementos finitos. A precisão dos resultados de uma análise depende substancialmente do refinamento da malha. Foram efetuados diferentes testes numéricos e utilizadas diferentes malhas de elementos finitos, de forma a obter a melhor discretização do modelo. Inicialmente foi considerado um tamanho de elemento de 0.5 mm para a broca e zona do furo, e 1 mm para o restante bloco, Figura 31.

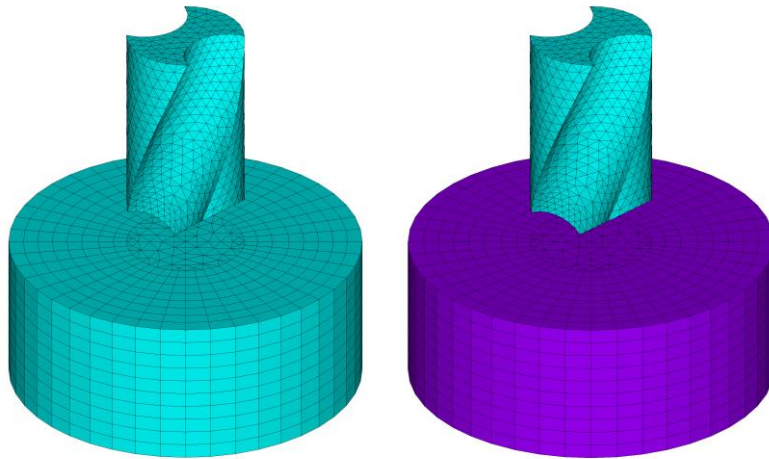


Figura 31. Malha de elementos finitos de tamanho variável.

Posteriormente, e para a calibração do modelo numérico adotou-se um tamanho de elemento igual em toda a malha (0.5 mm). Este modelo permitirá a comparação com os resultados experimentais. A Figura 32 representa a malha de elementos finitos adotada, eliminando assim os possíveis problemas de descontinuidade relativamente a anteriores malhas.

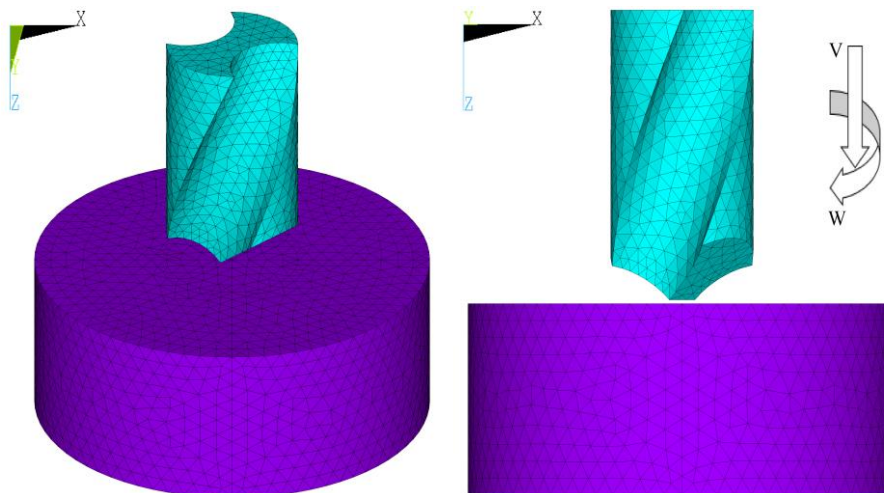


Figura 32. Malha de elementos finitos uniforme em todo o modelo.

Após a criação da malha, é necessário definir o contacto entre as superfícies e as condições de fronteira do modelo (forças, velocidades e deslocamentos).

4.3.1. Modelação do Comportamento Material

A necessidade de prever o comportamento mecânico do tecido ósseo quando submetido a operações de maquinagem, tem levado à utilização de materiais compósitos, dada a dificuldade na conservação de espécimes de osso humano. Os materiais compósitos são utilizados em diversas aplicações e a investigação tem sido realizada para a compreensão do comportamento mecânico e suas propriedades.

O sucesso de uma análise de elementos finitos também depende da escolha das propriedades e do modelo material corretos. Alguns modelos requerem pouca informação enquanto outros necessitam de informação detalhada acerca das propriedades materiais. Modelos materiais simples nem sempre resultam em soluções simples. No entanto, até os modelos mais complexos são aproximações à realidade, não representando inteiramente o comportamento real do material.

No presente trabalho o comportamento do material compósito foi considerado elástico-plástico dependente da taxa de deformação e do critério de cedência do material. Foi utilizado o modelo de Cowper – Symonds (Equação 10) em que para uma análise linear isotrópica ($\beta=1$), cinemática ($\beta=0$), ou mista ($0<\beta<1$), considerando-se o endurecimento por deformação plástica e o efeito da velocidade de deformação plástica. Para o cálculo da tensão de cedência, no modelo de Cowper – Symonds com comportamento material cinemático plástico [20], a relação de potência é a seguinte:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (10)$$

onde:

σ_y – tensão de cedência, MPa;

β – parâmetro de endurecimento por deformação plástica;

σ_0 – tensão de cedência inicial, MPa;

$\dot{\epsilon}$ – a intensidade da velocidade de deformação plástica, s^{-1} ;

C – parâmetro do material definindo o efeito da intensidade da velocidade de deformação plástica, s^{-1} ;

$1/P$ – constante do material definindo a sensibilidade da velocidade de deformação plástica;

ε_p^{eff} – intensidade da deformação plástica;

E_p – parâmetro do material dependente do módulo de endurecimento de deformação plástica, designado por módulo tangente E_{tan} , e do módulo de Young E , obtido conforme a Equação 11:

$$E_p = \frac{E_{tan}E}{E - E_{tan}} \quad (11)$$

As propriedades mecânicas do material compósito e da broca consideradas nesta análise são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Propriedades mecânicas utilizadas na análise numérica [20].

| Propriedades | Broca | Material Compósito |
|--|--------|--------------------|
| Massa volúmica [kg/m ³] | 7850 | 800 |
| Módulo de Young [MPa] | 200000 | 987.1567 |
| Coefficiente de Poisson | 0.3 | 0.3 |
| Tensão de cedência inicial [MPa] | | 22.59 |
| Módulo tangente [MPa] | | 0.91 |
| Parametro de endurecimento | | 0.1 |
| Parâmetro do material (C) | | 2.5 |
| Constante do material (P) | | 7 |
| Critério de erosão, falha por deformação (ε_{lim}^{eff}) | | 0.0504 |

4.3.2. Contacto e Remoção do Material

A interação entre partes numa simulação dinâmica explícita é modelada através de um algoritmo de contacto que leva em consideração diversas interações complexas entre materiais. A escolha do algoritmo de contacto depende do processo que se pretende simular de forma a obter uma solução estável e precisa.

A interação entre broca e bloco foi modelada através do algoritmo de contacto *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE, disponível no módulo LS-DYNA do programa ANSYS®. Este algoritmo é utilizado quando a superfície de um corpo contata a superfície de outro corpo e há existência de dano nas superfícies durante o contato, permitindo aos elementos internos permanecerem remanescentes. O contato entre superfícies pode ser considerado sem atrito para pequenos deslocamentos entre os corpos, ou com atrito em condições de grandes deformações inelásticas. Neste caso, no problema em estudo, há valores de deformações plásticas, sendo o atrito entre a broca e

o bloco assumido como regido pela Lei de Coulomb com o valor do coeficiente de atrito, de acordo com a literatura, igual a 0,3. Em função das propriedades mecânicas dos dois corpos em contato, é aceitável considerar a hipótese simplificativa de que esse contato ocorre entre o corpo deformável e o corpo rígido, sendo assim necessário só avaliar o equilíbrio do corpo deformável.

A opção de erosão é a escolha que mais se adequa quando existe eliminação de elementos [63]. As superfícies da broca e bloco foram definidas como superfície de contacto e superfície alvo, respetivamente. A remoção do material no processo de furação ocorre pela erosão de elementos, durante a deformação plástica quando este atinge o seu limite através de um critério pré-definido. Quando um elemento é removido do processo de cálculo, a sua massa é distribuída pelos nós adjacentes de outros elementos. No entanto, a erosão causa perda de energia interna, resistência e possivelmente massa, pelo que os limites de erosão devem ser estabelecidos de forma a que os elementos não sejam eliminados se não atingirem o máximo de deformação estabelecido, para não afetarem os resultados da solução [64]. Há diferentes critérios de erosão definidos na literatura, sendo classificados de acordo com o tipo de variável utilizada no controlo da erosão [64], baseados: na deformação, na tensão, no dano, na falha, ou no intervalo de tempo. No presente estudo foi utilizado o critério de erosão por falha de deformação, sendo que a erosão se inicia quando o limite de deformação geométrico instantâneo é alcançado, conforme a Equação 12:

$$\frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) + 5(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_3\varepsilon_1 + \varepsilon_3\varepsilon_2) - 3(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{13}^2)} \gg \varepsilon_{lim}^{eff} \quad (12)$$

onde:

ε_{lim}^{eff} - critério limite por deformação;

$\varepsilon_i - \varepsilon_{ij}$ componentes de deformação ($i, j = 1, 2, 3$).

4.4. Análise de Tensões

Neste subcapítulo são apresentados os resultados relativos à componente numérica. Devido ao elevado esforço computacional associado a este tipo de simulação, surgiu a necessidade de reduzir a espessura do bloco e conseqüentemente a profundidade de furação. O modelo geométrico cilíndrico do bloco possui 5 mm de espessura e $\varnothing 12$ mm. Esta redução implica uma diminuição na tensão de pico do modelo numérico quando comparado com o modelo experimental. Os resultados obtidos para o modelo numérico são apresentados em forma de tabela para diferentes instantes de furação, de acordo com a velocidade de avanço e velocidade de rotação. Na Tabela 12 são apresentados os valores da média das componentes de tensão normal, em direções idênticas à leitura realizada pelos extensômetros na superfície do bloco, para diferentes instantes de furação.

Tabela 12. Resultados da tensão normal para tempo de furação, MPa.

| Velocidade de Avanço | Velocidade de Rotação | Tempo de Furação | | |
|----------------------|-----------------------|------------------|-------|-------|
| | | 2 s | 3 s | 4 s |
| 25 mm/min | 600 RPM | 0,213 | 0,241 | 0,249 |
| | 1200 RPM | 0,246 | 0,288 | 0,333 |
| 50 mm/min | 600 RPM | 0,250 | 0,321 | 0,384 |
| | 1200 RPM | 0,324 | 0,423 | 0,478 |
| 75 mm/min | 600 RPM | 0,371 | 0,440 | 0,502 |
| | 1200 RPM | 0,405 | 0,448 | 0,515 |

Analisando a Tabela 12, verifica-se o aumento da tensão normal com o aumento da velocidade de avanço, para o mesmo instante de tempo. É também possível verificar o comportamento da tensão normal ao longo do tempo de furação. À semelhança dos resultados experimentais, verifica-se o aumento da tensão normal com o tempo de furação e conseqüentemente profundidade do furo. Verifica-se o aumento da tensão normal com a utilização da velocidade de rotação superior (1200 RPM). Estes resultados sugerem, mais uma vez, concordância entre os modelos numérico e experimental.

Na Figura 33 é apresentada a distribuição da tensão equivalente de von Mises em diferentes instantes de furação e velocidades de avanço, e velocidade de rotação 600 RPM.

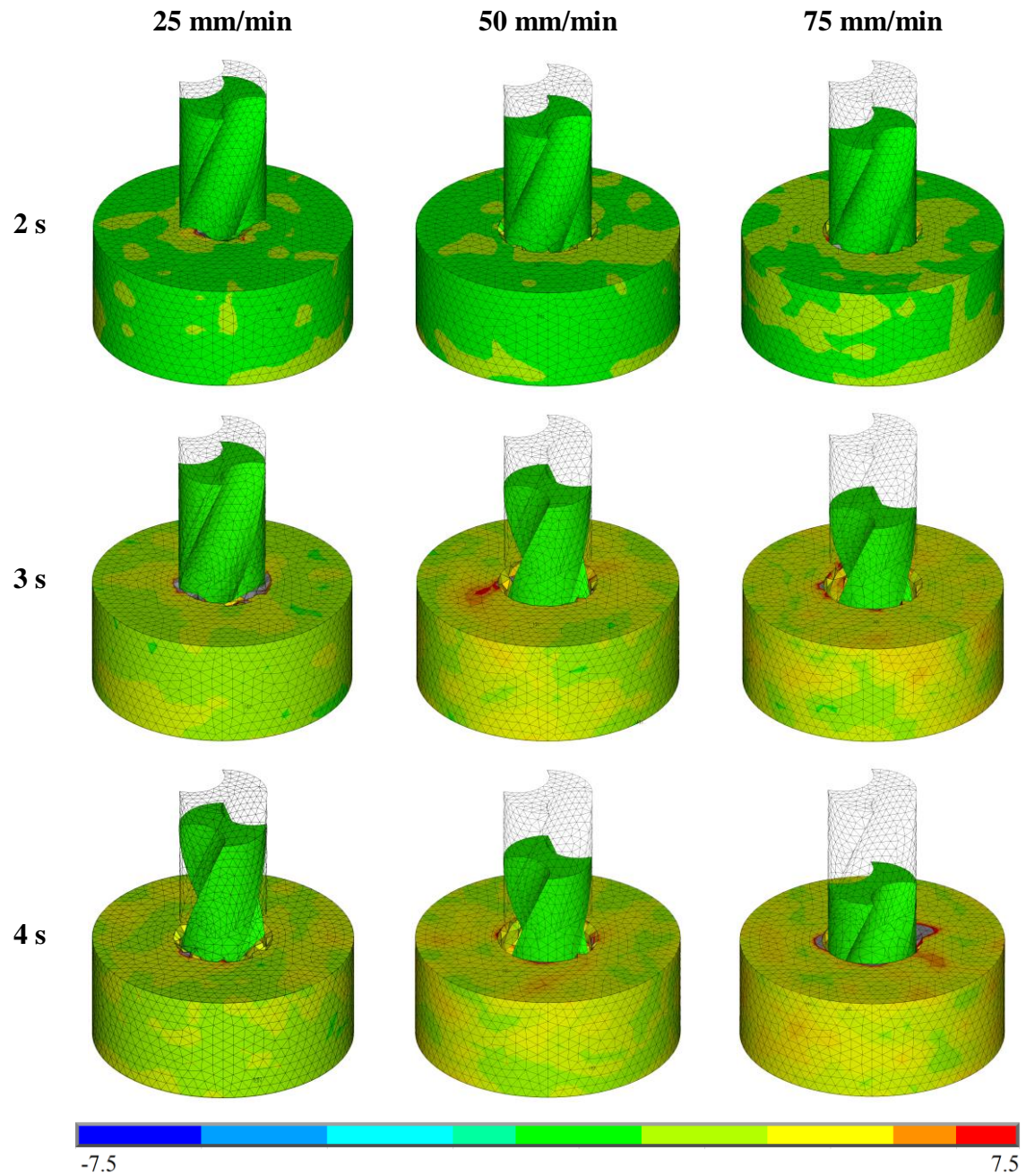


Figura 33. Distribuição da tensão equivalente de von Mises para 600 RPM, MPa.

