

Análise de tensões em materiais compósitos sob furação utilizando diferentes tamanhos de ferramentas de corte

Tiago André Da Silva Teixeira

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professora Elza Maria Morais Fonseca

setembro de 2017

Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas que estiveram envolvidas e me acompanharam ao longo da realização deste trabalho.

À Professora Doutora Elza Fonseca, pelo empenho e dedicação incansável, disponibilidade ao longo deste ano letivo e por transmitir os seus conhecimentos para a realização desta dissertação.

À Engenheira Goreti Fernandes, à Engenheira Luísa Barreira e ao Engenheiro Jorge Paulo pela ajuda nos ensaios experimentais, disponibilidade e auxílio assim como a dedicação prestada.

Os meus pais pela oportunidade que me deram e apoio incondicional

À Cristiana pela amizade e paciência.

Aos meus amigos, pela amizade e ajuda.

Resumo

As evoluções das propriedades mecânicas dos materiais compósitos contribuem para que atualmente sejam utilizados de uma forma generalizada e em diferentes aplicações. O objetivo deste trabalho é determinar o estado de tensão gerado em materiais compósitos (concretamente em espumas de poliuretano rígida) quando sujeito a processos de furação, utilizando diferentes tamanhos de ferramentas de corte. A metodologia utilizada no presente estudo assenta num procedimento experimental, baseado na extensometria para a análise de deformações na superfície do material compósito, e na termografia para a verificação das temperaturas geradas na broca. Foi também desenvolvido um modelo numérico, calibrado com a metodologia experimental, através de um programa de elementos finitos para análise dinâmica explícita, utilizando diferentes metodologias para a convergência de resultados. As variáveis envolvidas no processo de furação e consideradas constantes foram a geometria da broca (ângulo da hélice e ponta da broca), a velocidade de avanço, a velocidade de rotação e um sistema sem irrigação. A geometria da broca, em relação ao diâmetro, foi o parâmetro considerado variável.

O presente trabalho permitiu concluir que aquando da furação em materiais compósitos, e nas condições enunciadas, o campo de tensão aumenta com o aumento do diâmetro da ferramenta de corte, sem efeito proporcional. O aumento no diâmetro na ferramenta de corte proporciona um maior contato entre as superfícies, um maior atrito, maior aquecimento e conseqüentemente, maiores esforços de corte.

Palavras-chave: Processo de furação, Tensões, Diâmetros da broca, Modelo numérico, Modelo experimental

Abstract

The mechanical properties evolution of composite materials contribute to their current use in a wide range of applications. The main objective of this work is to determine the level of generated stress in composite materials (namely in rigid polyurethane foams) when subjected to drilling processes, using different diameters of the cutting tools. The used methodology in the present study is based on an experimental procedure with strain gauges, for stress analysis on the composite material surface, and using the thermography for temperatures registration in the drill bit. A calibrated numerical model was also developed, using the finite element program for explicit dynamic analysis, considering different methodologies for the results convergence. The involved parameters in the drilling process considered constants were the drill bit geometry (angle and drill point), feed-rate, speed rotation and a system without irrigation. The drill bit diameter was the parameter considered variable.

The present study allowed to conclude the following: the generated stresses in composite materials, under drilling processes with the proposed conditions, increase with increasing the drill bit diameter of the cutting tool, without any proportional effect. The increase of the cutting tool diameter provides greater contact between the surfaces, greater friction, higher heating and consequently greater cutting forces.

Key words: Drilling process, Stresses, Drill bit diameter, Numerical model, Experimental model

Conteúdo

Agradecimentos	iv
Resumo.....	v
Abstract	vi
Lista de tabelas.....	x
Lista de figuras	xi
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Organização dos capítulos.....	2
Capítulo 2	3
Revisão Bibliográfica	3
2.1 Materiais Compósitos	4
2.1.1 Definição de materiais compósitos	4
2.1.2 Matriz	5
2.1.2.1 Matriz metálica.....	5
2.1.2.2 Matriz cerâmica.....	5
2.1.2.3. Matriz polimérica	6
2.1.3 Reforço	6
2.2 Processo de Furação.....	7
2.2.1 Furação em materiais compósitos	8
2.2.2 Geometria da ferramenta	9
Capitulo 3	11
Componente Experimental	11
3.1. Introdução.....	12
3.2. Furação no Material Compósito.....	12
3.2.1. Materiais e Métodos	12
3.2.2. Resultados obtidos	15
3.2.2.1. Tensões normais nos blocos	16
3.2.2.2. Temperatura na ferramenta	19
Capitulo 4	22
Componente Numérica	22
4.1. Introdução.....	23

4.2 Método de elementos finitos.....	23
4.3 Modelo Dinâmico de Furação	26
4.3.1. Modelação do comportamento material.....	29
4.3.2. Contacto e remoção do material	30
4.4 Análise de Tensões	31
Capitulo 5	35
Comparação de Resultados.....	35
5.1 Introdução	36
5.2. Análise de Tensões	36
5.2.1. Comparação experimental e numérica, modelo numérico sem constrangimento lateral	36
5.2.2. Comparação entre modelos numéricos, sem e com constrangimento lateral.....	37
Capitulo 6	40
Conclusões e trabalhos futuros.....	40
6.1 Conclusões.....	41
6.2 Trabalhos futuros	42
Referências bibliográficas	43
Anexo A	47
Anexo B	48
Anexo C	49
Anexo D	50
Anexo E.....	51
Anexo F.....	52

Lista de tabelas

Tabela 1- Características da espuma rígida de poliuretano	12
Tabela 2- Parâmetros de furação	14
Tabela 3- Parâmetros introduzidos na máquina termográfica FLIR®T365	15
Tabela 4- Valores das tensões normais máximas	18
Tabela 5- Temperaturas na broca de 4 mm	20
Tabela 6- Temperaturas na broca de 5 mm	20
Tabela 7- Temperaturas na broca de 6 mm	21
Tabela 8- Propriedades Mecânicas na análise numérica [7]	30
Tabela 9- Resultados para a tensão normal (MPa) e deformação normal, modelo sem constrangimentos laterais	32
Tabela 10- Valores médios de tensão e deformação, modelo sem constrangimento lateral	38
Tabela 11- Valores médios de tensão e deformação, modelo com constrangimento lateral	38

Lista de figuras

Figura 1- Representação esquemática dos tipos de reforços [4]	7
Figura 2- Delaminação Causada pela furação de materiais compósitos. [3]	8
Figura 3- Geometria de uma broca helicoidal [21]	10
Figura 4- Vista de topo do bloco compósito	13
Figura 5- Blocos em material compósito da Sawbones e colagem do extensômetro.....	13
Figura 6- Setup experimental utilizado na furação	14
Figura 7- Setup com estrutura envolvida em tecido negro.....	15
Figura 8- Componente de tensão normal, em função do tempo, para as três brocas	17
Figura 9- Deformação linear, em função do tempo de furação, para as três brocas.....	18
Figura 10- Temperaturas à entrada e saída, para a broca de 4 mm	19
Figura 11- Temperatura à entrada e saída, para a broca de 5 mm.....	19
Figura 12- Temperatura à entrada e saída, para a broca de 6 mm.....	20
Figura 13- Temperaturas de pico	21
Figura 14- Aplicação dos métodos de integração [29].....	25
Figura 15- Elemento SOLID164 do ANSYS® [30]	26
Figura 16- Exemplo de um dos modelos CAD utilizados.....	27
Figura 17- Modelos CAD reduzidos das diferentes brocas.	27
Figura 18- Divisão do bloco, vista isométrica e de topo.	28
Figura 19- Malha de elementos finitos igual para ambos os componentes.....	28
Figura 20- Representação de várias condições de fronteira aplicadas ao bloco.....	29
Figura 21- Distribuição da tensão equivalente de von Mises, MPa (modelo sem constrangimento lateral)	33
Figura 22- Distribuição da tensão equivalente de von Mises, MPa (modelo com constrangimento lateral).....	34
Figura 23- Resultados experimental e numérico para a tensão normal.....	36
Figura 24- Resultados experimental e numérico para a deformação normal	37
Figura 25- Distribuição da tensão de von Mises, MPa, comparação entre modelos numéricos ..	39

Capítulo 1

Introdução

Com o desenvolvimento das tecnologias, os materiais compósitos, são cada vez mais utilizados em diferentes tipos de indústria. A evolução destes materiais tem crescido, pois existe um aumento em diferentes aplicações, devido às suas características e inúmeras combinações. Os materiais compósitos possuem propriedades muito relevantes, como por exemplo, maior resistência mecânica, melhor resistência à fadiga, menor peso e até custo inferior, em relação a materiais mais convencionais. Tendo em conta o impacto que o processo de furação poderá ter na qualidade da peça final, os danos produzidos em materiais compósitos têm vindo a ser estudados por vários autores, conforme é referido na revisão bibliográfica deste trabalho.

O objetivo deste trabalho é determinar o estado de tensão gerado num material compósito (espuma de poliuretano rígida) sob processos de furação, utilizando diferentes tamanhos de diâmetro da ferramenta de corte. Foi utilizado um procedimento experimental, baseado na extensometria para análise de deformações à superfície do material compósito, e na termografia para verificação da temperatura gerada na broca. Foi também desenvolvido um modelo numérico, calibrado com os resultados experimentais, através de um programa de elementos finitos para análise dinâmica explícita. Com exceção do diâmetro da broca variável, as restantes variáveis do processo de furação foram consideradas constantes: a geometria da broca (ângulo da hélice e a ponta da broca), a velocidade de avanço, a velocidade de rotação e um sistema sem qualquer irrigação.

O presente trabalho permitiu concluir que aquando da furação em materiais compósitos, e nas condições enunciadas, o campo de tensão aumenta com o aumento do diâmetro da ferramenta de corte. O aumento no diâmetro na ferramenta de corte proporciona um maior contato entre as superfícies, maior atrito, maior aquecimento e consequentemente, maiores esforços de corte. As metodologias utilizadas permitem analisar na superfície do material compósito os danos resultantes pelo processo de furação.

1.1. Organização dos capítulos

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, sendo os dois primeiros capítulos relativos à introdução, revisão do estado da arte e conceitos teóricos sobre o tema em estudo. Os restantes capítulos referem-se ao trabalho realizado e às conclusões obtidas. No final do presente relatório encontram-se disponíveis seis anexos que ajudam a compreensão dos resultados. Assim, e de uma forma resumida:

-no capítulo 1 é efetuada uma contextualização geral do tema a ser abordado, objetivos e organização do trabalho;

-no capítulo 2 é efetuada uma revisão bibliográfica, abordando alguns trabalhos considerados importantes para um melhor entendimento do estado de arte;

-no capítulo 3 apresenta-se a componente experimental relativa à furação em material compósito de espuma de poliuretano rígido e os resultados obtidos, utilizando diferentes diâmetros de ferramenta de corte. São ainda apresentadas as metodologias e os materiais utilizados;

-no capítulo 4 é apresentada a componente numérica do processo de furação para obtenção do estado de tensão, simulando os diferentes processos de furação;

-no capítulo 5 apresenta-se a comparação dos resultados entre os modelos experimentais e os numéricos;

-o capítulo 6 resume as conclusões do estudo efetuado, assim como refere possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Materiais Compósitos

Muitos materiais utilizados hoje em dia são compósitos, ocupando um lugar de destaque entre os materiais de engenharia. Os compósitos podem ser encontrados facilmente na natureza, como exemplo a madeira, constituída por uma matriz de lignina que envolve as fibras de celulose. Nos animais vertebrados, os ossos de que são formados, são um compósito constituído por uma matriz de colagénio e hidroxiapatita, que devido a um processo natural de evolução, tem uma orientação das fibras segundo a direção que melhor permite contrariar os esforços impostos [1].

O nível de desenvolvimento das sociedades está intimamente ligado aos materiais. As primeiras civilizações eram designadas em função do nível de desenvolvimento dos materiais: idade da pedra, idade de bronze ou idade do ferro. O ser humano, respondendo às solicitações acabou por recorrer a este tipo de materiais. Com o passar dos anos, foram descobertas técnicas para melhorar o comportamento dos materiais, através de tratamentos térmicos ou pela adição de novos elementos e ligas [2].

No séc. XX foram desenvolvidos novos materiais que levaram à criação dos chamados compósitos modernos, constituídos por uma matriz de base polimérica com reforço de fibras de diversos materiais. O aparecimento de muitas tecnologias só foi possível dado o desenvolvimento dos materiais avançados, nomeadamente nas áreas automóvel, aeronáutica e aeroespacial [3].

2.1.1 Definição de materiais compósitos

Um material compósito é constituído por uma combinação de dois ou mais materiais. No caso específico de compósitos fibrosos, os diversos materiais vão desempenhar cada um, uma função específica que pode ser de elementos de reforço ou matriz ligante. Pretende-se com um compósito combinar as melhores propriedades de cada um dos materiais individuais, obtendo assim características melhoradas em relação aos materiais que o compõem [1].

Os compósitos são maioritariamente anisotrópicos, e as suas propriedades variam em direções diferentes. Por exemplo na madeira, as propriedades variam no sentido das

fibras, e ao longo do eixo longitudinal do tronco as propriedades são muito superiores às evidenciadas no sentido transversal, suportando assim as elevadas cargas de flexão a que estão submetidas pela ação do vento. A produção de um compósito deve ter em conta a direção em que maioritariamente vai ser solicitado [3].

2.1.2 Matriz

A matriz tem a função de aglomerar todo o material de reforço, ao mesmo tempo que mantém a sua organização e posicionamento, dando a forma ao compósito e impedindo que o reforço seja atacado por elementos que provoquem a sua degradação. A todas as fibras que constituem o elemento de reforço, a matriz vai promover a distribuição dos esforços aplicados sobre o compósito. Ela apresenta propriedades inferiores de densidade, rigidez e resistência, em comparação com as fibras. Em termos de comportamento pode ser dúctil, elástica ou plástica, podendo ter ou não um comportamento linear mesmo a baixos níveis de deformação [1] [2].

Existem vários tipos de compósitos, dividindo-se em três grupos no que respeita ao material que constitui a matriz, podendo ser uma matriz metálica, cerâmica ou polimérica, cada um com limitações e especificações diferentes.

2.1.2.1 Matriz metálica

Habitualmente, o alumínio, magnésio ou titânio são dos metais mais utilizados em compósitos de matriz metálica. São normalmente ligados e tratados termicamente para melhorar as suas propriedades mecânicas. Neste caso, os reforços aplicados não alteram muito a rigidez e a resistência do metal. Em contrapartida, aumenta a resistência ao desgaste e a segurança a alta temperatura [2].

2.1.2.2 Matriz cerâmica

Os cerâmicos são particularmente frágeis, mas tem uma elevada capacidade térmica por unidade de peso. Tem aplicações em ambientes de altas temperaturas e em meios

altamente corrosivos. A principal motivação para adicionar reforços a cerâmicos é o aumento da tenacidade. Os reforços atuam como obstáculo à propagação da fenda, tendo a interface reforço-cerâmico um papel muito importante [2].

2.1.2.3. Matriz polimérica

As matrizes de natureza poliméricas dividem-se em duas categorias principais, os termoplásticos e termoendurecíveis. Em geral, os termoplásticos apresentam maior resistência a impacto, maior tenacidade e bastante menor higroscopicidade quando comparados com os polímeros termoendurecíveis. São facilmente processados por injeção, e podem ser reciclados. Os termoendurecíveis, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser reprocessados pois são constituídos por polímeros em que as moléculas formam estruturas bastantes rígidas. Estes polímeros, designados por resinas termoendurecíveis, são frequentemente fornecidos para processamento sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes sendo eles resinas, acelerador e catalisador [2].

2.1.3 Reforço

Os elementos de reforço proporcionam resistência e rigidez ao compósito e ajudam a suportar o esforço estrutural. Segundo o tipo de material de reforço utilizado, os materiais compósitos são classificados em duas grandes categorias, reforços com fibras ou reforços com partículas, como ilustra a figura 1. As fibras podem ser contínuas ou descontínuas, dependendo do seu comprimento/diâmetro [3].

As fibras contínuas podem apresentar uma distribuição na matriz em várias camadas denominando-se por laminados, ou numa só camada tendo uma distribuição unidirecional ou em malha. A reação das fibras é geralmente ortotrópica, em ambos os casos [3].

No caso das fibras descontínuas, estas podem apresentar uma distribuição aleatória ou uma orientação numa determinada direção, formando assim uma única camada. O facto é que para a resposta das fibras esta pode ser anisotrópica ou isotrópica, apresentando-se na maior parte das vezes como anisotrópica. No reforço em que é utilizado partículas, estas encontram-se suspensas na matriz aleatoriamente distribuídas e podem apresentar vários tamanhos, formas ou configurações. O comportamento do reforço pode ser

anisotrópico ou ortotrópico, sendo utilizados em domínios onde o carregamento não é significativo.

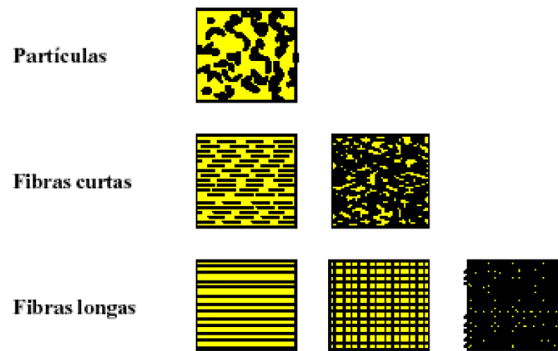


Figura 1- Representação esquemática dos tipos de reforços [4]

2.2 Processo de Furação

A furação é um processo mecânico no qual uma broca gira no seu próprio eixo, ou eixo de perfuração, e cria uma cavidade cilíndrica no material devido a uma carga axial aplicada pela broca em rotação. Pode dizer-se que esta ação mecânica vai afetar as propriedades em diferentes aspetos. É um facto conhecido que este processo gera esforços mecânicos e temperaturas elevadas, devido ao atrito que existe entre a broca e o material base. Um aumento drástico destes valores coloca em perigo a integridade do material e a qualidade do processo. A velocidade de rotação, a velocidade de avanço e a geometria da broca são os parâmetros mais estudados.

Quando a furação é efetuada em tecidos vivos, existe a preocupação de utilizar algumas técnicas que minimizem a agressividade. Alguns problemas ocorridos durante a furação levam ao dano mecânico e térmico na estrutura óssea, sob a forma de microfissuras e irregularidades superficiais das paredes perfuradas, conduzindo à necrose óssea [5]. Estes danos podem levar à falha da articulação e do implante, no caso da furação ocorrer em situações clínicas. Vários estudos e trabalhos publicados recentemente tornaram-se importantes para entender melhor este fenómeno [5] [6] [7] [8].

2.2.1 Furação em materiais compósitos

De todos os processos de maquinagem a aplicar aos materiais compósitos, a furação assume uma posição relevante pois possibilita as ligações de várias peças, permitindo a utilização em estruturas mais complexas. Todavia, a operação de furação pode causar vários defeitos nas peças, e comprometer a fiabilidade do componente. A furação consiste num processo final (montagem de componentes), por isso qualquer defeito durante essa etapa conduz à rejeição do componente [9].

O fato dos materiais não serem homogêneos, leva a problemas na furação que poderão causar diversos defeitos nas peças como é o caso da delaminação, fissuras inter-laminares, deslocamentos fibra/matriz e danos de origem térmica [3].

Em relação aos problemas encontrados no processo de furação, a delaminação constitui o dano mais importante. Este divide-se em dois tipos de acordo com a região do laminado onde ocorre, ou seja, a furação provoca delaminagens, à entrada ou saída da broca. Quando se dá à entrada denomina-se de “peel-up” [10] e quando é na saída da broca denomina-se de “push-out” [11].

Com o objetivo de diminuir a extensão das delaminagens, estudos realizados por Mead [12], mostraram que brocas mais pontiagudas originam uma penetração gradual; e Tsao et al. [13] e Durão et al. [14], provaram que a força de avanço pode ser substancialmente reduzida através de execução de um pré-furo de menor diâmetro, tendo como consequência o menor risco de delaminação.

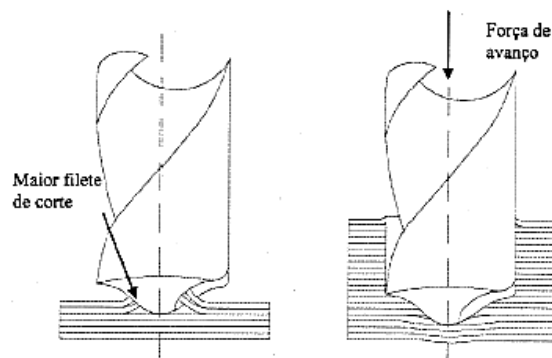


Figura 2- Delaminação Causada pela furação de materiais compósitos. [3]

No processo de furação de laminados compósitos ocorrem diferentes tipos de defeitos, dos quais pode-se citar o deslocamento da fibra-matriz, o arrancamento de fibras,

danos térmicos ou ainda a delaminação. [15] [16]. Ocorre a deformação da matriz polimérica durante a operação de furação, devido ao aumento de temperatura no local onde é efetuado o furo, debilitando as características mecânicas na zona afetada, efeito esse que ocorre quando os parâmetros de furação não são adequados, tais como velocidade de avanço e rotação. Um dos maiores defeitos existentes no processo de furação consiste na delaminação e como consequência torna-se importante evitar. Estudos realizados mostraram que o uso de placas sacrificiais, colocadas no lado de saída da broca, o recurso a furoguia e outros componentes, conduziam a um processo melhorado na furação [16] [17] [18] [19].

2.2.2 Geometria da ferramenta

Durante o processo de furação há dois tipos de esforços importantes a considerar: a força axial e o binário. Estes esforços são afetados pelos parâmetros de corte tais como, a velocidade, o avanço, a geometria da broca e o material a furar. Embora existam diversos tipos de geometria de ferramentas, as brocas helicoidais são as que produzem um trabalho mais económico, sendo por isso as mais utilizadas. Esta broca é composta por uma parte ativa, corpo, e um cabo ou haste para fixação da broca à árvore de trabalho. O corpo da broca tem duas estrias em espiral, cujo ângulo é a hélice, que normalmente varia entre 30 e 35°. Uma das funções da hélice é evacuar as aparas, uma vez que são removidas pelas arestas de corte através das ranhuras helicoidais da broca. Estas brocas são normalmente consideradas apropriadas para a execução de furos de comprimento inferior a 5 vezes o diâmetro. A ponta da broca tem a forma de um cone, cujo valor típico para o seu ângulo da ponta é 118°. Este ângulo tem uma influência decisiva na forma como a broca penetra no material, até que seja atingido o diâmetro máximo. Estes tipos de brocas são fabricados em aço rápido, aço ferramenta ou em carbonetos [20].