Na Figura 34 é apresentada a distribuição da tensão equivalente de von Mises para diferentes instantes de furação e velocidades de avanço, e velocidade de rotação 1200 RPM.

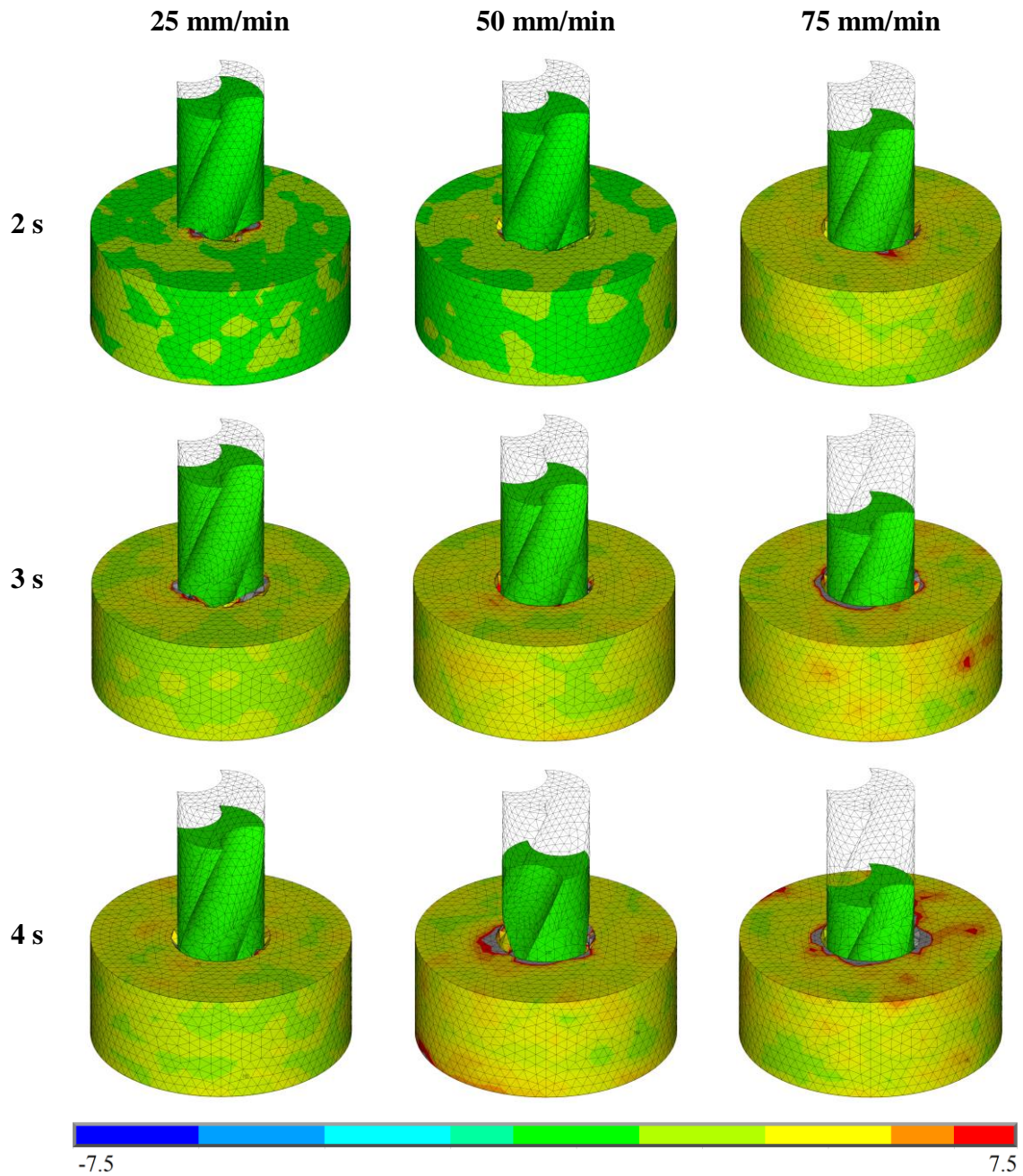


Figura 34. Distribuição da tensão equivalente de von Mises para 1200 RPM, MPa.

Capítulo 5

Comparação de Resultados

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas e estabelecidas comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e numericamente. De forma a estabelecer uma comparação de situações idênticas entre o modelo numérico e experimental, os resultados são comparados em função dos instantes de furação e da velocidade de avanço.

5.2. Análise de Tensões

5.2.1. Tensão Normal em Função do Tempo de Furação

Nas Figuras 35 e 36 são apresentados os resultados experimentais e numéricos para velocidade de rotação de 600 RPM, respetivamente.

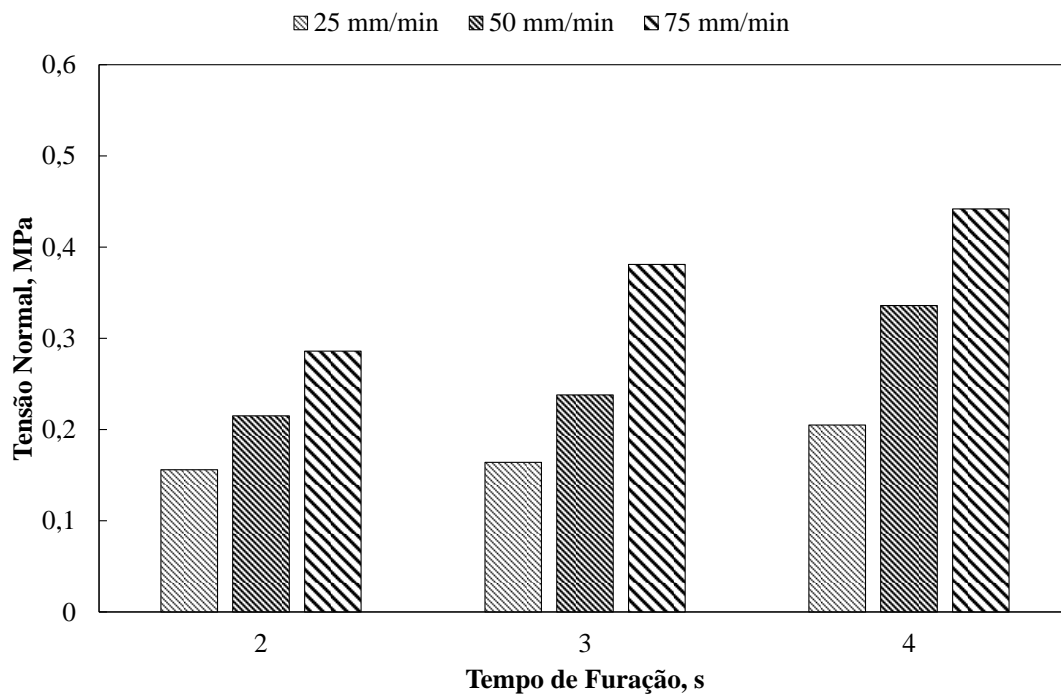


Figura 35. Resultados experimentais da tensão normal em função do tempo de furação para 600 RPM.

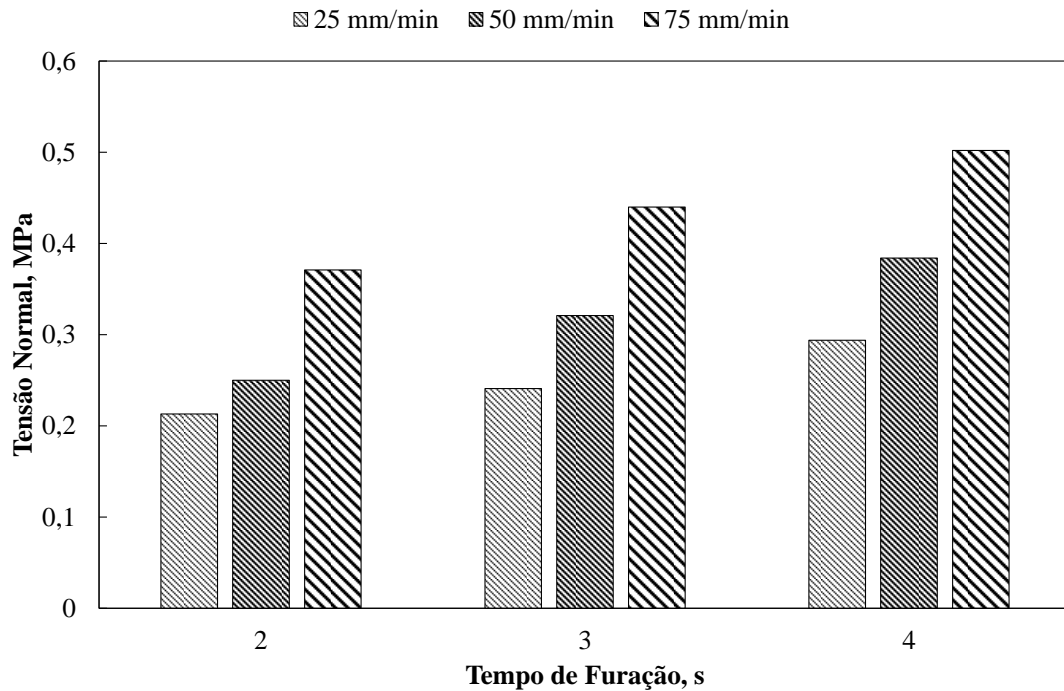


Figura 36. Resultados numéricos da tensão normal em função do tempo de furação para 600 RPM.

Pela análise dos resultados verifica-se que existe um aumento da tensão normal com o aumento do tempo de furação. Para o mesmo tempo de furação, o aumento na velocidade de avanço provoca aumento da tensão normal. Este aumento é mais evidente para a velocidade de avanço de 75 mm/min. Para o mesmo tempo de furação, a profundidade do furo é tanto maior quanto maior a velocidade de avanço, o que justifica a tendência de aumento da tensão normal com o aumento da velocidade de avanço. Em termos médios, os valores da tensão normal obtidos na componente numérica são superiores aos resultados obtidos na componente experimental, no entanto existe uma grande proximidade entre os resultados o que sugere uma boa modelação do processo de furação.

Nas Figuras 37 e 38 são apresentados os resultados experimentais e numéricos para a velocidade de rotação de 1200 RPM, respetivamente.

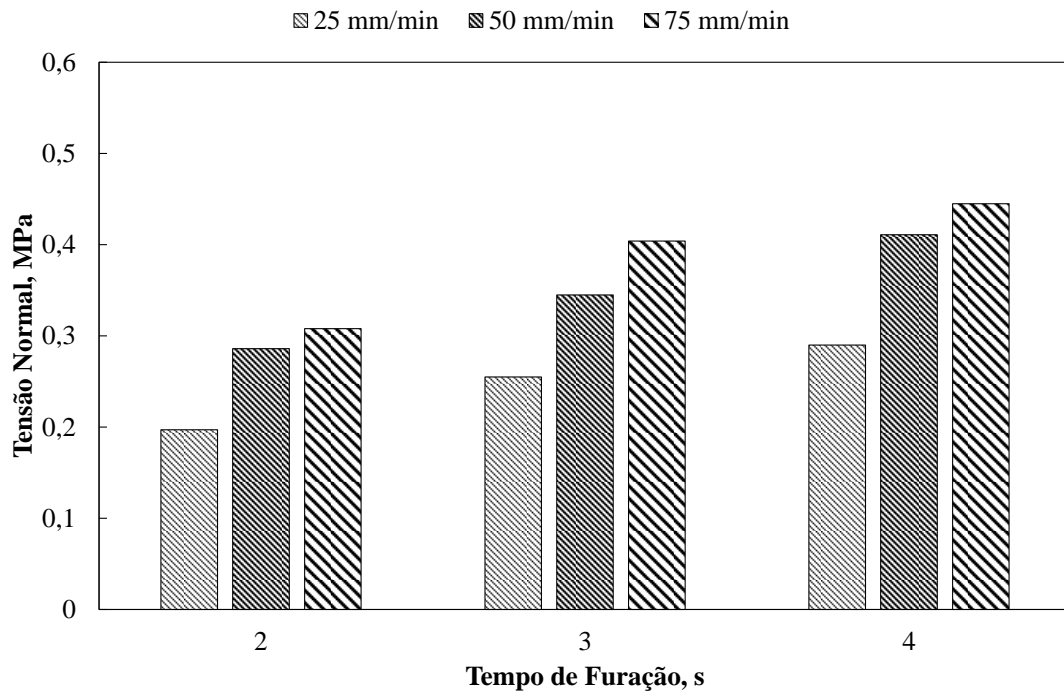


Figura 37. Resultados experimentais da tensão normal em função do tempo de furação para 1200 RPM.