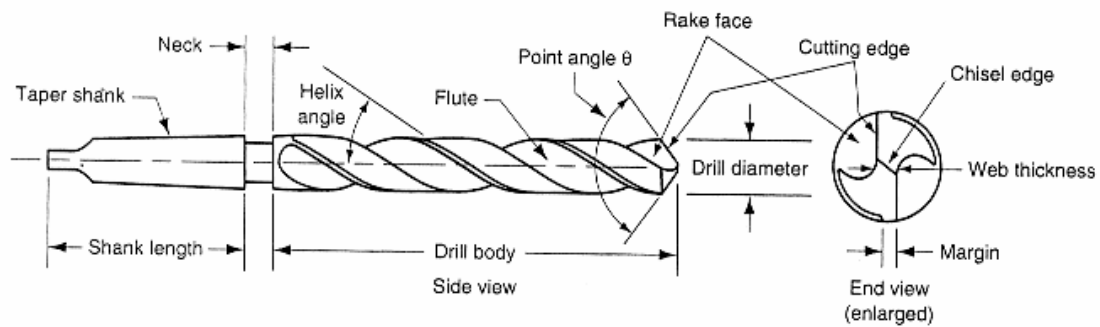


Figura 3- Geometria de uma broca helicoidal [21]

Os problemas encontrados no processo de furação são a remoção da aparas e o aumento da temperatura. Sem a utilização de um fluido para o arrefecimento, é habitual utilizar-se um procedimento, que consiste em retirar periodicamente a broca do furo, possibilitando assim o seu arrefecimento e a saída da aparas [21].

A geração de calor está relacionada com as dimensões de furação e principalmente o diâmetro da broca, sendo a área de corte maior. O efeito do ângulo da hélice é pequeno, de modo que pode ser negligenciado. Com o aumento do ângulo da hélice a temperatura diminui, mas o efeito é pequeno em comparação com os outros fatores como a velocidade de avanço e a rotação [22] [23].

As condições em que se encontra a broca torna-se relevante, uma vez que se estiver danificada vai interferir nas variáveis a testar. Mathews e Hirsch [24], realizaram testes em que o calor gerado devido à furação, é maior se as arestas de corte da broca não estiverem afiadas o suficiente, recomendando que a broca seja afiada após cada furação. Uma broca que tem um desgaste significativo aumenta a temperatura no local do furo devido à duração da furação utilizando brocas sem capacidade de corte [22].

Mathews e Hirsch determinaram que efetuando um furo com uma broca de 2.2 mm e seguidamente utilizando uma broca de 3.2 mm origina uma menor temperatura do que utilizando diretamente uma broca com 3.2 mm [25] [26].

Capitulo 3

Componente Experimental

3.1. Introdução

A atividade experimental tem como objetivo a recolha de informação importante para a resolução de um problema, baseada na aplicação de técnicas e processos. O processo experimental assenta na utilização de vários parâmetros de estudo e no efeito que esses provocam nos comportamentos observados. Em ambiente controlado, as repetições dos ensaios e a variação de parâmetros, permitem obter os diferentes resultados para avaliação. Neste capítulo apresenta-se a metodologia experimental, baseada na termografia para a análise de temperaturas geradas na broca e a extensometria para a análise das deformações na superfície do material compósito, durante os processos de furação.

3.2. Furação no Material Compósito

3.2.1. Materiais e Métodos

Para os testes de furação foram utilizados dois blocos compósitos de espuma rígida de poliuretano, da *Sawbones*. A tabela 1 representa as características do material compósito utilizado na parte experimental.

Tabela 1- Características da espuma rígida de poliuretano

Características físicas	
Dimensões	13x18x4 cm
Massa Volúmica	800 kgm^{-3}

Ambos os blocos foram inicialmente preparados para posteriormente se proceder à furação. Previamente foram efetuadas medições no próprio bloco, tanto para a colocação dos extensómetros como para o local do furo, respeitando igual distância do centro do extensómetro à aresta do furo. A figura 4 representa as medições efetuadas no bloco compósito.



Figura 4-Vista de topo do bloco compósito

A colagem dos extensómetros foi efetuada atendendo aos procedimentos prévios da limpeza da superfície. É importante salientar que o centro do extensómetro deve coincidir com o centro das linhas auxiliares previamente traçadas, para a correta obtenção e registo de dados. Após colagem dos extensómetros, para facilitar a ligação dos terminais foram adicionados ligantes, e executada a soldadura dos fios para a ligação a um sistema de aquisição de dados. A figura 5 representa algumas das fases na colagem dos extensómetros.

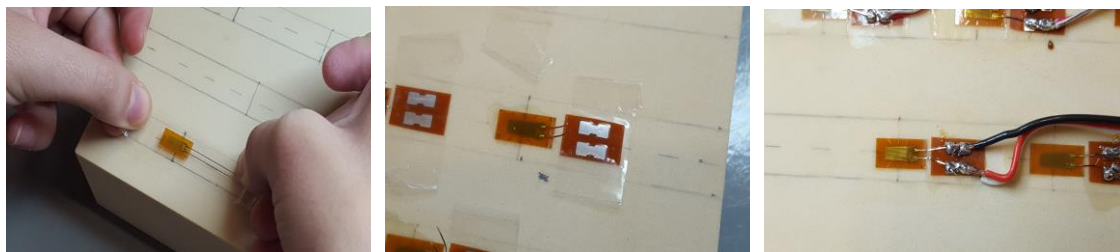


Figura 5-Blocos em material compósito da Sawbones e colagem do extensómetro.

Para obtenção dos resultados foram colocados 15 extensómetros lineares (1-LY18-6/120, $120\Omega \pm 0.35\%$), entre dois furos consecutivos, para o registo das deformações nesse ponto e direção. A furação foi realizada com três brocas de aço rápido, diâmetros distintos (4, 5 e 6mm), ângulo de ponta 118° , ângulo de hélice de 30° e comprimentos de 75, 86 e 93 mm, numa máquina de comando numérico CNC (DMC 63V). O registo das deformações foi obtido através de um sistema de aquisição de dados (Vishay Micro Measurements P3 Strain Indicator Recorder) a um computador. A figura 6 representa o equipamento utilizado durante a investigação experimental.



Figura 6- Setup experimental utilizado na furação

Nos ensaios de furação, a velocidade de avanço da broca, a velocidade de rotação e a profundidade de cada furo igual a 30 mm, foram sempre consideradas com o mesmo valor. A velocidade de rotação foi 600 RPM e a velocidade de avanço 75 mm/min. A tabela 2 resume os parâmetros e as variáveis consideradas durante o processo de furação.

Tabela 2-Parâmetros de furação

Parâmetros	Bloco 1	Bloco 2
Velocidade de avanço, V_f	75mm/min	
Velocidade de rotação, V_r	600 RPM	
Diâmetro da broca, d	4, 5 e 6 mm	5 e 6 mm
Ângulo de ponta	118°	
Tempo de furação, t	24 s	

Durante o procedimento experimental foi ainda necessário efetuar a repetição de alguns ensaios para as brocas de 5 e 6 mm do bloco 2. No decurso de todo o processo foram registadas as temperaturas na broca, à entrada e logo após a saída na furação. As temperaturas na broca foram registadas através de uma câmara termográfica FLIR®T365. A câmara termográfica utiliza parâmetros personalizados, conforme a tabela 3.

Tabela 3-Parâmetros introduzidos na máquina termográfica FLIR®T365

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

A máquina termográfica possui a resolução de 320x240 *pixels* e uma sensibilidade térmica $<0,05^{\circ}\text{C} + 30^{\circ}\text{C}$. As gamas de temperaturas variam de -20°C a 120°C , 0 a 350°C e 200°C a 650°C [27].

Para não ocorrer influência de fontes externas no registo de imagens térmicas, foi utilizada uma estrutura com fundo negro em tecido para evitar efeitos de radiação durante o processo de furação, conforme a figura 7.

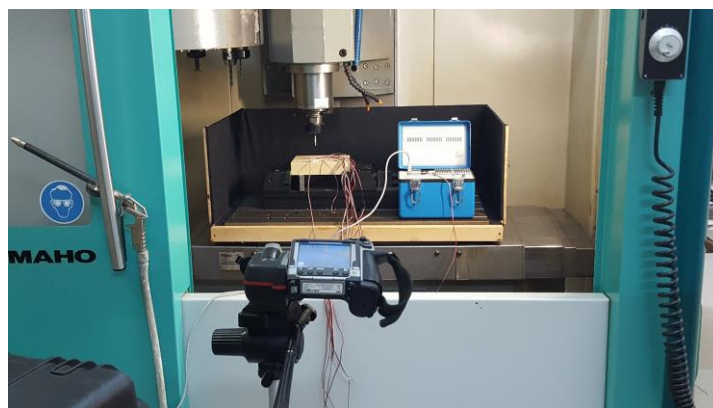


Figura 7- Setup com estrutura envolvida em tecido negro

3.2.2. Resultados obtidos

Os resultados obtidos no modelo experimental foram agrupados relativamente ao cálculo das tensões normais obtidas em função do registo das deformações, assim como as temperaturas registadas na ferramenta de corte.

3.2.2.1. Tensões normais nos blocos

O processo de furação gera campos de tensão, função das deformações do material. O estado de tensão no ponto material foi determinado através da lei de Hooke, com base na determinação prévia das deformações experimentais. Os dados relativos à deformação na superfície do bloco foram recolhidos através da extensometria. As deformações mecânicas são causadas pela furação, e obtidas através da variação da resistência elétrica do extensómetro, com recurso a um circuito elétrico designado por ponte de *Wheastone* [28]. Para o cálculo das deformações o sinal elétrico é convertido através de uma equação (1), conhecida como $\frac{1}{4}$ ponte, onde K é o fator de calibração do extensómetro e $\frac{V}{\varepsilon}$ representa o sinal lido pelo extensómetro:

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

Utilizando a teoria da elasticidade com base na lei de Hooke, é possível o cálculo das tensões normais através da equação (2), onde ε representa o valor da deformação e E o módulo de elasticidade do material.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2)$$

Torna-se importante salientar que para cada combinação de parâmetros foram efetuados 6 furos, ou seja, para a broca de 4, 5 e 6mm respetivamente. Os valores foram lidos através de um equipamento portátil para aplicações físicas de teste e medição (P3 - *Strain Indicator and Recorder*). Este equipamento funciona como um amplificador de ponte e indicador de tensão, sendo configurado para a leitura do registo de valores diretamente, através de uma aplicação incluída no próprio instrumento. O tratamento de dados foi efetuado posteriormente no programa Excel. Devido a erros, os testes experimentais com as brocas de 5 e 6mm foram repetidos, tendo sido realizados mais 6 furos, com o total de 18 furos. Para avaliar o efeito do diâmetro da broca no processo de furação do material compósito, os valores registados de deformação linear foram convertidos em estados de tensão. Na figura 8 está apresentado um exemplo dos resultados das tensões normais obtidos para o bloco 1 e 2 utilizando diferentes tamanhos de brocas.

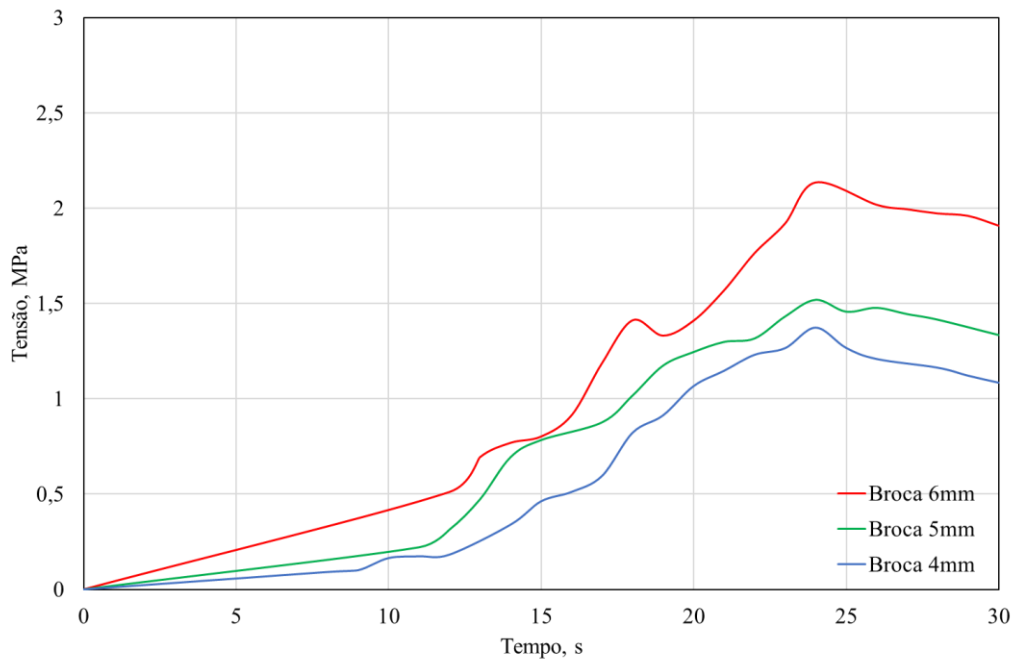


Figura 8- Componente de tensão normal, em função do tempo, para as três brocas

Analisando a figura 8, à medida que o tempo decorre e a broca penetra no material compósito verifica-se um aumento da componente da tensão normal na direção da leitura do extensómetro. Como era previsível, quanto maior for o tamanho da broca maior será o campo de tensões gerado na superfície do material. Verifica-se que para as brocas de 4mm e 5mm a tensão de pico não ultrapassa o valor de 1,5MPa, já a broca de 6mm o valor de pico é acima de 2MPa.

A análise de tensões nestes materiais compósitos, torna-se possível com base no registo prévio das deformações lineares, conforme exemplo representado na figura 9.

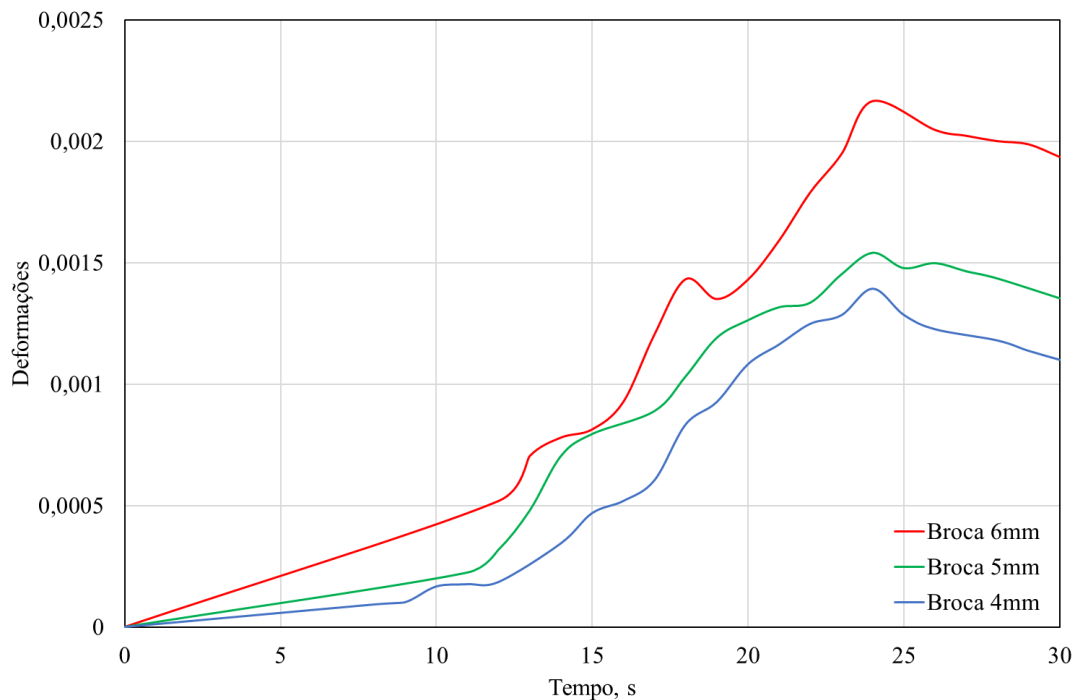


Figura 9- Deformação linear, em função do tempo de furação, para as três brocas

Em relação à evolução das deformações lineares e comparando com as tensões obtidas, é notória a semelhança do mesmo comportamento. A tabela 4 representa os valores da tensão normal máxima. O valor máximo de tensão ocorre no final da furação, quando a broca atinge 30 mm de profundidade, a que corresponde 24 segundos de furação, para uma rotação de 600RPM e uma velocidade de avanço de 75mm/min.

Tabela 4-Valores das tensões normais máximas

[MPa]	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4	Furo 5	Furo 6	Média	Desvio Padrão
Broca Ø4mm	1,46	1,06	1,26	1,17	1,37	1,43	1,29	0,16
Broca Ø5mm	1,28	1,38	1,52	1,99	1,13	1,28	1,43	0,30
Broca Ø6mm	1,26	1,98	2,13	3,21	1,64	1,35	1,93	0,71

Analisando a tabela, e com a média das tensões normais máximas para cada uma das brocas utilizadas, verifica-se que há um aumento das tensões com o aumento do diâmetro da broca. O desvio padrão calculado é baixo, indicando assim que os valores obtidos tendem a estar próximos da média ou do valor esperado.

3.2.2.2. Temperatura na ferramenta

Para se observar a temperatura na ferramenta, recorreu-se a uma camera termográfica, com o registo da temperatura na broca no momento antes e logo após cada furação. No momento antes da furação, a ferramenta encontra-se à temperatura ambiente e no momento após furação, devido à fricção que existe entre a ferramenta e o bloco, a temperatura é mais elevada. Nas figuras 10, 11 e 12 estão disponíveis exemplos de imagens retiradas à entrada e à saída para cada uma das diferentes brocas utilizadas. As restantes imagens termográficas estão representadas nos Anexos A, B, C, D, E.

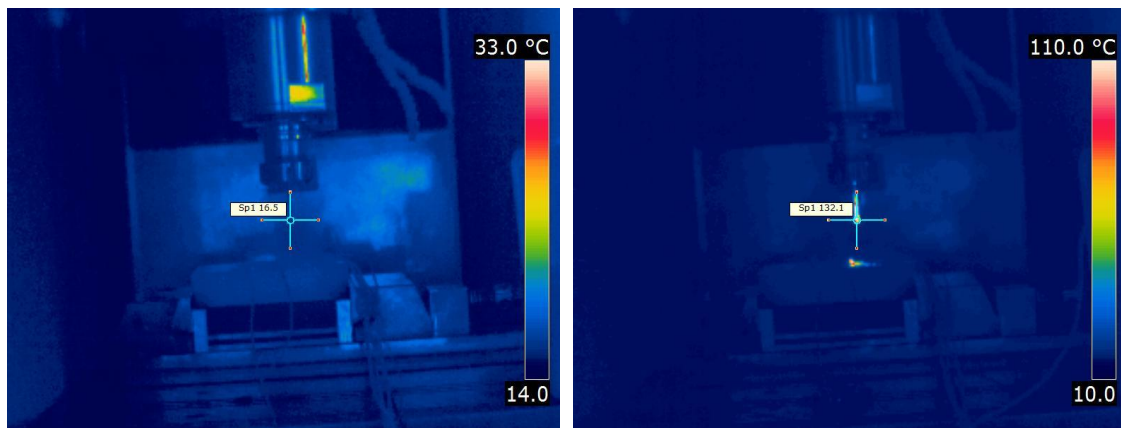


Figura 10- Temperaturas à entrada e saída, para a broca de 4 mm

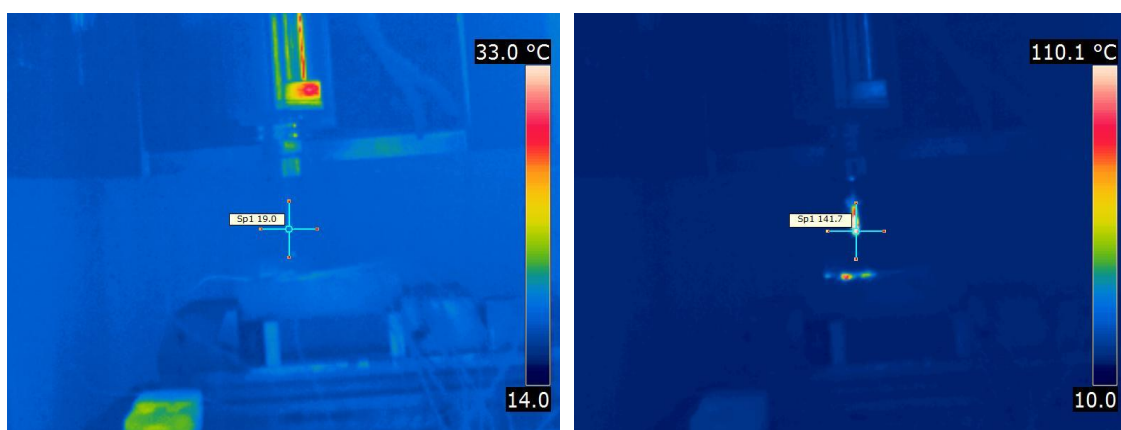


Figura 11-Temperatura à entrada e saída, para a broca de 5 mm

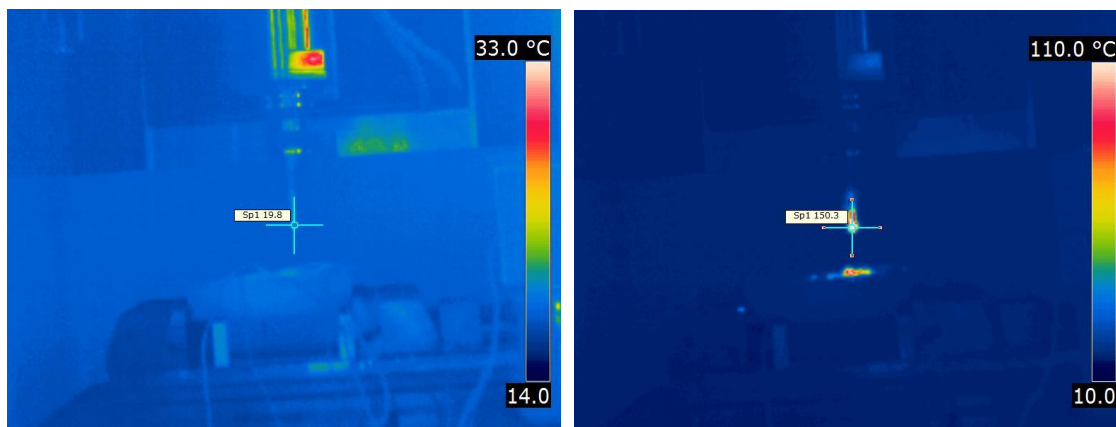


Figura 12- Temperatura à entrada e saída, para a broca de 6 mm

As tabelas 5, 6 e 7 representam os valores das temperaturas nas diferentes brocas à entrada e à saída de cada furação.