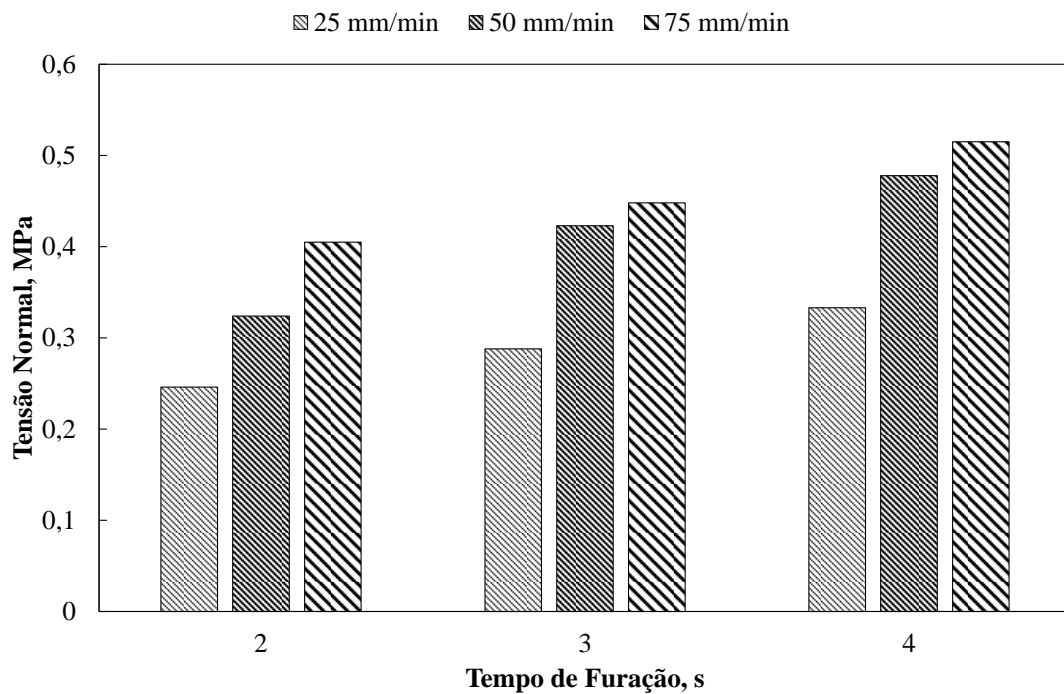


Figura 38. Resultados numéricos da tensão normal em função do tempo de furação para 1200 RPM.

Os resultados experimentais sugerem, que em processos de furação, a tensão normal média aumenta com o aumento da velocidade de avanço, para o mesmo instante de fu-

ração. Esta tendência verifica-se em todas as situações e é mais evidente para as maiores velocidades de avanço. Para o mesmo instante de furação, velocidades de avanço superiores implicam uma maior profundidade de furação e conseqüentemente maiores níveis de tensão.

As tensões normais obtidas numericamente são, de forma geral, superiores quando comparados com as tensões experimentais, no entanto existe boa concordância entre os valores. À semelhança dos resultados anteriores (para velocidade de rotação igual a 600 RPM), verifica-se uma tendência de aumento da tensão normal com o aumento do tempo de furação e da velocidade de avanço.

5.2.2. Tensão Normal em Função da Velocidade de Avanço

A tensão normal aumenta com a penetração da broca no bloco, logo o pico de tensão é atingido quando o bloco é totalmente furado. A partir deste ponto ocorre diminuição do nível de tensões. Assim, o estudo da tensão normal gerada no final do processo de furação revela-se especialmente importante. Apesar da profundidade de furação na componente experimental ser igual a 30 mm, foi considerada unicamente uma profundidade de 5 mm devido à profundidade de furação no modelo numérico. Por esse motivo, são comparadas as diferentes velocidades de avanço e rotação para uma profundidade total de 5 mm. Os resultados da tensão normal de pico obtidos para a profundidade total de furação, em função da velocidade de avanço, são apresentados nas Figuras 39 e 40.

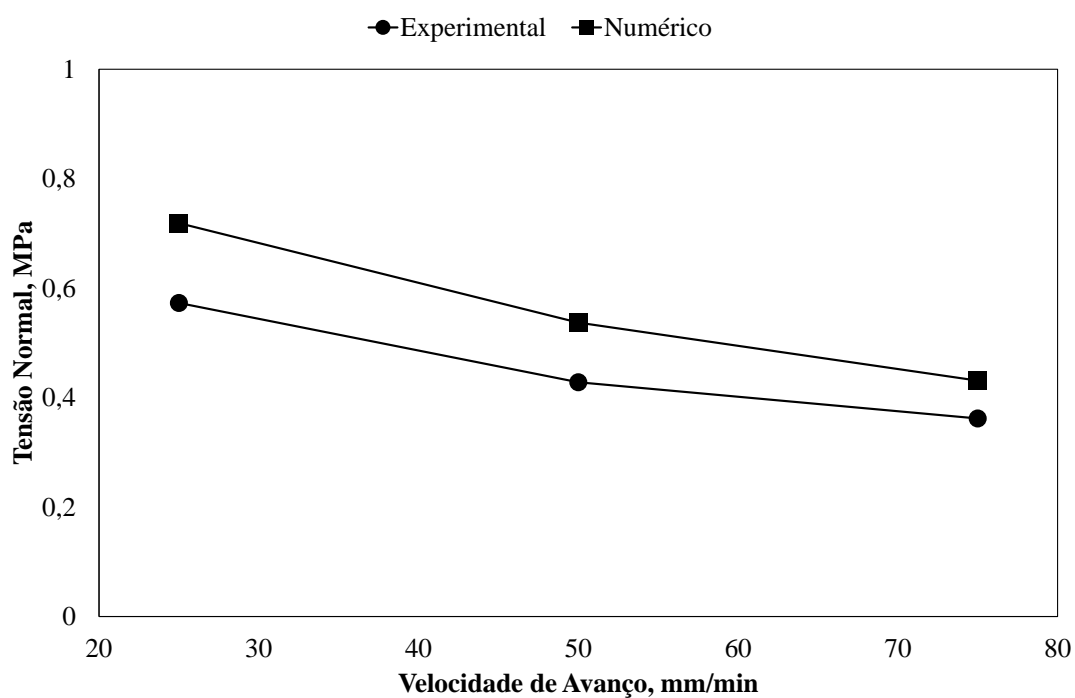


Figura 39. Tensão normal de pico para a profundidade total de furação a 600 RPM.

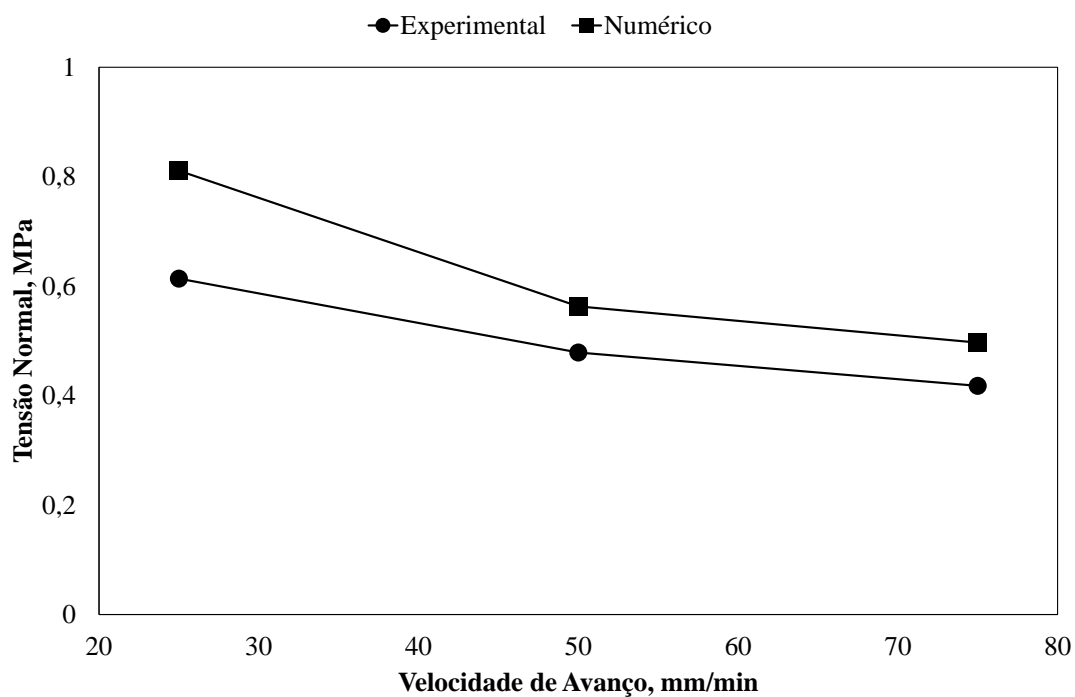


Figura 40. Tensão normal de pico para a profundidade total de furação a 1200 RPM.

Analisando os resultados para a furação completa do bloco, observa-se uma diminuição da tensão normal com o aumento da velocidade de avanço. Nos instantes iniciais da

furação, a tensão normal é superior para velocidades de avanço maiores (75 mm/min), no entanto, quando considerada a furação total do bloco, verifica-se a diminuição da tensão normal com o aumento da velocidade de avanço. O aumento da tensão normal para baixas velocidades de avanço (25 mm/min) deve-se ao tempo de furação, que é substancialmente superior quando comparado com as restantes velocidades de avanço. Verifica-se assim, o aumento da tensão normal com o aumento da velocidade de rotação. Observa-se em geral que os resultados numéricos assumem valores de tensão superiores quando comparados com os resultados experimentais. No entanto, seguem a mesma tendência de evolução dos resultados experimentais. Esta diferença entre as duas componentes representa, em média, cerca de 0,12 MPa.

A distribuição da tensão equivalente de von Mises para a furação total do bloco em função das diferentes velocidades de avanço e velocidades de rotação no processo de furação é apresentada na Figura 41.

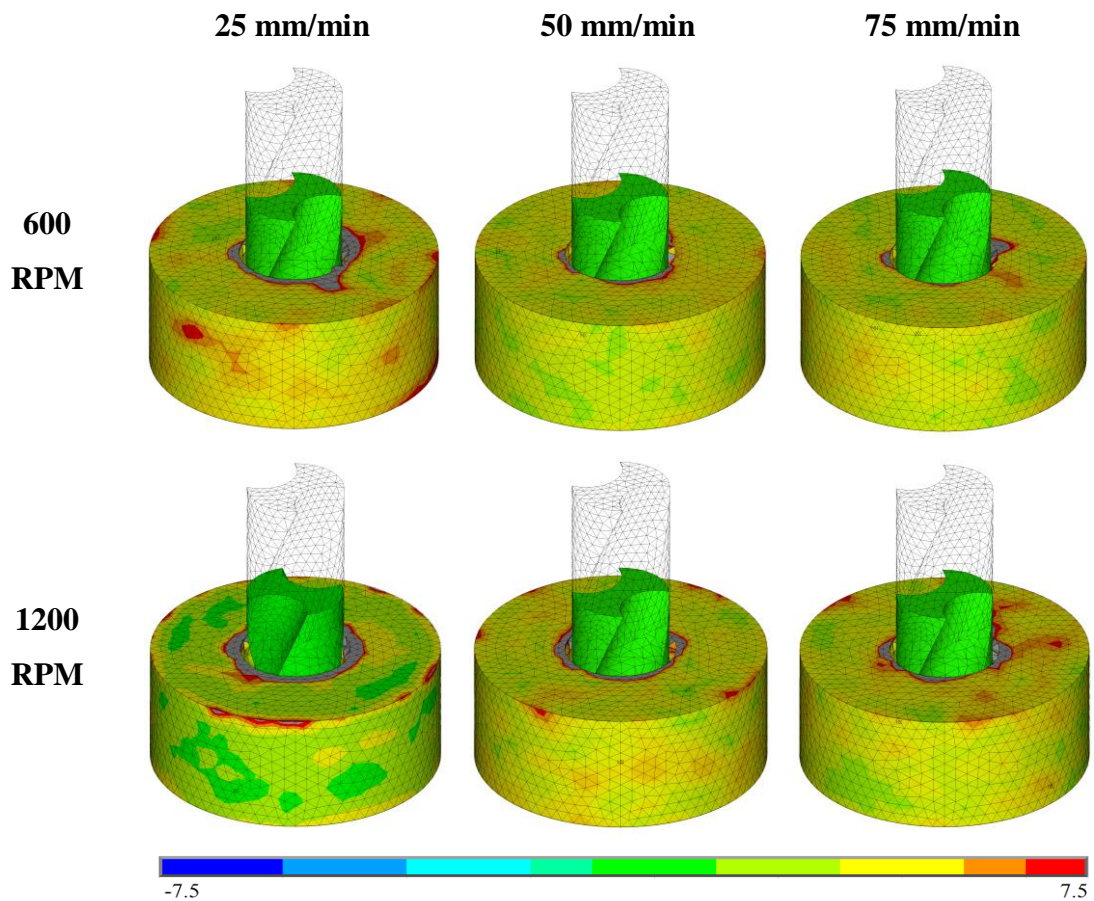


Figura 41. Distribuição da tensão equivalente de von Mises para a furação total do bloco, MPa.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

A furação óssea é parte essencial de diversos procedimentos cirúrgicos ortopédicos. A análise e o controlo dos parâmetros envolvidos são fundamentais para a redução do dano e facilitar a regeneração do tecido ósseo.

O presente trabalho teve como objetivo a avaliação das tensões geradas em processos de furação num material compósito, com características similares ao osso cortical humano, quando submetidos à variação dos diferentes parâmetros de furação. A mesma avaliação experimental foi ainda efetuada em ossos *ex-vivo* de bovino.