Tabela 5-Temperaturas na broca de 4 mm

Furos		1	2	3	5	6	Média
Rotação		600 RPM					
Velocidade de avanço		75mm/min					
Broca Ø		4 mm					
Temperatura, °C	Entrada	16,5	16,8	17	17,7	18,5	17,30
	Saída	132,1	127,4	134,2	130	130,1	130,76
	Delta T	115,6	110,6	117,2	112,3	111,6	113,46
	Desvio Padrão	2,55					

Tabela 6-Temperaturas na broca de 5 mm

Furos		6	7	8	9	11	Média
Rotação		600 RPM					
Velocidade de avanço		75mm/min					
Broca Ø		5 mm					
Temperatura, °C	Entrada	19	16,3	16,6	17,1	17,3	17,26
	Saída	141,7	149	140,5	144,6	141,6	143,38
	Delta T	122,7	132,7	123,9	127,5	124,3	126,22
	Desvio Padrão	3,44					

Tabela 7-Temperaturas na broca de 6 mm

Furos		6	7	8	9	11	Média
Rotação		600 RPM					
Velocidade de avanço		75mm/min					
Broca Ø		6 mm					
Temperatura, °C	Entrada	19,8	17,6	17,3	18,1	18,3	18,22
	Saída	150,3	148,1	148,8	150,3	150,3	149,56
	Delta T	130,5	130,5	131,5	132,2	132	131,34
	Desvio Padrão	1,04					

Para uma melhor visualização dos resultados obtidos para a temperatura na ferramenta, é apresentada a figura 13 com os valores de pico da temperatura, organizados de acordo com os diferentes diâmetros da broca. Observando os resultados da figura 13, verifica-se a influência do diâmetro da broca e como consequência, o aumento da sua temperatura.

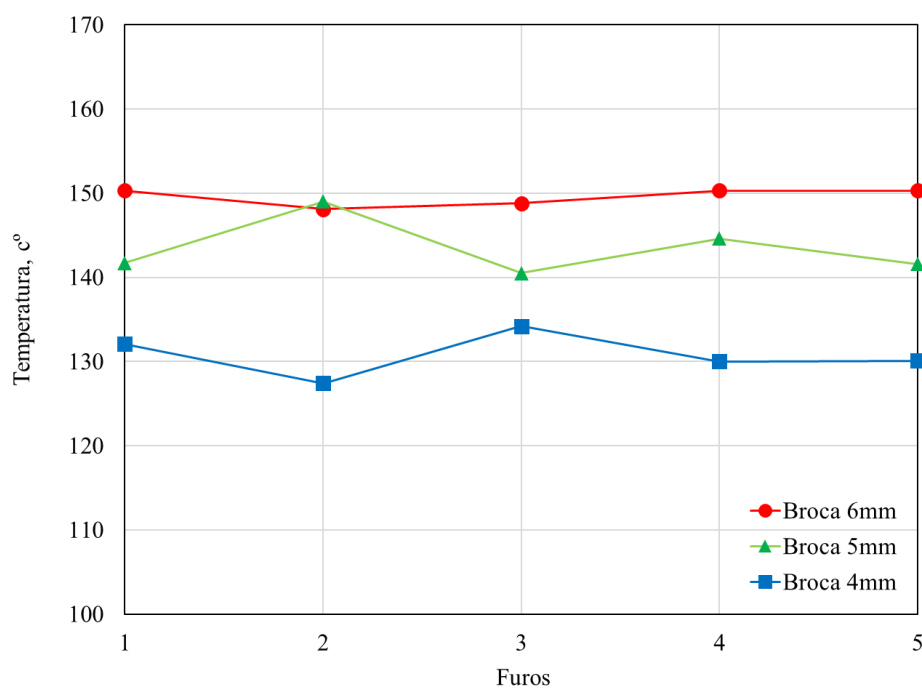


Figura 13-Temperaturas de pico

Capitulo 4

Componente Numérica

4.1. Introdução

A furação em materiais compósitos é bastante complexa devido à sua heterogeneidade, anisotropia, sensibilidade ao calor e pelo facto de os esforços serem extremamente abrasivos, e por isso, traduzirem-se em algumas complicações com impacto direto na qualidade dos furos produzidos. Devido às dificuldades em compreender este complexo processo, novas metodologias alternativas, mais económicas e precisas podem ser utilizadas, através da utilização dos métodos de elementos finitos (MEF).

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de um modelo numérico baseado na formulação de elementos finitos e utilização do programa Ansys. Para dar resposta na análise do problema em estudo, foi utilizado um algoritmo para dinâmica explícita, com comportamento não linear material, contacto entre materiais e estudo de grandes deformações, permitindo a remoção do material. O estudo efetuado permite obter resultados comparáveis com o campo de tensões obtido na superfície do material compósito, sob o processo de furação experimental. No estudo numérico realizado não são consideradas as cargas térmicas provocadas pela furação, uma vez que a calibração entre os modelos é efetuada a 3.5mm de distância do local de furação, e nessa zona o material permanece à temperatura ambiente conforme verificado em laboratório. O modelo numérico desenvolvido está apto para simulações de dinâmica explícita para solicitações mecânicas.

4.2 Método de elementos finitos

A simulação computacional é amplamente utilizada para análise e melhoria na qualidade dos projetos. A utilização do método de elementos finitos tem vindo a evoluir consideravelmente, procurando aperfeiçoar as análises abordadas melhorando a criação de malha de elementos finitos, novas técnicas de modelação, diferentes critérios e algoritmos para a análise de problemas, e com uma apresentação dos resultados que facilitam a utilização desta ferramenta. É possível resolver problemas mais complexos e com maior precisão num curto espaço de tempo, desde problemas lineares estáticos, elasto-plástico simples, a problemas de natureza mais complexa como é o caso dos não-lineares. Numa análise

através de métodos de elementos finitos, todos os fatores são importantes para a aproximação de uma possível situação real. Um problema com uma solução de dinâmica explícita, não-linear, atrito entre as superfícies e remoção material, torna-se assim num processo de cálculo complexo.

Na construção do modelo numérico há diferentes fases. Na fase do pré-processamento todos os parâmetros envolvidos no processo de furação têm que ser considerados: propriedades dos materiais, tipo de elemento, condições de fronteira, parâmetros de furação e geometria do modelo.

Os problemas dinâmicos são mais instáveis do que os estáticos, pois as propriedades dos materiais variam com a taxa de deformação, o material pode sofrer degradação química ou térmica, ou mesmo estar sujeito à fadiga.

Na análise numérica, a principal diferença entre simulações estáticas e dinâmicas, é o método utilizado para a obtenção dos deslocamentos nodais. Ou seja, há o método implícito, indicado para problemas estáticos, e o método explícito para problemas dinâmicos. Os métodos explícitos e implícitos são aproximações utilizadas em problemas numéricos, sempre que as soluções dependam do tempo. Os incrementos de tempo a utilizar no método implícito, problemas lineares, são grandes e a solução obtida mais estável. Por outro lado, os incrementos de tempo são mais reduzidos nos métodos implícitos, em problemas com não linearidades, de forma a resolver os problemas de convergência na solução. O método quase estático é indicado por exemplo, para problemas de estampagem. A figura 14 exemplifica os diferentes métodos possíveis de serem utilizados [29].

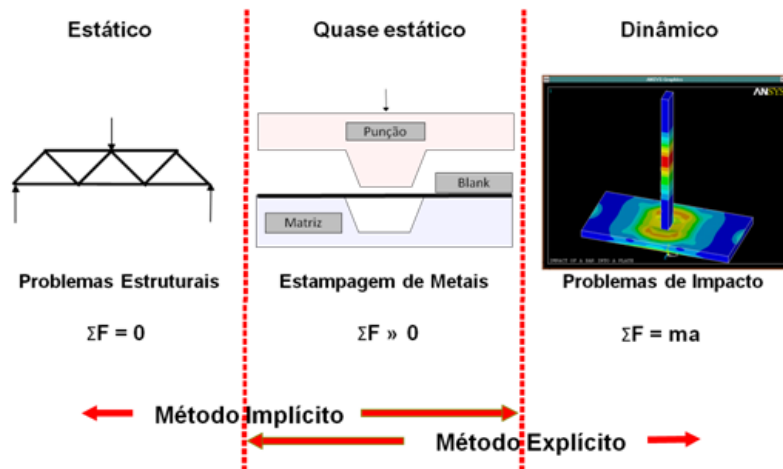


Figura 14- Aplicação dos métodos de integração [29]

A forma mais simples para ilustrar a diferença entre esses métodos advém da forma como são calculados os deslocamentos $\{u\}$ 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 é apresentado na equação (3).

Para modelos totalmente lineares, sem contatos, plasticidade do material ou grande deformações, a equação é sempre estável e podem ser utilizados intervalos de tempo Δt elevados em regime transiente.

Para modelos com não linearidades a matriz rigidez é não linear, sendo necessário utilizar intervalos de tempo Δt mais pequenos para garantir a convergência da solução.

$$\{u_{t+\Delta t}\} = [K]^{-1}\{F_{t+\Delta t}^a\} \quad (3)$$

Diferente das simulações estáticas, 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 $[F^e]$, como ilustra a Equação (4).

$$\{\ddot{u}_t\} = [M]^{-1}([F_t^e] - [F_t^i]) \quad (4)$$

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

$$\{\dot{u}_{t+\Delta t/2}\} = \{\dot{u}_{t-\Delta t/2}\} + \{\ddot{u}_t\}\Delta t_t \quad (5)$$

Agora basta adicionar este deslocamento à posição atual do nó, e obtém-se a posição final do nó para o instante $t+\Delta t$, conforme a equação (6).

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{x_{t+\Delta t}\} \quad (6)$$

Onde: $\{x\}$ - representa a posição final do nó; $\{x_0\}$ - representa a posição inicial do nó; $\{u\}$ - o vetor de deslocamentos;

Neste trabalho foi utilizado o elemento SOLID164, representado na figura 15. O SOLID164 é utilizado para a modelação tridimensional de estruturas sólidas. O elemento é definido por oito nós com os seguintes graus de liberdade em cada nó: translação, velocidades e acelerações nas direções x, y e z [30].

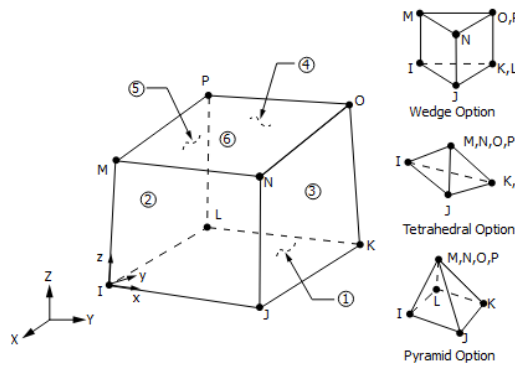


Figura 15-Elemento SOLID164 do ANSYS® [30]

4.3 Modelo Dinâmico de Furação

No decorrer do estudo foram desenvolvidos três modelos numéricos compostos cada um deles, por uma broca e um bloco. A broca apresenta uma geometria variável e complexa pelo que foi necessário a sua execução, através do programa *SolidWorks®* (Versão 2016

Student Edition), com dimensões 4, 5 e 6mm de diâmetro e 75, 83 e 93mm de comprimento (Anexo F). Um dos modelos *CAD*, por apresentar a mesma configuração, é ilustrado na figura 16 como exemplo de uma das brocas.



Figura 16-Exemplo de um dos modelos *CAD* utilizados

Um estudo desta natureza implica um grande esforço de processamento de cálculo, pelo custo computacional elevado. Para minimizar o tempo de simulação, os modelos *CAD* das brocas foram reduzidos para comprimentos de 9,20mm, 9,50mm e 9,80mm, representados na figura 17, unicamente necessários na furação do modelo numérico do bloco compósito também reduzido.

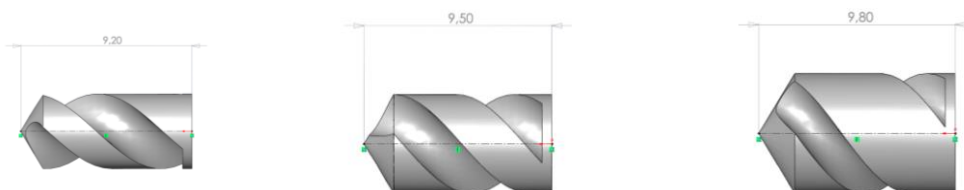


Figura 17-Modelos *CAD* reduzidos das diferentes brocas.

As brocas foram executadas no formato *SAT* para posterior importação no programa *ANSYS®*. Como a geometria do bloco não é complexa foi realizada diretamente no programa *ANSYS®*.

No decorrer do trabalho numérico foram efetuados vários testes, tanto a nível da geometria do bloco como da broca, bem como refinamento de diferentes tamanhos de malhas. Após vários testes de convergência de resultados, o bloco foi considerado unicamente um meio do modelo inicial atendendo à simetria da geometria, como se ilustra na figura 18. O dispêndio computacional é assim mais rápido, e com esta geometria é possível a visualização no interior do compósito quando a broca remove o material.

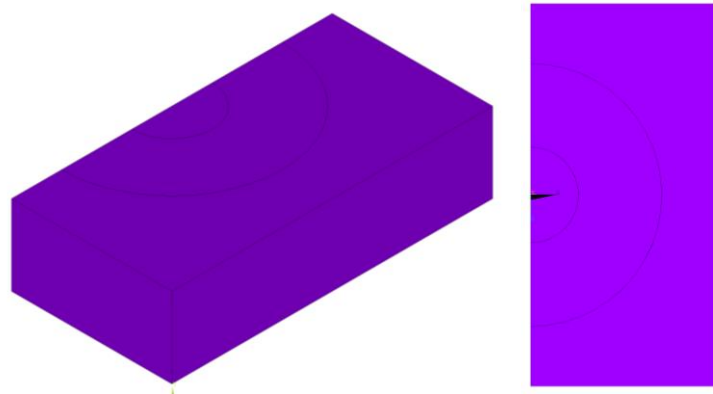


Figura 18-Divisão do bloco, vista isométrica e de topo.

De seguida, foi escolhida a malha de elementos finitos para ambos os componentes. Inicialmente, foi escolhido um tamanho de elemento de 1mm para a broca e de 0,5mm para os dois semicírculos (figura 18) e 1mm para a restante área do bloco. Foram efetuadas diferentes simulações numéricas e analisados os resultados obtidos. No entanto, e para uma melhor convergência de resultados, foi escolhida, tanto para a broca como o bloco uma malha sólida tetraédrica de 0,5mm, figura 19.

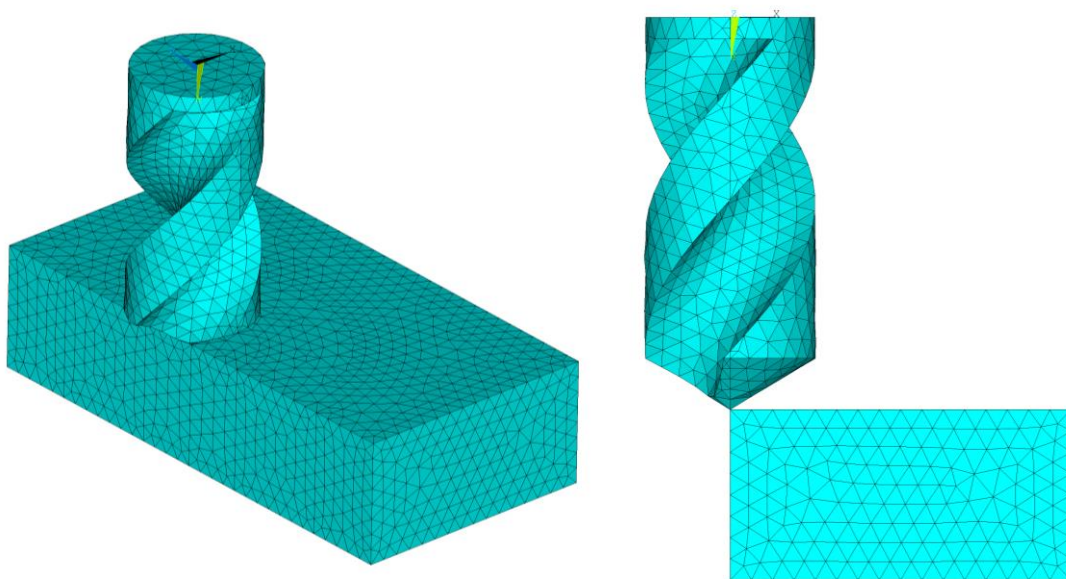


Figura 19-Malha de elementos finitos igual para ambos os componentes

Contudo, para o modelo funcionar corretamente é necessário definir um conjunto de parâmetros e condições de fronteira, tais como velocidade de avanço e de rotação da broca e as condições de apoio.

Para a análise do problema foram considerados dois modelos numéricos diferentes, atendendo à imposição das condições de fronteira. Num modelo, a principal condição de constrangimento é aplicada na base do bloco e no outro modelo, e em adição, também foram fixas as faces adjacentes ao eixo de simetria. Ambos os modelos têm a condição de plano de simetria vertical, devido à utilização de metade do bloco, para a direção x, como se verifica na figura 20.

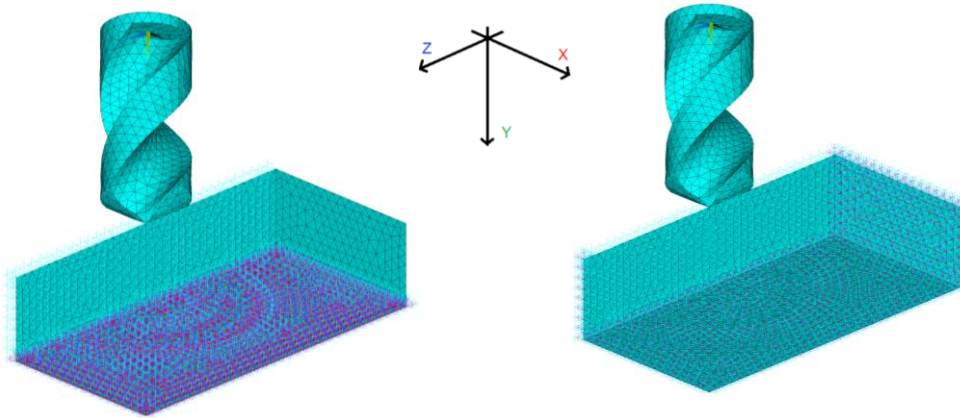


Figura 20-Representação de várias condições de fronteira aplicadas ao bloco

4.3.1. Modelação do comportamento material

No presente estudo, o comportamento do material compósito, considerado como uma espuma de poliuretano rígida sólida, foi considerado elástico-plástico, dependendo da taxa de deformação e do critério de deformação. O modelo utilizado é o de Cowper-Symonds, que considera a tensão de cedência dependente da taxa de deformação, equação (7). As contribuições podem ser isotrópicas, cinemáticas ou mistas; em que a sua variação do parâmetro de endurecimento pode ser para uma análise linear isotrópica ($\beta=1$), ou cinemática ($\beta=0$), ou mista ($0<\beta<1$) [7].

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (7)$$

Na equação σ_y é a tensão de cedência do material, σ_0 é a tensão de cedência inicial, β o parâmetro de endurecimento por deformação plástica, C e P são parâmetros de Cowper-

Symonds, ε_p^{eff} é a intensidade da deformação plástica e E_p o 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 (8):

$$E_p = \frac{E_{tan}E}{E - E_{tan}} \quad (8)$$

A lei de Cowper-Symonds, disponível na biblioteca de materiais do programa de elementos finitos, permite a definição do material compósito do bloco. A broca foi modelada como um corpo rígido para reduzir o tempo e os recursos computacionais, com alta rigidez quando comparado com o material compósito de espuma rígida. As propriedades mecânicas utilizadas em todos os modelos numéricos estão representadas na tabela 8.

Tabela 8- Propriedades Mecânicas na análise numérica [7]

Propriedades	Broca	Material Compósito
Massa volúmica [kg/m^3]	7850	800
Módulo de Young [MPa]	200000	987,16
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3
Tensão de cedência inicial [MPa]		22,59
Módulo tangente [MPa]		0,91
Parâmetros de endurecimento		0,1
Parâmetros do material (C)		2,5
Constante do material (P)		7
Critério de erosão por deformação (ε_{lim}^{eff})		0,05

4.3.2. Contacto e remoção do material

Dependendo do processo que se pretende simular e para obtenção de uma boa solução, é necessário a escolha de um algoritmo de contacto disponível no programa. A interação entre os materiais permite simular o contato entre a broca e o material compósito para a definição e a remoção de elementos durante o processo. A superfície de contacto é atualizada à medida que os elementos na superfície livre são excluídos de acordo com os critérios de falha do material. Neste trabalho, foi considerado um critério de erosão por deformação igual a 0,05. Além disso, o intervalo de tempo é ajustado automaticamente para satisfazer o contacto entre as diferentes partes. Pode considerar-se sem atrito o contacto entres superfícies quando existem pequenos deslocamentos entres partes, ou com atrito no caso de existirem grandes deformações inelásticas. No presente estudo, o atrito

entre a broca e o material compósito assumem um coeficiente de atrito de 0,3 ditado pela Lei de Coulumb [7].

Quando existe a remoção de elementos durante a análise numérica, a escolha recai no parâmetro ‘erosão’ no contato entre as superfícies do bloco e da broca. Durante o processo de furação de material, ocorre remoção dos elementos quando estes atingem o seu limite durante a deformação plástica. De acordo com o tipo de variável a utilizar, existem diferentes critérios de erosão. Neste estudo foi utilizado o critério por falha de deformação, ou seja, a erosão começa quando o limite de deformação geométrico é atingido em concordância com a Equação (9).

$$\frac{2}{3}\sqrt{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) + 5(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_3\varepsilon_1 + \varepsilon_3\varepsilon_2) - 3(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{13}^2)} \gg \varepsilon_{lim}^{eff} \quad (9)$$

Onde ε_{lim}^{eff} é o critério limite por deformação e $\varepsilon_i, \varepsilon_{ij}$ são as componentes de deformação ($i, j = 1, 2, 3$).

4.4 Análise de Tensões

Nesta subcapítulo são expostos os resultados obtidos na componente numérica. Estes valores foram agrupados para os diferentes diâmetros utilizados.

A comparação de resultados é efetuada através da média obtida em 11 valores nodais que correspondem ao local onde foram colocados os extensômetros. Esses resultados foram obtidos em concordância e sempre nos mesmos pontos nodais, para o instante de tempo de 3 segundos. Durante a calibração do modelo numérico, os valores médios registados correspondem aos pontos nodais que melhor aproximam à solução experimental. Na tabela 9 apresentam-se os resultados médios da tensão e da deformação normal, na direção z que corresponde à leitura realizada pelo extensômetro na superfície do bloco. Os resultados numéricos apresentados foram obtidos com o modelo sem constrangimentos laterais.