Para o efeito, recorrendo a metodologias experimentais e numéricas, foram investigados os efeitos da velocidade de avanço e da velocidade de rotação na análise do campo de tensões de origem mecânica.

No total foram realizados 36 ensaios experimentais em material compósito e 9 ensaios em material *ex-vivo* com recurso à extensometria. Durante o procedimento experimental de furação foram ainda registadas as temperaturas na broca, com recurso a imagens termográficas, imediatamente antes e após cada furação.

Foram efetuadas diferentes simulações numéricas para a calibração do modelo de análise, sendo que neste relatório foram apresentadas as 6 simulações numéricas finais com recurso ao programa ANSYS®.

Com base na componente experimental, conclui-se acerca do efeito dos diferentes parâmetros na obtenção do campo de tensões no material compósito. As tensões registadas são superiores para a menor velocidade de avanço (25 mm/min) e inferiores para velocidades de avanço maiores (50 mm/min e 75 mm/min), o que permite concluir que o aumento na velocidade de avanço provoca diminuição do campo de tensões no material. Por outro lado, o aumento na velocidade de rotação provoca aumento no campo de tensões, registando-se tensões mais elevadas com a utilização de uma velocidade de rotação igual a 1200 RPM. A tensão aumenta com a profundidade do furo, ou seja, o campo de tensão atinge o seu pico no final da furação.

As temperaturas registadas na broca variam consoante os parâmetros de furação. Para a velocidade de avanço constante, o aumento da velocidade de rotação provoca aumento

de temperatura. Ocorre diminuição da temperatura à medida que a velocidade de avanço aumenta.

Analisando os resultados relativos à aplicação da furação em osso bovino, verifica-se a mesma tendência de desenvolvimento do campo de tensões e de temperaturas. Uma vez que os parâmetros de furação são diferentes não é possível estabelecer comparação entre os resultados, no entanto, para velocidade de avanço constante (17,5 mm/min), verifica-se aumento da tensão e de temperatura com o aumento da velocidade de rotação.

A modelação numérica de processos de furação permite a avaliação dos diferentes parâmetros envolvidos e a previsão dos esforços gerados no material sem a utilização de tecidos biológicos, e conseqüentemente, sem prejuízo para a saúde e bem-estar do paciente.

A componente numérica teve como principal objetivo a comparação com os resultados obtidos experimentalmente. Através desta componente verificou-se a mesma tendência de desenvolvimento do campo de tensões. Verificou-se um ligeiro aumento do valor da tensão normal para todas as combinações de parâmetros de furação. No entanto, e tendo em conta a complexidade na definição das propriedades dos materiais e da simulação dinâmica explícita aplicada a processos de furação, os resultados numéricos apresentam uma boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente.

6.2. Trabalhos Futuros

Com base no presente trabalho, cujo principal objetivo é avaliar as tensões desenvolvidas em materiais compósitos, com propriedades similares ao tecido ósseo cadavérico, submetidos a furações, propõem-se como trabalhos futuros:

- Variar a geometria da ferramenta de corte e aumentar o número de combinações de parâmetros de furação;
- Utilizar tecidos biológicos, nomeadamente osso cortical humano em metodologias experimentais de furação óssea;
- Utilizar outros modelos materiais no processo de análise dinâmica explícita;
- Estudo térmico e mecânico no processo de análise dinâmica explícita.

- Estudo da influência do valor do critério limite por deformação na análise do dano.

Referências Bibliográficas

- [1] C. Sampaio, “Avaliação térmica provocada pela furação no tecido ósseo,” Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança, 2014.
- [2] M. G. Fernandes, R. Natal e E. Fonseca, “Analysis of stresses in drilled composite materials,” em *IEEE 4th Portuguese Meeting on Bioengineering*, Porto, 2015.
- [3] J. Silva, “Avaliação da temperatura no osso cortical sob processos de furação com e sem irrigação,” Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança, 2015.
- [4] J.-Y. Rho, L. Kuhn-Spearing e P. Zioupos, “Mechanical properties and the hierarchical structure of bone,” *Medical Engineering & Physics*, vol. 20, pp. 92-94, 1998.
- [5] S. K. Boyd e B. M. Nigg, “Biological Material,” em *Biomechanics of the Musculoskeletal System*, West Sussex, England, John Wiley & Sons, 2007, pp. 71-77.
- [6] J. H. Cole e M. C. H. van der Meulen, “Whole Bone Mechanics and Bone Quality,” *Clinical Orthopaedics & Related Research*, pp. 2139-2149, 2011.
- [7] D. T. Reilly e A. H. Burstein, “The Elastic and Ultimate Properties of Compact Bone Tissue,” *Journal of Biomechanics*, pp. 393-405, 1975.
- [8] J. D. Currey, K. Brear e P. Zioupos, “The Effects of Ageing and Changes in Mineral Content in Degrading the Toughness of human Femora,” *Journal of Biomechanics*, vol. 29, nº 2, pp. 257-260, 1996.
- [9] J. Y. Rho, T. Y. Tsui e G. M. Pharr, “Elastic Properties of Human Cortical and Trabecular Lamellar Bone Measured by Nanoindentation,” *Biomaterials*, nº 18, pp. 1325-1330, 1998.
- [10] S. Sezek, B. Aksakal e F. Karaca, “Influence of drill parameters on bone temperature and necrosis: A FEM modelling and in vitro experiments,” *Computational Materials Science*, vol. 60, pp. 13-18, 2012.

-
- [11] J. Lee, B. A. Gozen e O. B. Ozdoganlar, “Modeling and experimentation of bone drilling forces,” *Journal of Biomechanics*, vol. 45, nº 6, pp. 1076-1083, 2012.
- [12] W. A. Lughmani, K. Bouazza-Marouf e I. Ashcroft, “Finite element modeling and experimentation of bone drilling forces,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 451, pp. 1-6, 2015.
- [13] Y. K. Tu, L. W. Chen, J. S. Ciou, C. K. Hsiao e Y. C. Chen, “Finite Element Simulations of Bone Temperature Rise During Bone Drilling Based on a Bone Analog,” *Journal of Medical and Biological Engineering*, vol. 33, nº 3, pp. 269-274, 2013.
- [14] M. J. Fox, J. M. Scarvell, P. N. Smith, S. Kalyanasundaram e Z. H. Stachurski, “Lateral drill holes decrease strength of the femur: an observational study using finite element and experimental analyses,” *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, vol. 8, nº 29, pp. 2-8, 2014.
- [15] M. Marco, M. Rodríguez-Millán, C. Santiuste, E. Giner e M. H. Miguélez, “A review on recent advances in numerical modelling of bone cutting,” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 44, pp. 179-201, 2015.
- [16] K. Alam, A. Mitrofanov e V. Silberschmidt, “Finite element analysis of forces of plane cutting of cortical bone,” *Computational Materials Science*, vol. 46, nº 3, pp. 738-743, 2009.
- [17] K. Alam, A. V. Mitrofanov e V. Silberschmidt, “Thermal analysis of orthogonal cutting of cortical bone using finite element simulations,” *International Journal of Experimental and Computational Biomechanics*, vol. 1, nº 3, pp. 236-251, 2010.
- [18] I. S. Hage e R. F. Hamade, “Micro-FEM orthogonal cutting model for bone using microscope images enhanced via artificial intelligence,” *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 385-390, 2013.
- [19] C. Santiuste, M. R. Millán, E. Giner e H. Miguélez, “The influence of anisotropy in

- numerical modeling of orthogonal cutting of cortical bone,” *Composite Structures*, vol. 116, n° 1, pp. 423-431, 2014.
- [20] M. G. Fernandes, R. J. Natal e E. M. M. Fonseca, “Three-dimensional dynamic finite element and experimental models for drilling processes,” *Journal of Materials: Design and Applications*, pp. 1-9, 2015.
- [21] K. Alam, M. Khan e V. Silberschmidt, “Analysis of forces in conventional and ultrasonically assisted plane cutting of cortical bone,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 227, n° 6, pp. 636-642, 2013.
- [22] D. M. Stefanescu, *Handbook of Force Transducers: Principles and Components*, Berlin: Springer, 2011, pp. 334-335.
- [23] E. S. Gurdjian e H. R. Lissner, “Mechanism of head injury as studied by the cathod ray oscilloscope: preliminary report,” *Journal of Neurosurgery*, vol. 1, n° 393, 1944.
- [24] J. A. Szivek e V. M. Gharpuray, “Strain Gauge Measurements From Bone Surface,” em *Mechanical Testing of Bone and the Bone-Implant Interface*, CRC Press, 1999, pp. 306-308.
- [25] W. L. Hylander, K. R. Johnson e A. W. Crompton, “Loading patterns and jaw movements during mastication in *Macaca fascicularis*: a bone-strain, electromyographic, and cineradiographic analysis,” *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 72, n° 3, pp. 287-314, 1987.
- [26] A. E. Goodship, L. E. Lanyon e H. McFie, “Functional adaptation of bone to increased stress. An experimental study,” *Journal of Bone & Joint Surgery. American Volume.*, vol. 61, n° 4, pp. 539-546, 1979.
- [27] C. T. Rubin e L. E. Lanyon, “Dynamic strain similarity in vertebrates; an alternative to allometric limb bone scaling,” *Journal of Theoretical Biology*, vol.

- 107, nº 2, pp. 321-327, 1984.
- [28] D. R. Carter, R. Vasu e D. M. Spengler, “Stress fields in the unplated and plated canine femur calculated from in vivo strain measurements,” *Journal of Biomechanics*, vol. 14, nº 1, pp. 63-70, 1981.
- [29] P. E. Vela dos Reis, “Furação em Materiais Compósitos de Matriz Polimérica,” Dissertação para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mes-tre em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2005.
- [30] K. Alam, R. Muhammad e V. Silberschmidt, “In-Vitro Experimental and Numerical Analysis of Forces in Plane Cutting of Cortical Bone,” *Applied Mechanics and Materials*, p. 509, 2015.
- [31] R. A. Eriksson e T. Albrektsson, “The effect of heat on bone regeneration: an experimental study in the rabbit using the growth bone chamber,” *Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*, vol. 42, pp. 705-711, 1984.
- [32] J. Lundskog, “Heat and Bone Tissue. An Experimental Investigation of the Thermal Properties of Bone and Threshold Levels Injury,” *Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery*, vol. 9, pp. 1-80, 1972.
- [33] A. R. Eriksson e T. Albrektsson, “Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: A vital microscopic study in the rabbit,” *Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 50, nº 1, pp. 1-142, 1983.
- [34] F. J. O'Brien, D. Taylor e T. C. Lee, “The effect of bone microstructure on the initiation and growth of microcracks,” *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 23, nº 2, pp. 475-480, 2005.
- [35] R. C. Vaughan e P. F. A., “The influence of rotational speed on temperature rise during cavity preparation,” *Journal of Dental Research*, vol. 5, nº 30, pp. 737-744, 1951.

- [36] C. H. Thompson, "Effect of drilling into bone," *Journal of Oral Surgery*, pp. 22-30, 1959.
- [37] L. S. Matthews e C. Hirsch, "Temperatures Measured in Human Cortical Bone when Drilling," *The Journal of Bone & Joint Surgery*, vol. 2, nº 54, pp. 297-308, 1972.
- [38] G. Augustin, S. Davila, K. Mihoci, T. Udiljak, D. S. Vedrina e A. Antabak, "Thermal osteonecrosis and bone drilling parameters revisited," *Archives os Orthopaedic and Trauma Surgery*, vol. 1, nº 128, pp. 71-77, 2008.
- [39] K. L. Wiggins e S. Malkin, "Drilling of bone," *Journal of Biomechanics*, vol. 9, nº 9, pp. 553-559, 1976.
- [40] Y. Reingewirtz, S. Szmukler-Moncler e B. Senger, "Influence of different parameters on bone heating and drilling time in implantology," *Clinical Oral Implants Research*, vol. 3, nº 8, pp. 189-197, 1997.
- [41] A. R. Toews, J. V. Bailey, H. G. Townsend e S. M. Barber, "Effect of feed rate and drill speed on temperatures in equine cortical bone," *American Journal of Veterinary Research*, vol. 8, nº 60, pp. 942-944, 1999.
- [42] J. M. Soriano, A. Garay, P. Aristimuño, L. M. Iriarte, J. A. Eguren e P. J. Arrazola, "Effects of rotational speed, feed rate and tool type on temperatures and cutting forces when drilling bovine cortical bone," *Machining Science and Technology: An International Journal*, vol. 17, nº 4, pp. 611-636, 2013.
- [43] R. Pandey e S. S. Panda, "Drilling of bone: A comprehensive review," *Journal of Clinic Orthopaedics and Trauma*, pp. 15-30, 2013.
- [44] T. Hüfner, J. Geerling, G. Oldag, M. Richter, M. J. Kfuri, T. Pohlemann e C. Krettek, "Accuracy study of computer-assisted drilling: the effect of bone density, drill bit characteristics, and use of a mechanical guide," *Journal of Orthopaedic Trauma*, vol. 5, nº 19, pp. 317-322, 2005.

- [45] R. C. Bechtol, "A Modified Hand Drill," *The Journal of Bone & Joint Surgery*, vol. 3, n° 38, pp. 691-692, 1956.
- [46] C. H. Jacob, J. T. Berry, M. H. Pope e F. T. Hoaglund, "A study of the bone machining process-Drilling," *Journal of Biomechanics*, vol. 9, n° 5, pp. 343-344, 1976.
- [47] K. L. Wiggins e S. Malkin, "Orthogonal Machining of Bone," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 100, n° 3, pp. 122-130, 1978.
- [48] S. Saha, S. Pal e J. A. Albright, "Surgical drilling: design and performance of an improved drill.," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 3, n° 104, pp. 245-252, 1982.
- [49] C. Natali, P. Ingle e J. Dowell, "Orthopaedic Bone Drills - Can they be Improved?," *The Journal of Bone & Joint Surgery British*, n° 78B, pp. 357-362, 1996.
- [50] Z. Paszenda e M. Basiaga, "FEM analysis of drills used in bone surgery," *World Academy of Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 36, n° 2, pp. 103-109, 2009.
- [51] M. Basiaga, Z. Paszenda, J. Szewczenko e M. Kaczmarek, "Numerical and experimental analyses of drills used in osteosynthesis," *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, vol. 13, n° 4, pp. 33-35, 2011.
- [52] Sawbones, "Biomechanical Test Materials," 2016. [Online]. Available: http://www.sawbones.com/UserFiles/Docs/biomechanical_catalog.pdf. [Acedido em Maio 2016].
- [53] G. Augustin, S. Davila, T. Udilljak, T. Starovesky, D. Brezak e S. Babic, "Temperature changes during cortical bone drilling with a newly designed step drill and an internally cooled drill," *International Orthopaedics*, vol. 36, n° 7, pp. 1449-1456, 2012.

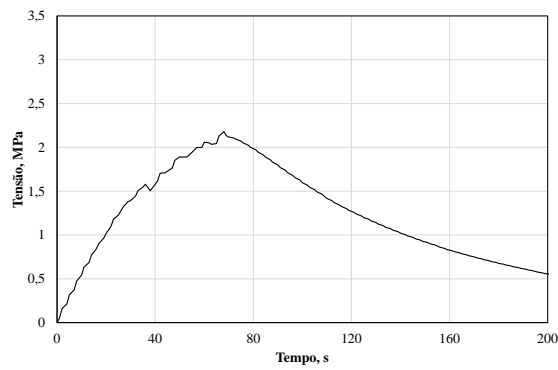
- [54] M. Fernandes, M. Vaz, R. Natal e E. Fonseca, “Avaliação térmica da furação no osso cortical com e sem irrigação,” em *9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, Aveiro, 2014.
- [55] “FLIR T365 Infrared Thermal Camera,” [Online]. Available: <http://www.flircameras.co.uk/flir-t365-infrared-thermal-camera.html>. [Acedido em 26 03 2016].
- [56] A. Valido e J. D. Silva, “Introdução à Extensometria Elétrica de Resistência,” Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia, Setúbal, 1997.
- [57] K. Hoffmann, *Applying the Wheatstone Bridge Circuit*, Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik, 1986.
- [58] E. Madenci e I. Guven, *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*, Arizona: Springer, 2006.
- [59] J. O. Hallquist, “LS-DYNA: THEORETICAL MANUAL,” Livermore Software Technology Corporation, California, 1998.
- [60] “LS-DYNA,” Livermore Software Technology Corporation, [Online]. Available: <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>. [Acedido em 30 Março 2016].
- [61] “Implicit and Explicit finite element method,” iMechanica, [Online]. Available: <http://imechanica.org/node/5396>. [Acedido em 30 Março 2016].
- [62] *Ansys (Versão 16.2)*, SOLID164 Element Description.
- [63] M. G. Fernandes, E. M. M. Fonseca e R. J. Natal, “Influence of Drill Speed and Feed Rate on Bone Damage,” em *Mechanical Engineering Conference*, Porto, Portugal, 2016.
- [64] G. A. Bibiana Luccioni, “Erosion criteria for frictional materials under blast load,” *Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Mecánica Computacional*, pp.

1809-1831, 2011.

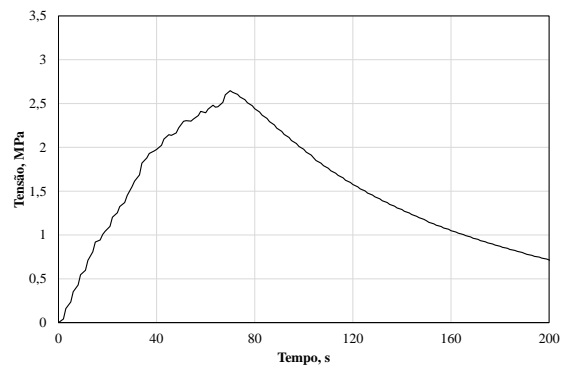
Anexo A

Resultados obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 1 com velocidade de rotação igual a 600 RPM.

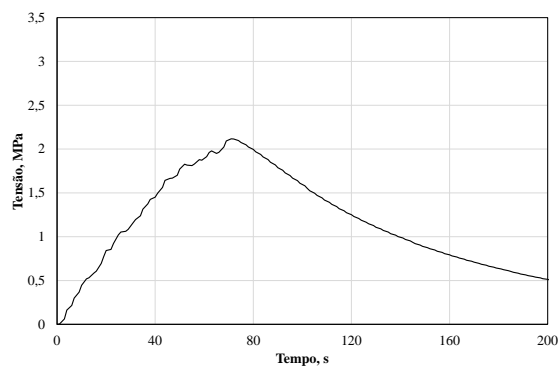
F1



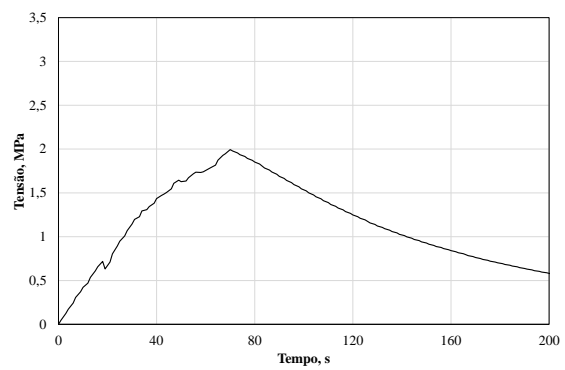
F2



F3

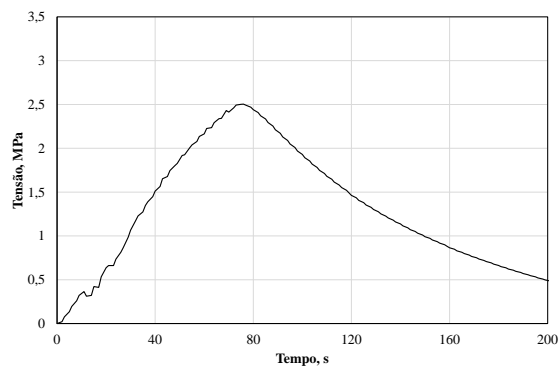
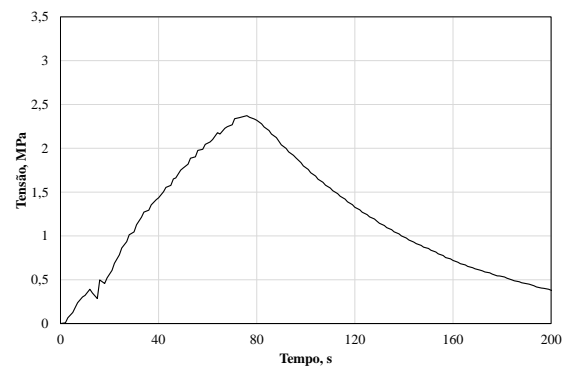
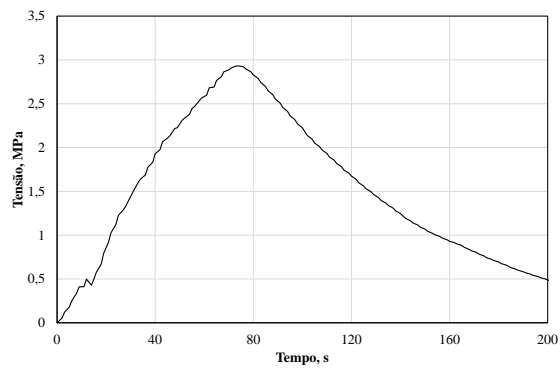
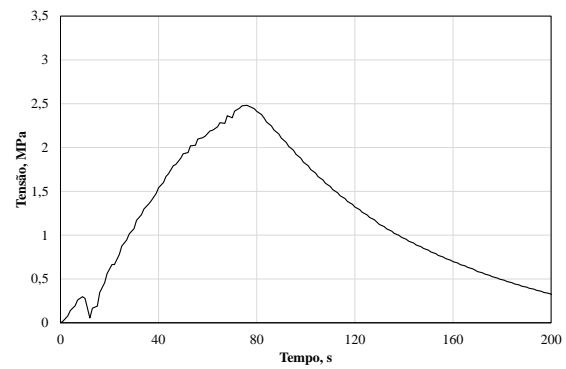
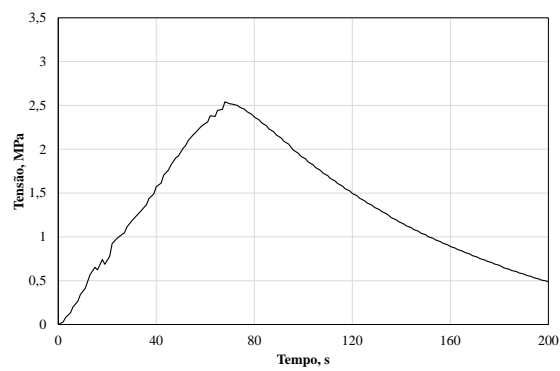


F5



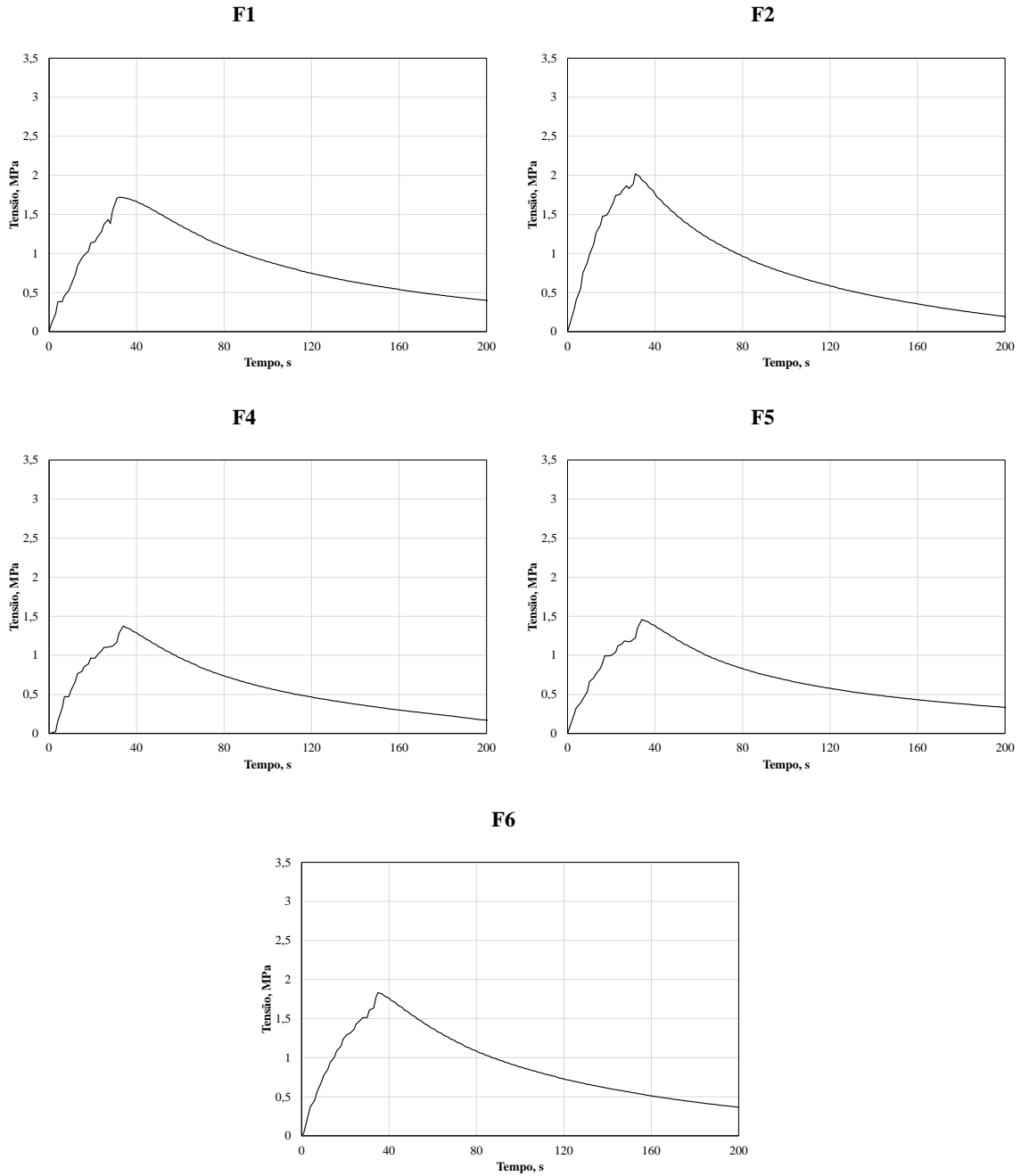
Anexo B

Resultados obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 1 com velocidade de rotação igual a 1200 RPM.