Tabela 9-Resultados para a tensão normal (MPa) e deformação normal, modelo sem constrangimentos laterais

Tempo de furação 3 segundos				
Broca Ø	Velocidade de avanço	Velocidade de rotação	σ_{ZZ}	ϵ_{ZZ}
4 mm			0,35	0,00036
5 mm	75mm/min	600RPM	0,49	0,00051
6 mm			0,59	0,00061

Observando a tabela 9, à medida que o diâmetro da broca aumenta, regista-se um aumento da deformação normal e conseqüentemente na tensão normal. Os resultados experimentais apesar de ligeiramente inferiores, apresentam a mesma relação no aumento da deformação e da tensão. Os resultados exprimem assim concordância entre os valores experimentais e numéricos.

Para uma melhor visualização do comportamento das tensões obtidas no modelo compósito, é apresentada a distribuição das tensões equivalentes de von Mises, para diferentes intervalos de tempo, com a imposição da velocidade de avanço e rotação constantes, nos vários modelos de brocas de tamanhos diferente, figura 21. Estes resultados são relativos ao modelo numérico em que o bloco se encontra unicamente fixo na base, sem constrangimentos laterais.

Na figura 22 apresentam-se também as tensões de von Mises, mas considerando agora o modelo numérico com as condições de fronteira laterais.

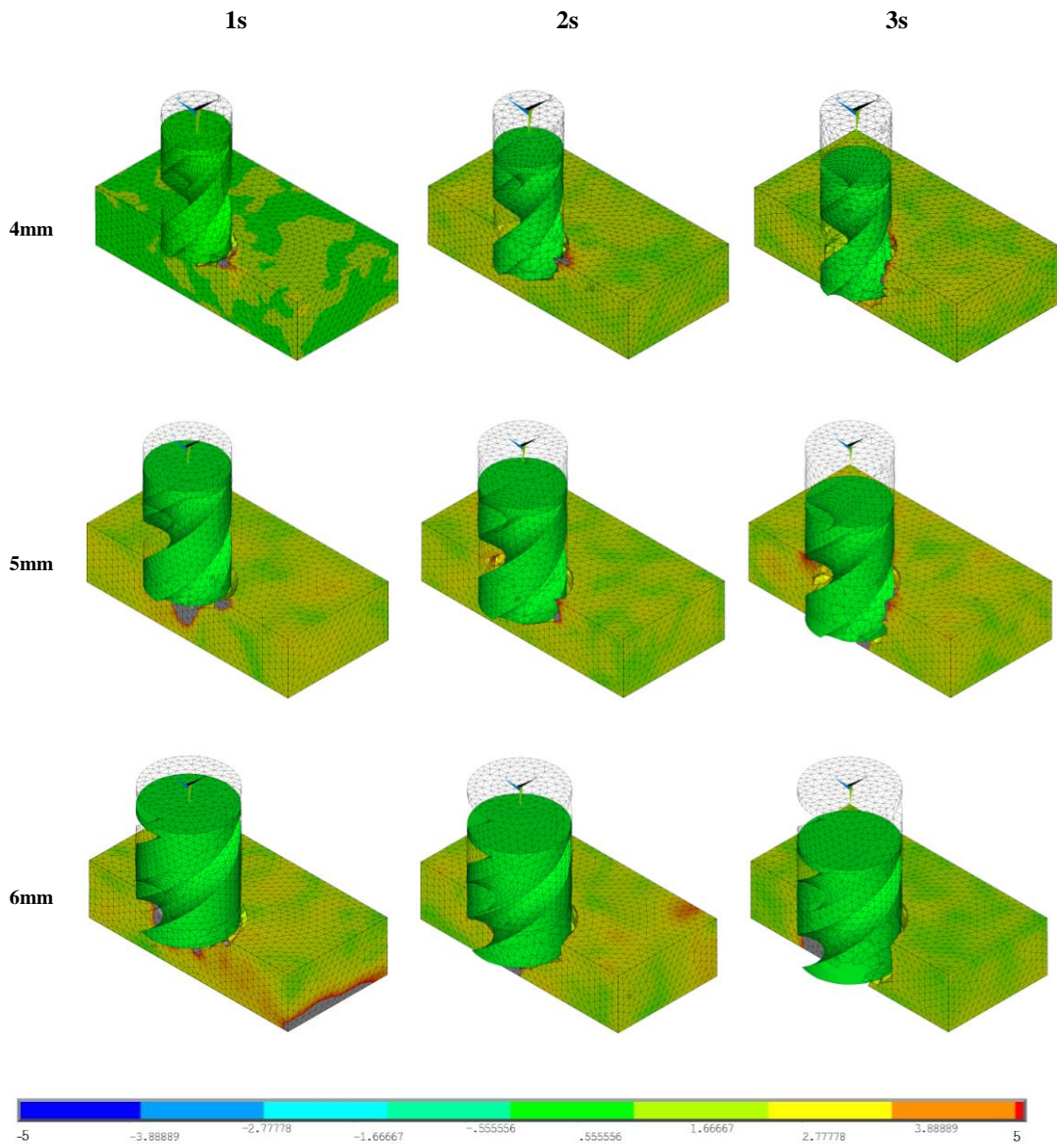


Figura 21-Distribuição da tensão equivalente de von Mises, MPa (modelo sem constrangimento lateral)

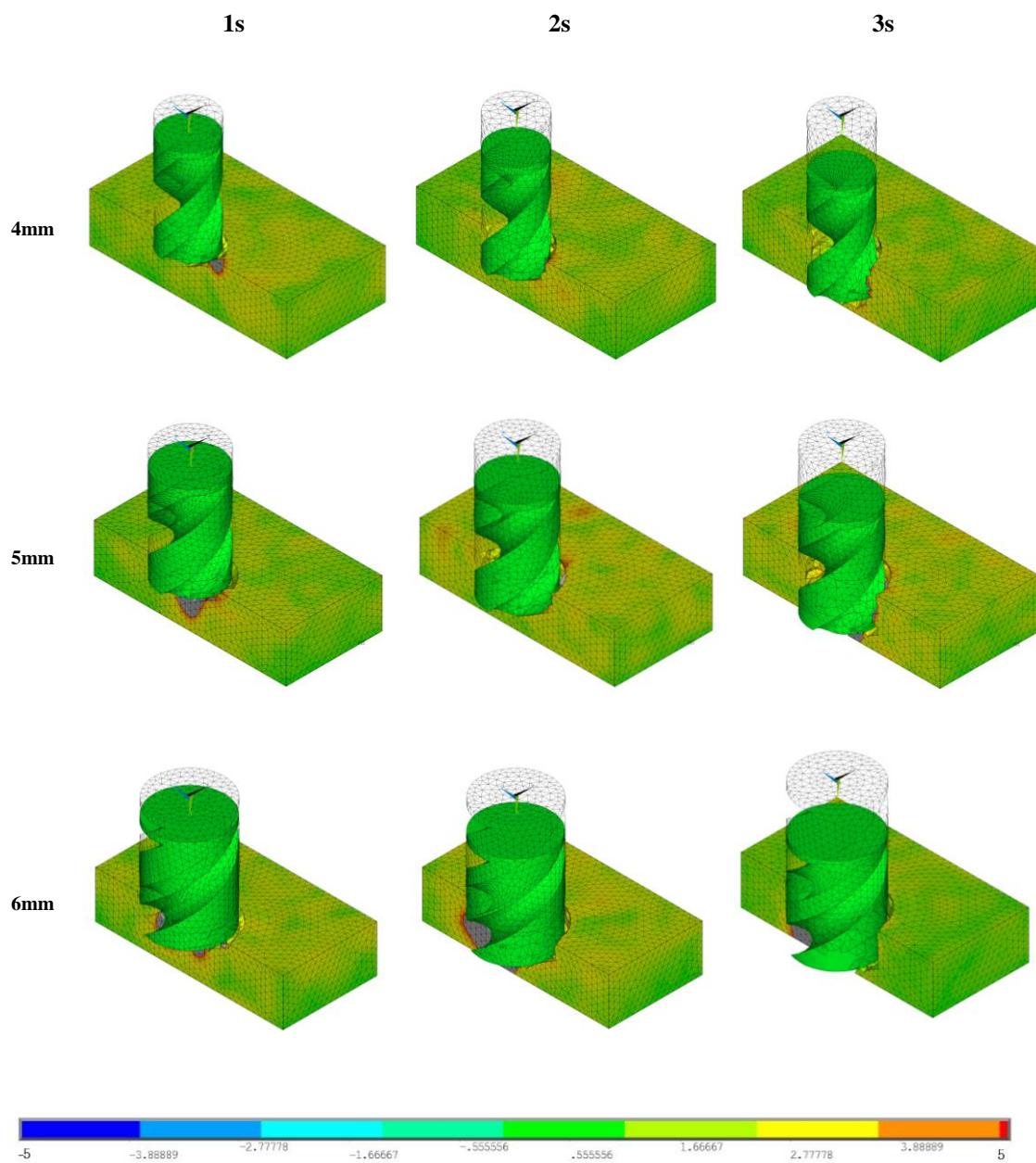


Figura 22- Distribuição da tensão equivalente de von Mises, MPa (modelo com constrangimento lateral)

Capítulo 5

Comparação de Resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as comparações entre os resultados experimentais e os resultados numéricos. Para uma comparação idêntica entre ambas as metodologias, os resultados são comparados em relação a um intervalo de tempo igual a 3 segundos nos vários modelos, em função dos diâmetros das brocas.

5.2. Análise de Tensões

5.2.1. Comparação experimental e numérica, modelo numérico sem constrangimento lateral

Na figura 23 são apresentados os resultados das tensões normais experimentais e numéricas no modelo sem constrangimento lateral, para um instante de tempo de 3 segundos, obtidos para as brocas de 4, 5 e 6 mm.

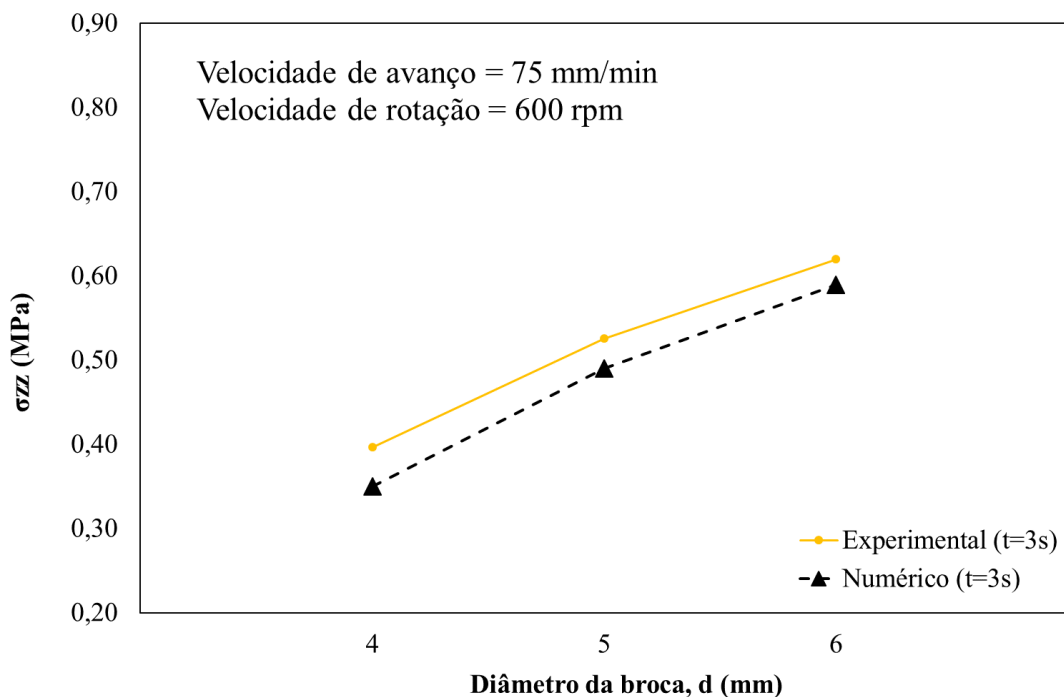


Figura 23- Resultados experimental e numérico para a tensão normal

Observando os resultados, verifica-se que com a variação do diâmetro da broca existe um aumento da tensão normal para o mesmo tempo de furação, ou seja, quanto maior é a geometria da broca, maior é o campo de tensão gerado na superfície do bloco.