F7**F9****F10****F11****F12**

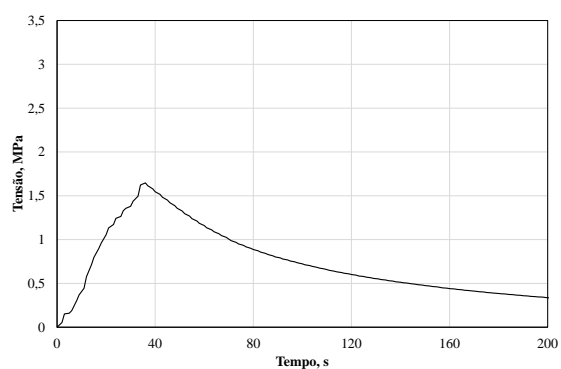
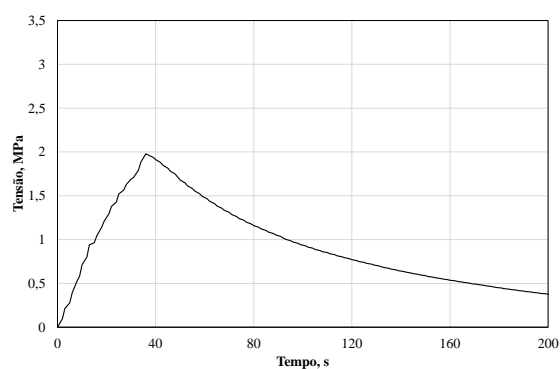
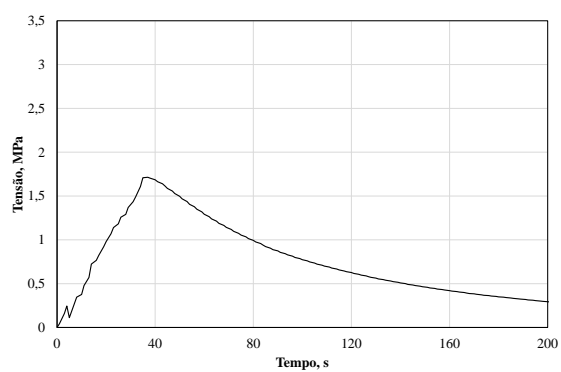
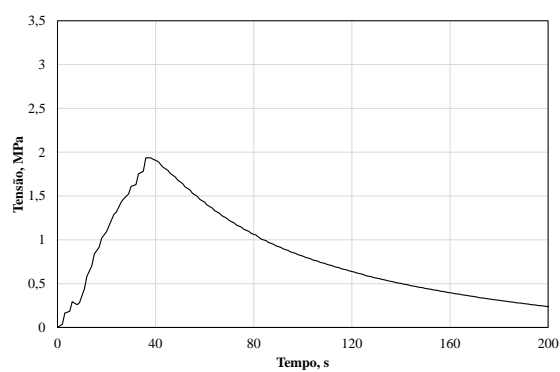
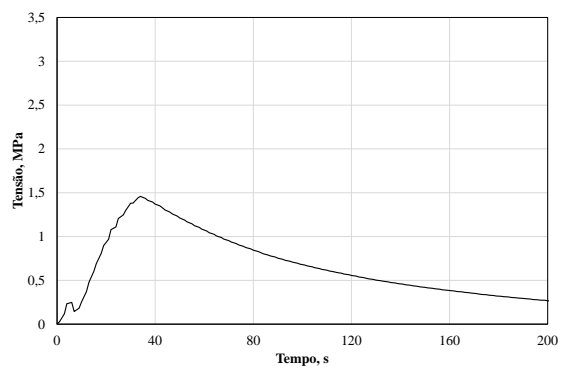
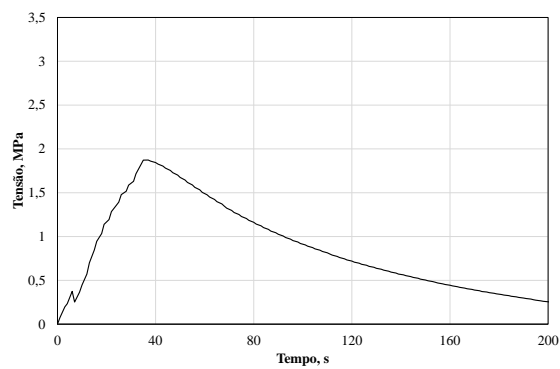
Anexo C

Resultados obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 2 com velocidade de rotação igual a 600 RPM.



Anexo D

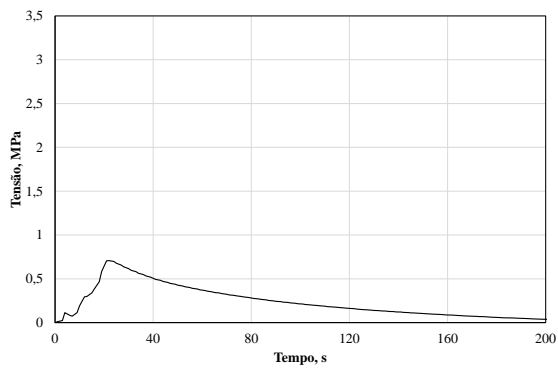
Resultados obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 2 com velocidade de rotação igual a 1200 RPM.

F7**F8****F9****F10****F11****F12**

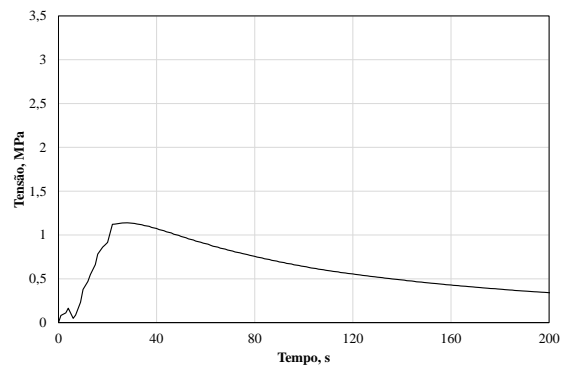
Anexo E

Resultados obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 3 com velocidade de rotação igual a 600 RPM.

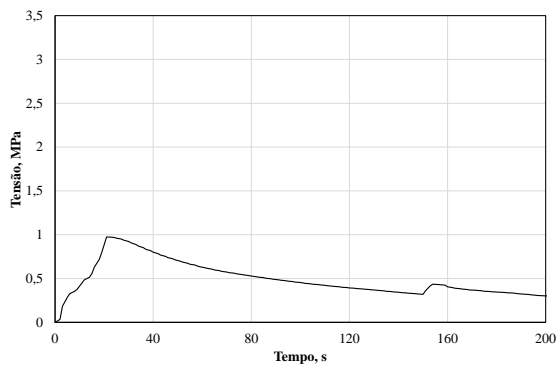
F2



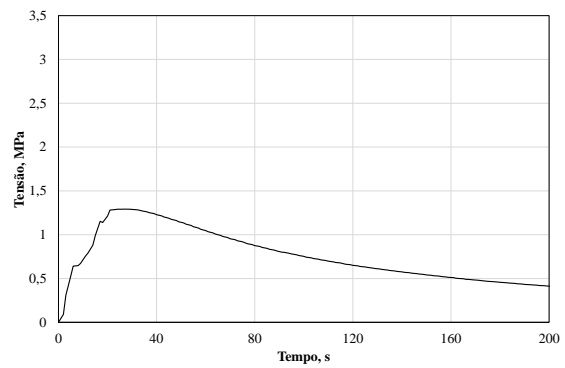
F3



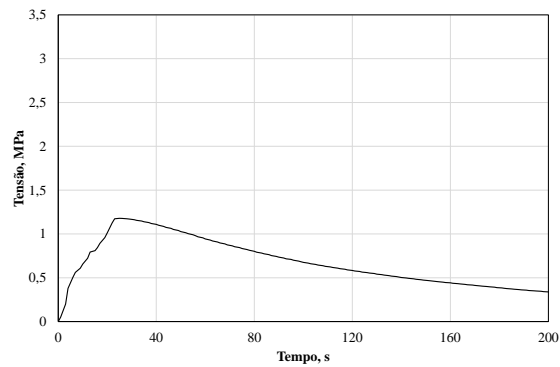
F4



F5

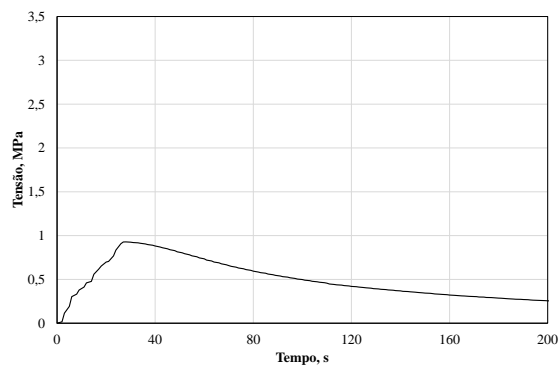
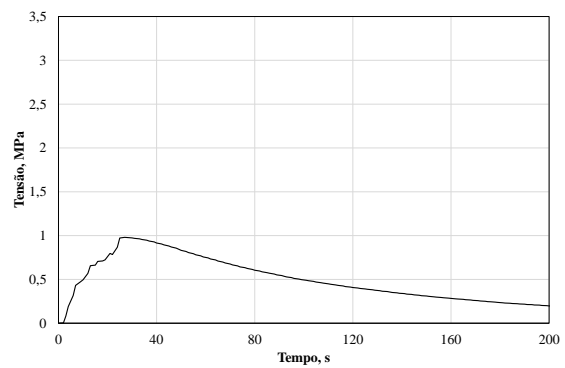
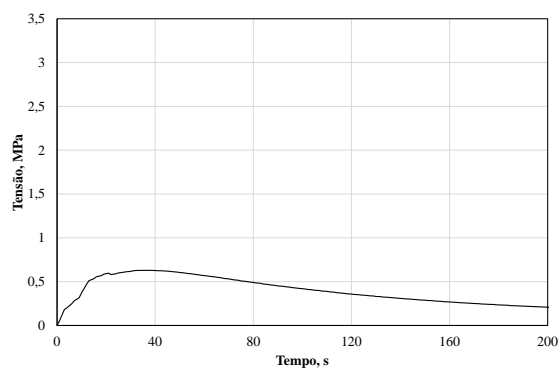
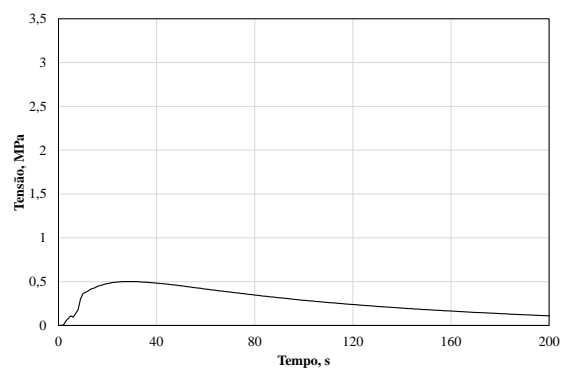
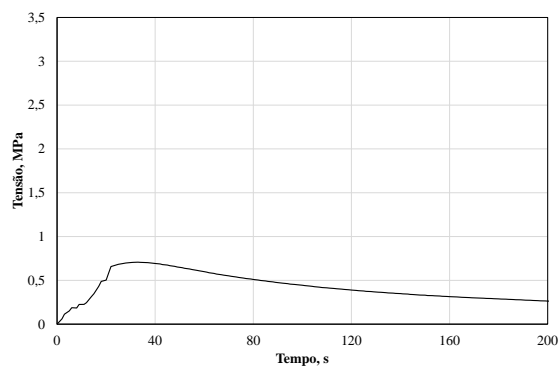
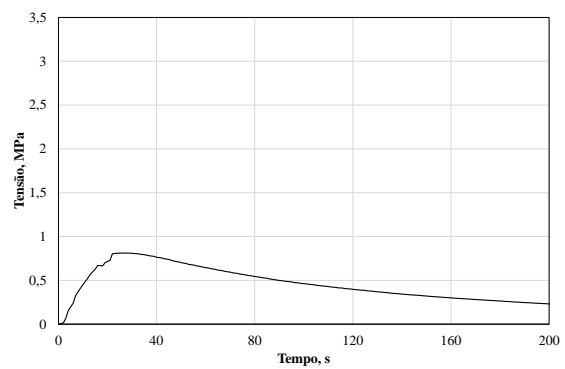


F6



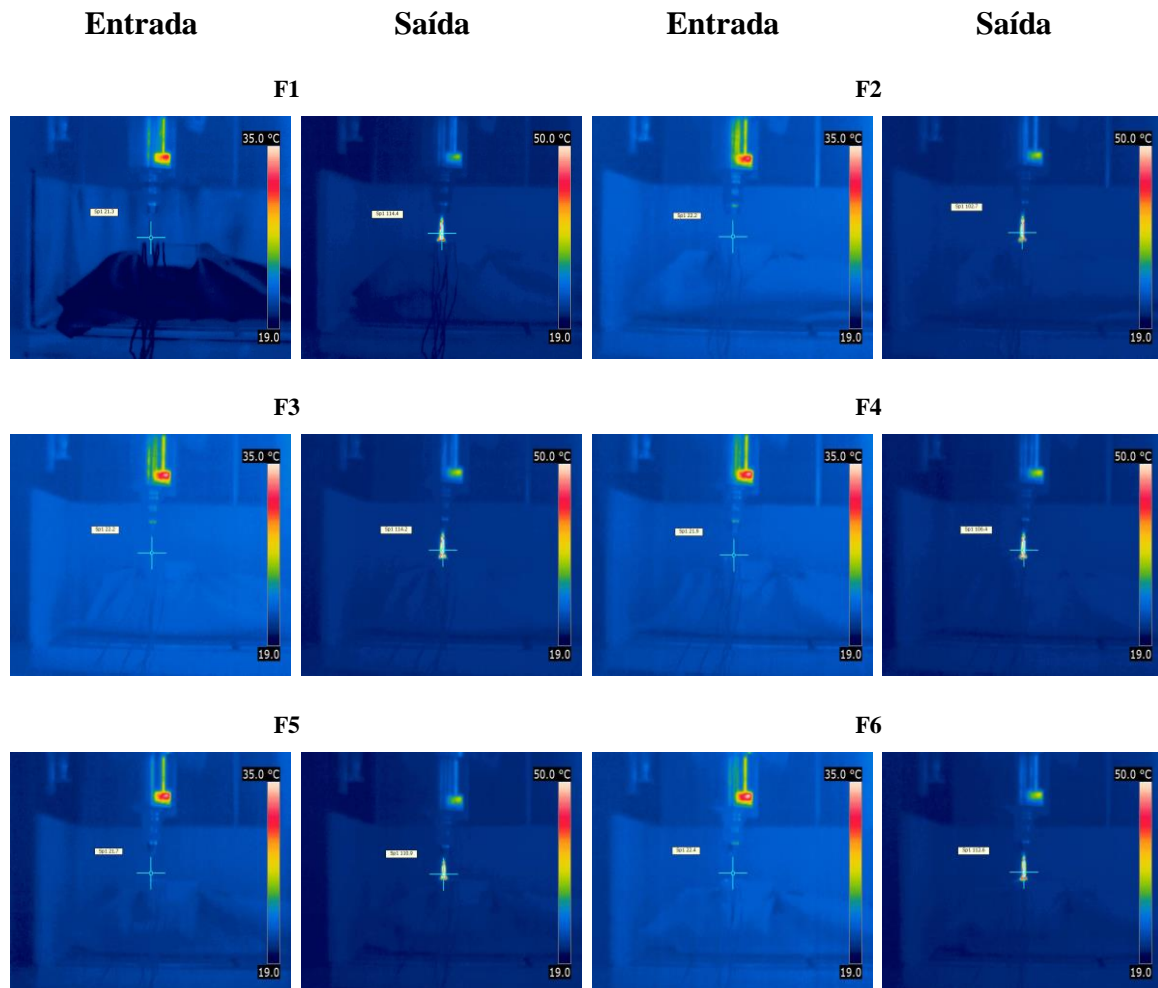
Anexo F

Resultados obtidos para as várias furações realizadas no Bloco 3 com velocidade de rotação igual a 1200 RPM.

F7**F8****F9****F10****F11****F12**

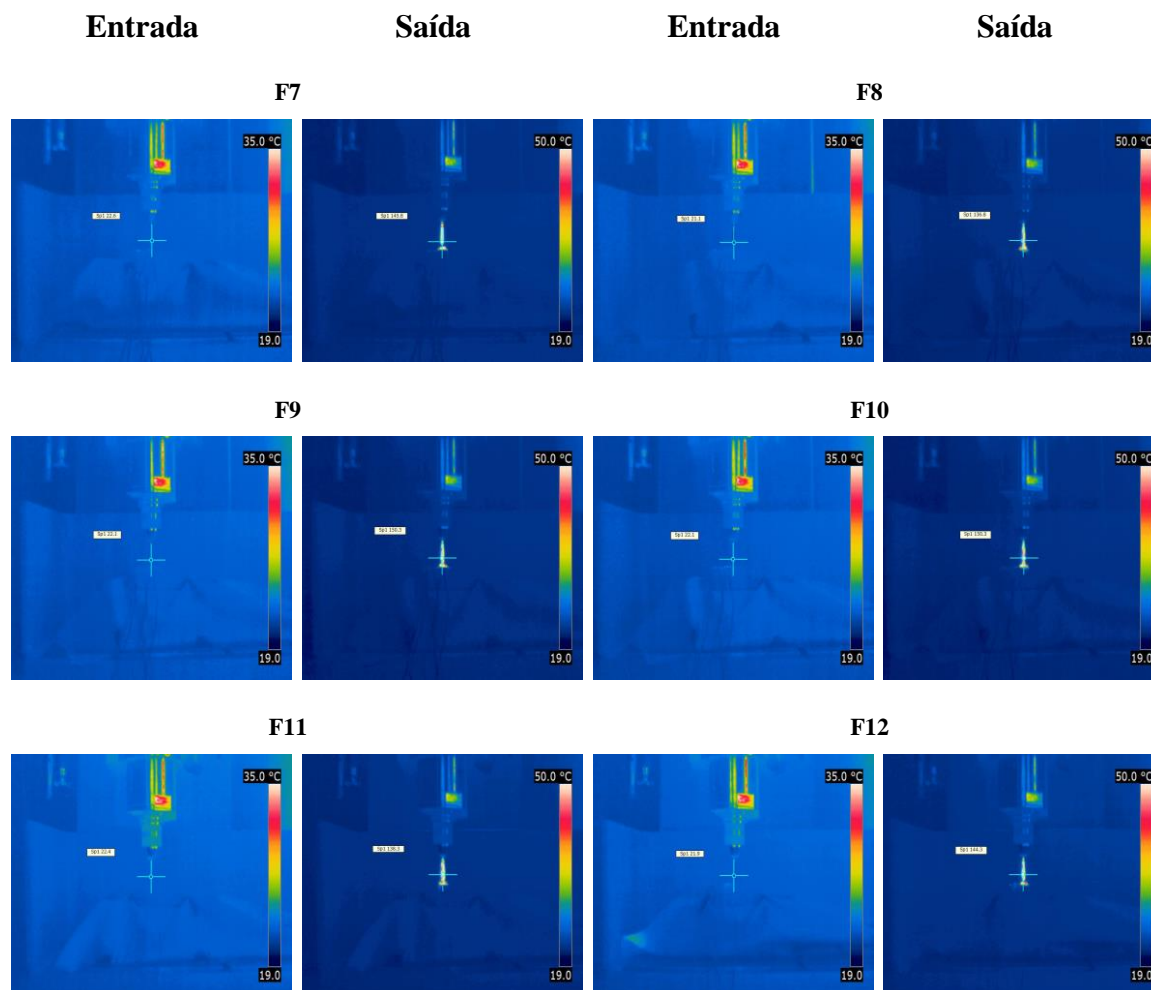
Anexo G

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondentes ao Bloco 1 para velocidade de rotação de 600 RPM.



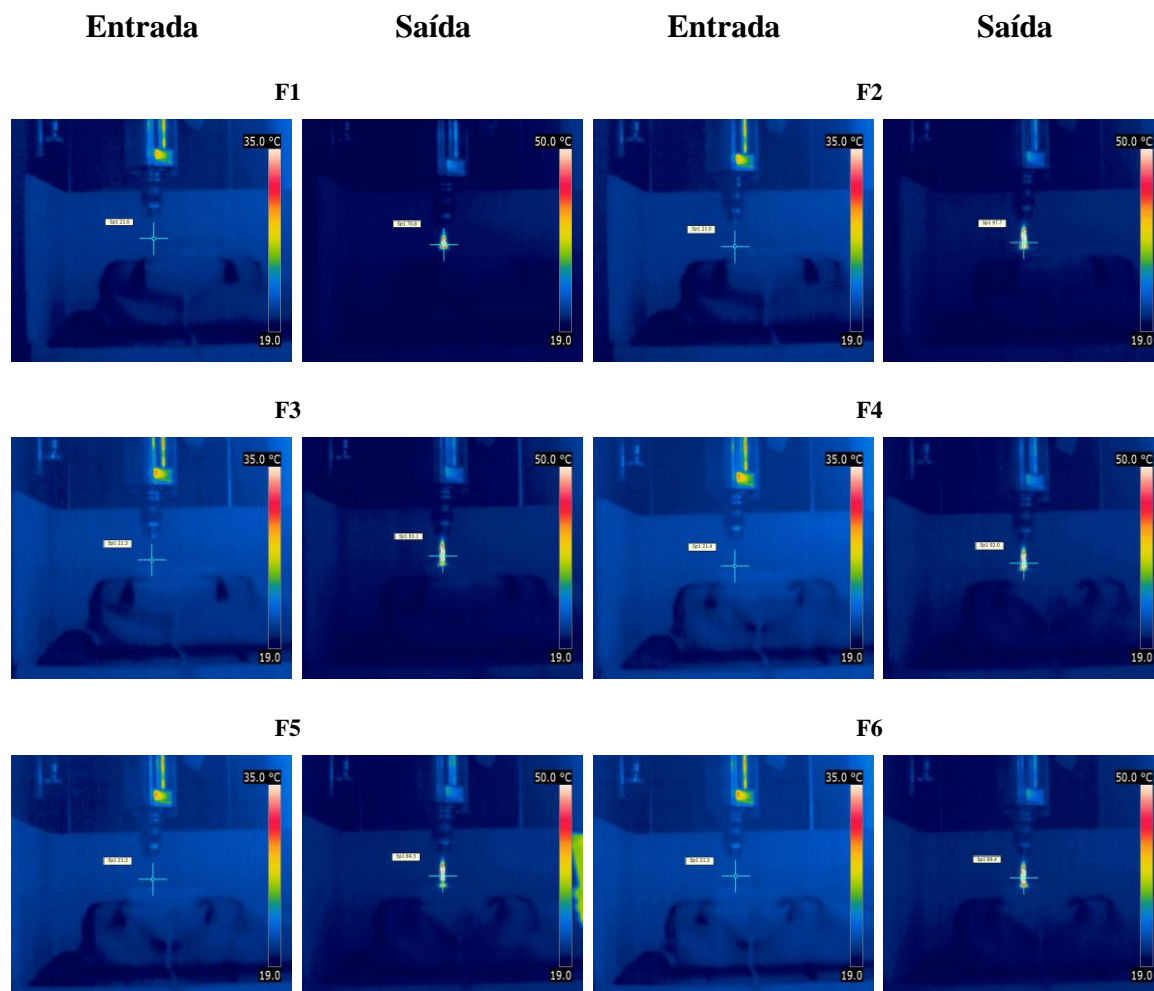
Anexo H

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondentes ao Bloco 1 para velocidade de rotação de 1200 RPM.



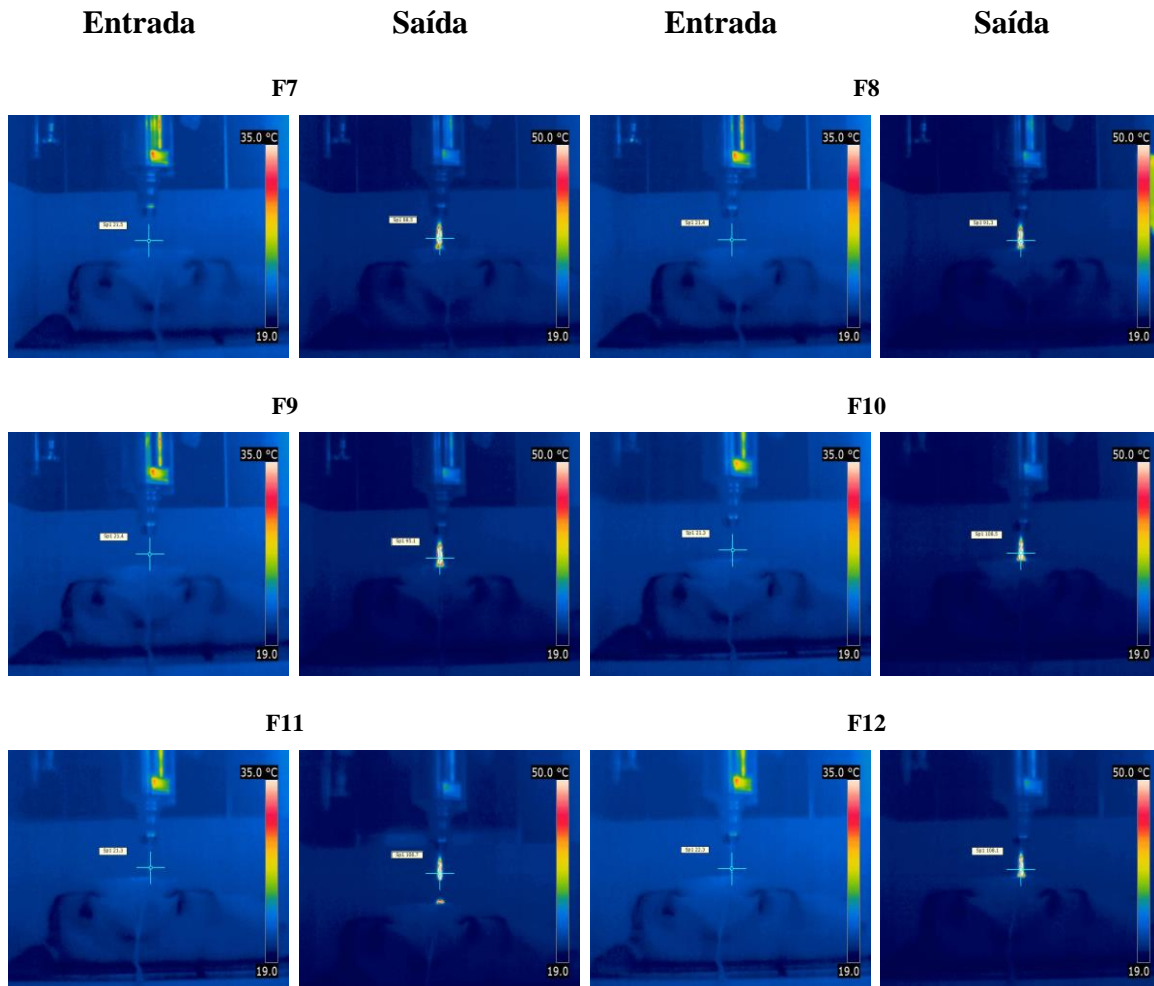
Anexo I

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondentes ao Bloco 2 para velocidade de rotação de 600 RPM.



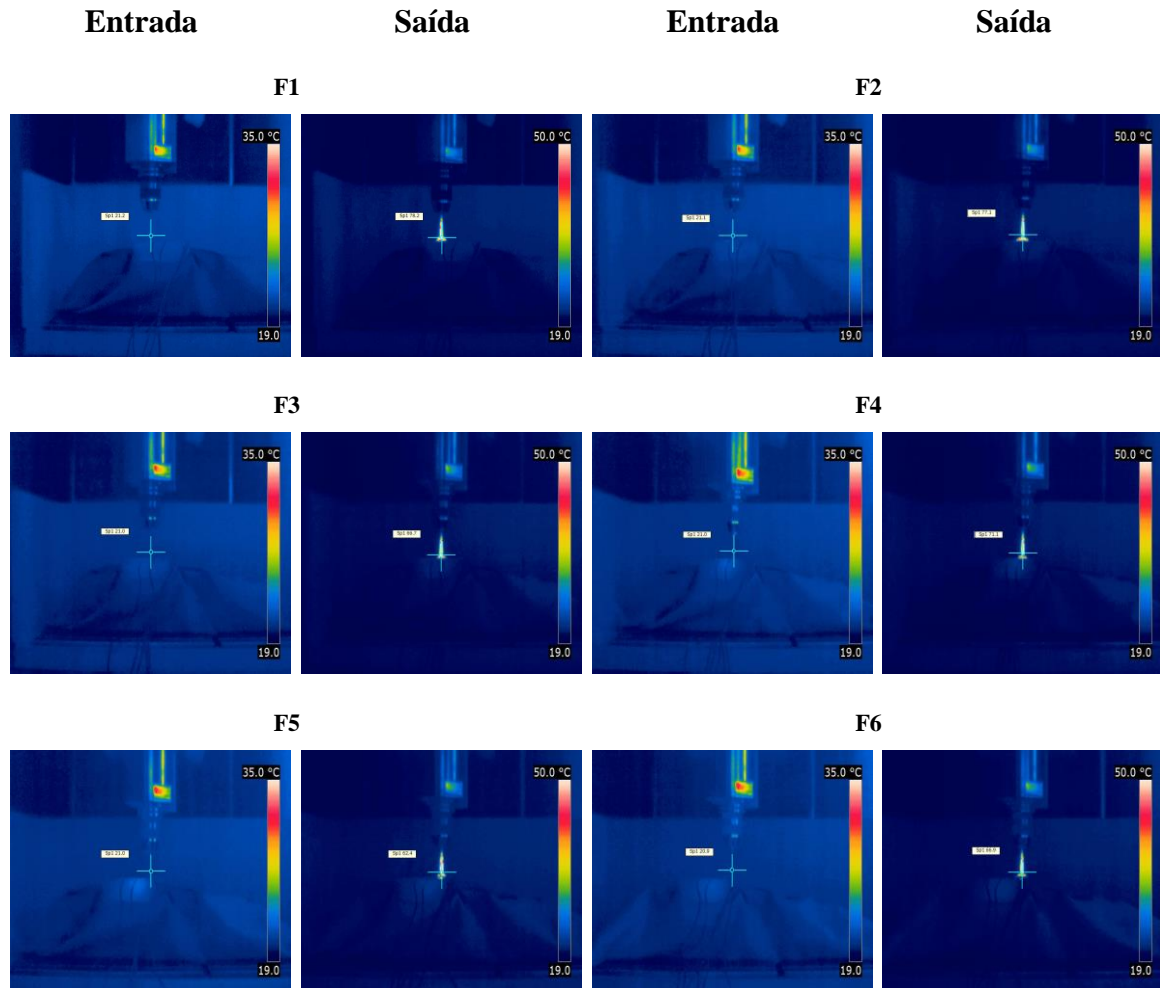
Anexo J

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondentes ao Bloco 2 para velocidade de rotação de 1200 RPM.



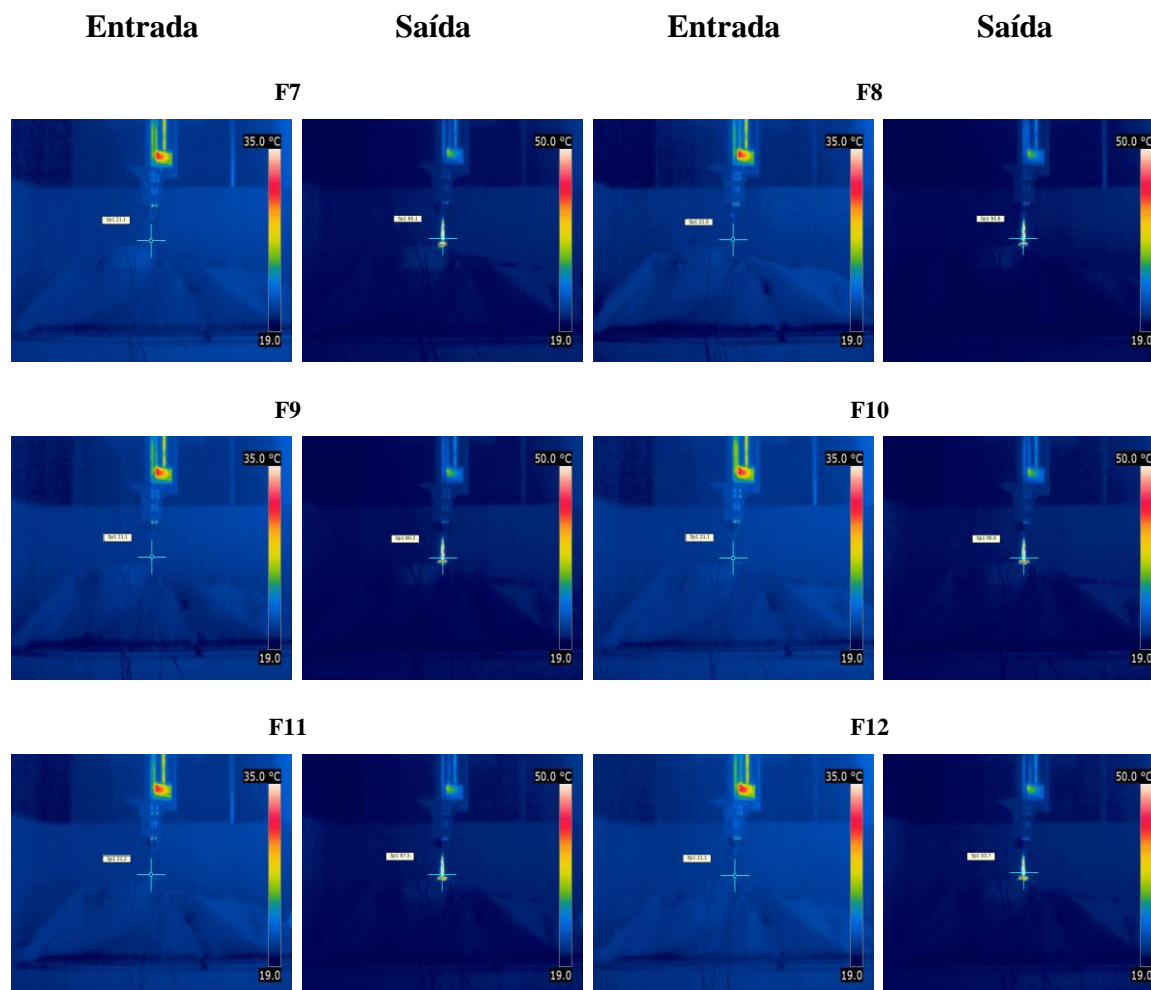
Anexo L

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondentes ao Bloco 3 para velocidade de rotação de 600 RPM.



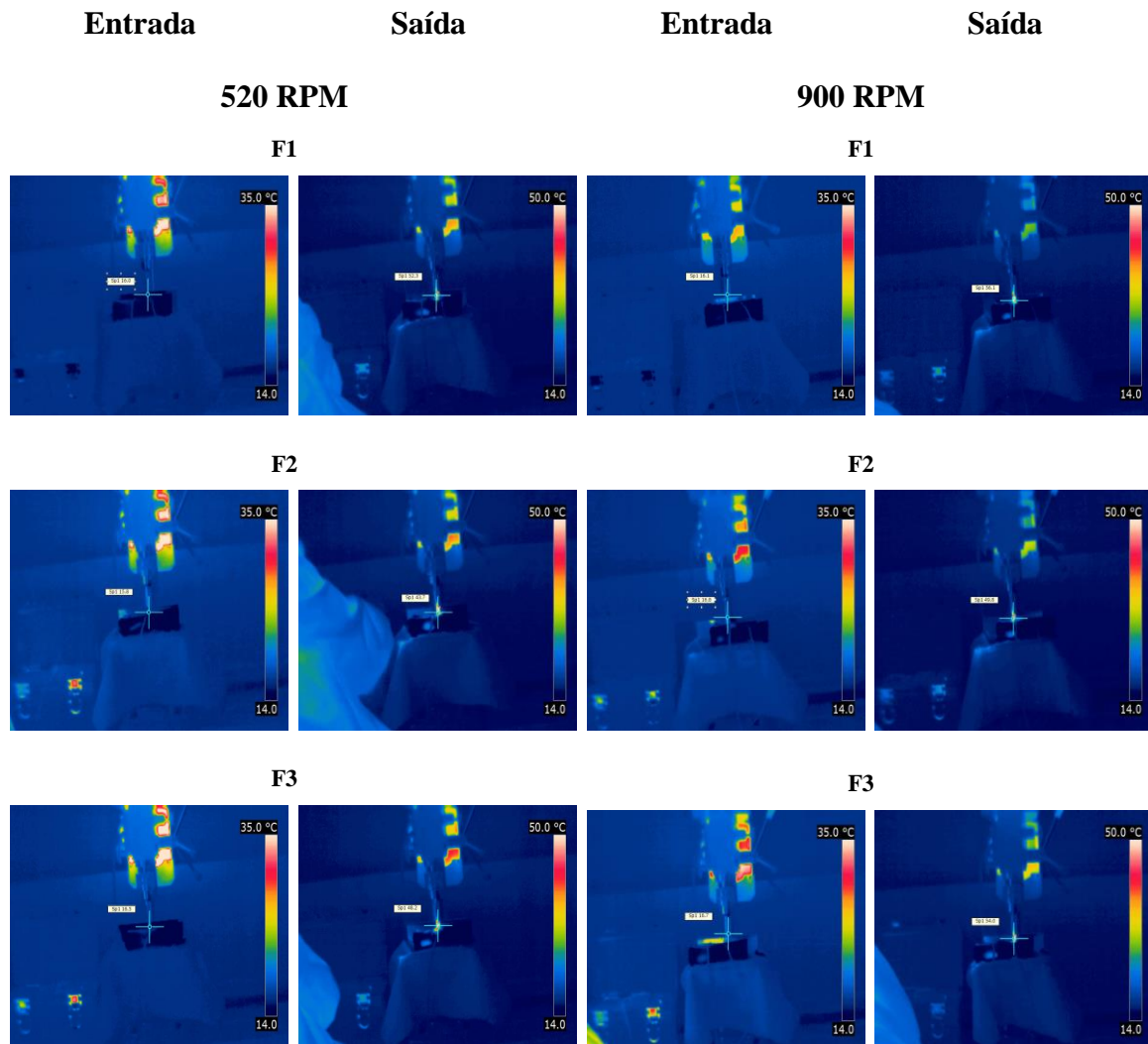
Anexo M

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondentes ao Bloco 3 para velocidade de rotação de 1200 RPM.



Anexo N

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondentes à furação em osso bovino para diferentes velocidades de rotação.

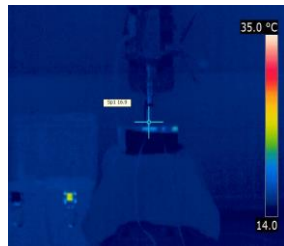


Entrada

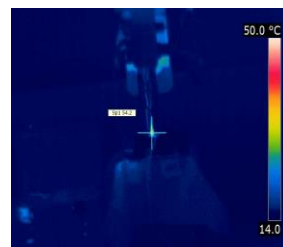
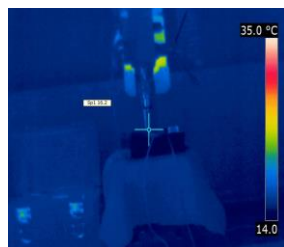
Saída

1370 RPM

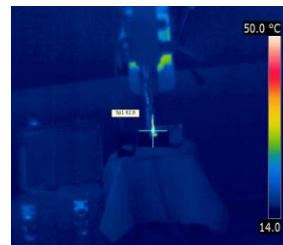
F1



F2



F3



Anexo O

Desenhos da broca em SolidWorks®.

4

3

2

1

F

F

E

E

D

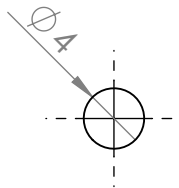
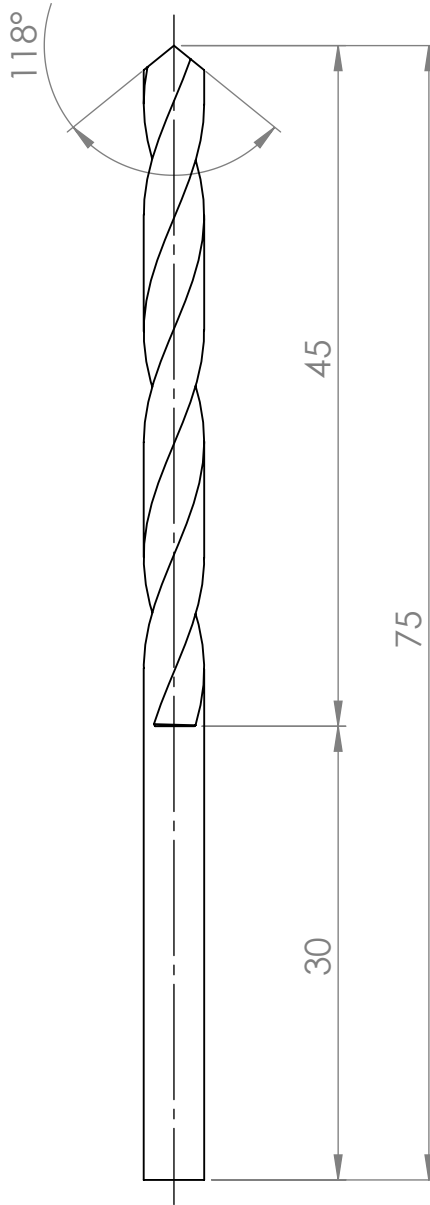
D

C

C

B

B



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

| | NAME | SIGNATURE | DATE | | |
|--------|------|-----------|------|--|--|
| DRAWN | | | | | |
| CHK'D | | | | | |
| APPV'D | | | | | |
| MFG | | | | | |

TITLE:

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

DWG NO.

Broca_1

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

4

3

2

1

A

A