Na figura 24 são apresentados os resultados das deformações normais do estudo experimental e numérico no modelo sem constrangimento lateral, para o instante de 3 segundos e brocas de 4, 5 e 6 mm.

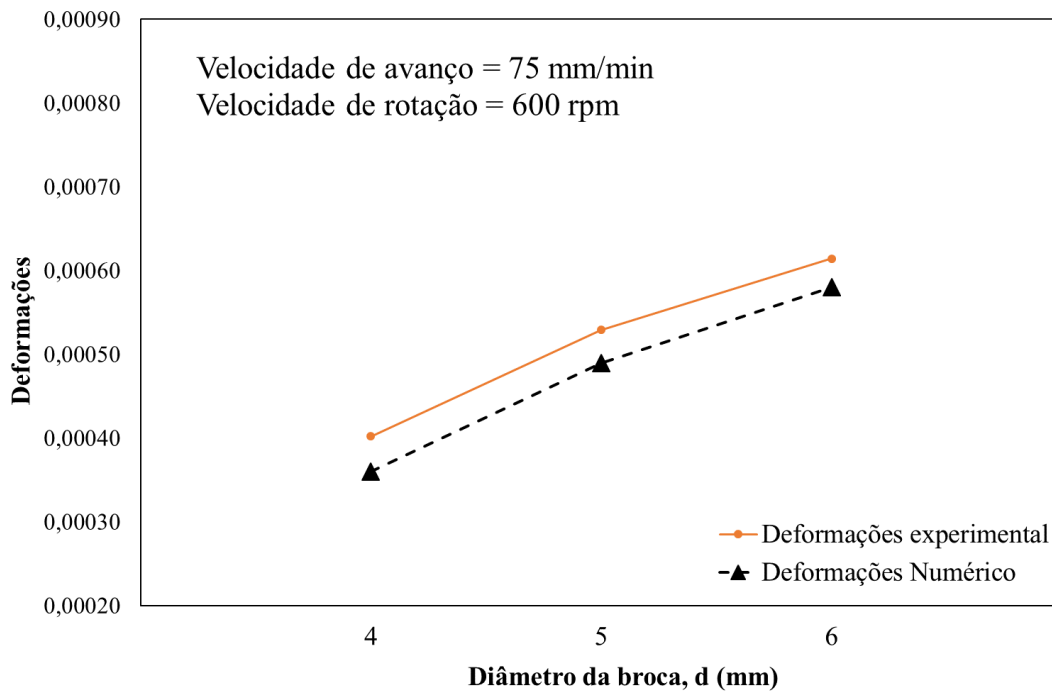


Figura 24- Resultados experimental e numérico para a deformação normal

Analisando os valores da deformação verifica-se concordância com o gráfico dos valores da tensão. De facto, as tensões são geradas a partir das deformações, sendo apenas convertidas para unidades diferentes em função da Lei de Hooke.

Em termos de comparação, os valores da tensão normal e deformação retirados experimentalmente são ligeiramente superiores aos resultados numéricos, mas apresentam valores muito semelhantes, que permite concluir que o modelo numérico sem constrangimento lateral, para o processo de furação, se encontra calibrado.

5.2.2. Comparação entre modelos numéricos, sem e com constrangimento lateral

Foram ainda efetuadas comparações entre os modelos numéricos com condições de fronteira diferentes.

A tabela 10 representa os valores médios de tensão e deformação normal para o instante de tempo 3 segundos, no modelo numérico com constrangimentos na base e no plano de simetria material.

Tabela 10- Valores médios de tensão e deformação, modelo sem constrangimento lateral

Broca	Média σ_{zz} (MPa)	Média ϵ_{zz}
4mm	0,35	0,00036
5mm	0,49	0,00050
6mm	0,59	0,00060

A tabela 11 representa valores de tensão e deformação, utilizando os mesmos pontos nodais anteriores, mas considerando agora o modelo numérico que para além dos constrangimentos da base e do plano de simetria, contém constrangimentos nas paredes laterais do compósito.

Tabela 11- Valores médios de tensão e deformação, modelo com constrangimento lateral

Broca	Média σ_{zz} (MPa)	Média ϵ_{zz}
4mm	0,13	0,00014
5mm	0,14	0,00015
6mm	0,16	0,00017

Comparando as duas tabelas, verifica-se que com a variação do diâmetro da broca, a tensão normal e as deformações aumentam. Verifica-se uma diminuição de valores para a tensão e deformação no bloco que apresenta a imposição de condições de fronteira nas faces laterais ao eixo simetria. A presença de constrangimentos laterais impõe um nível de maiores esforços nesta zona, sendo que as tensões distantes desta zona poderão sofrer uma redução. Esta observação poderá justificar esta ligeira diminuição de tensões.

Na figura 25 representa-se a distribuição das tensões equivalentes de von Mises para o instante de tempo igual a 2,5 segundos, para ambos os modelos numéricos.

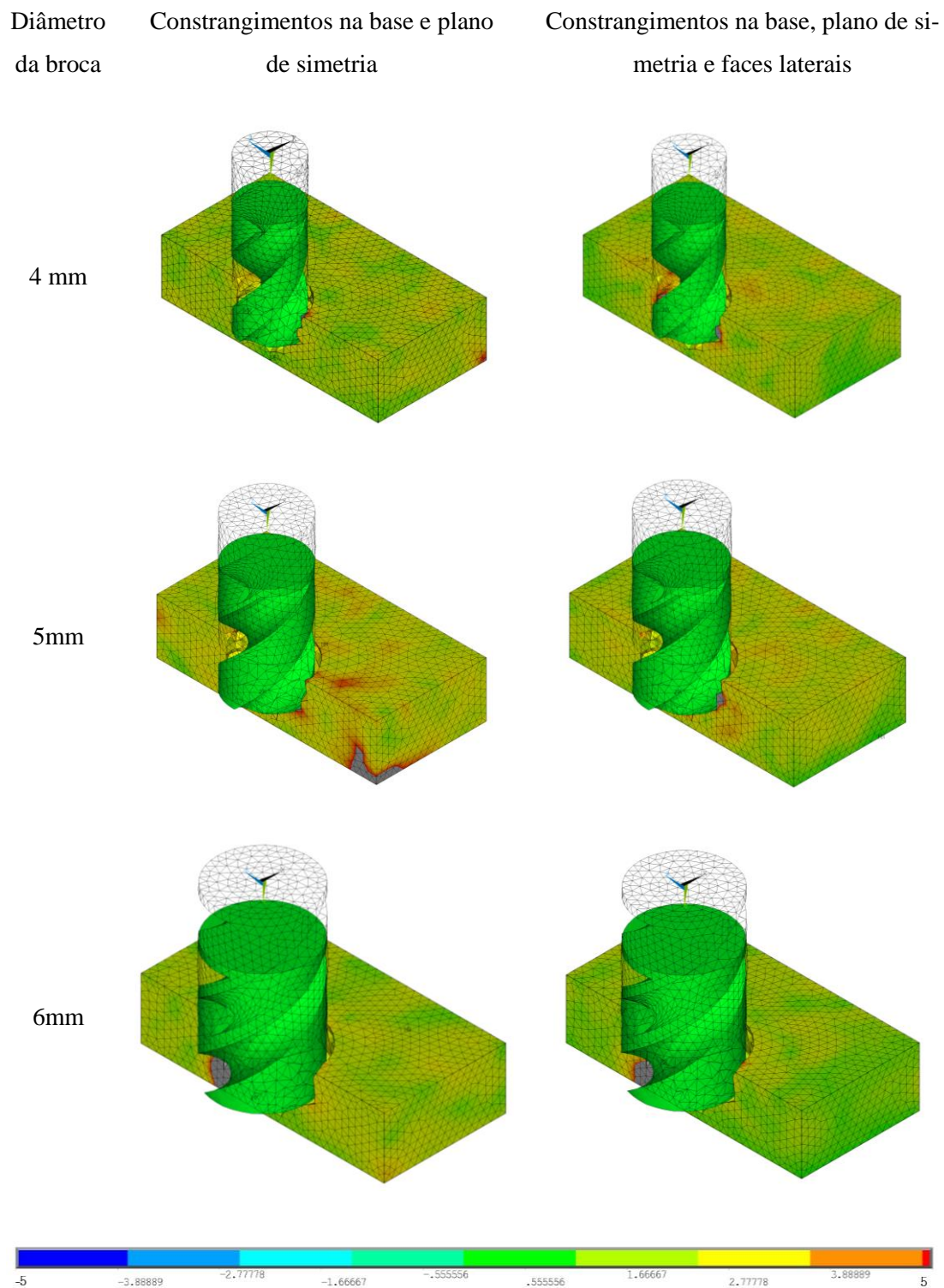


Figura 25-Distribuição da tensão de von Mises, MPa, comparação entre modelos numéricos

Capitulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a análise de tensões geradas num material compósito sob furação, utilizando diferentes parâmetros. Foram realizados testes experimentais e numéricos de forma a observar os efeitos gerados pela furação nestes materiais utilizando ferramentas de corte com diferentes diâmetros. Os resultados deste trabalho foram publicados [8] e vieram assim completar a investigação que tem vindo a ser desenvolvida, no âmbito de processos de furação, utilizando diferentes outros parâmetros e materiais distintos [6], [7], [25].

No primeiro ensaio experimental foram efetuados um total de 18 furos, tendo sido realizado posteriormente um novo ensaio com mais 12 furos. Durante a execução dos ensaios, foram também registadas imagens termográficas da temperatura na broca, no início e logo após cada furação.

Concluiu-se que na parte experimental, as tensões registadas na superfície do bloco são superiores para um diâmetro de broca 6 mm e são inferiores quando utilizada a broca de diâmetro 4 mm, sendo que para a broca de diâmetro 5 mm os valores obtidos são intermédios. O valor máximo do campo de tensão atinge o seu pico no final de cada furação. A variação das temperaturas da ferramenta de corte tem como consequência a variação da geometria da broca, ou seja, o seu diâmetro. Sem variar os parâmetros de furação relativos à velocidade de rotação e de avanço, o aumento de diâmetro proporciona o aumento da temperatura gerada.

Relativamente aos testes numéricos, foram realizadas várias simulações para ajuste e calibração do modelo pretendido. Neste relatório apresentam-se as 3 simulações numéricas finais com condições de fronteira no apoio da base do bloco, e ainda as 3 simulações adicionais também finais, com condições de fronteira diferentes pela inclusão de apoio fixo em duas direções laterais do bloco.

Conclui-se que na parte numérica, o campo de tensão apresenta a mesma tendência em comparação aos ensaios experimentais para as 3 simulações numéricas no modelo sem constrangimentos laterais, com ligeiro aumento de valores. De referir que o processo de furação apresenta uma complexidade elevada associada às propriedades dos materiais, aos parâmetros de furação, ao próprio problema de origem dinâmica. As últimas 3 simulações apresentadas têm por base a comparação somente numérica, isto é, verifica-se que quando são aplicadas as condições de fronteira de fixação lateral ao modelo, há uma diminuição do campo de tensão gerado no processo de furação, para os pontos nodais considerados no registo.

6.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, e na continuação do estudo deste tema poderão propor-se:

- Estudo de novos modelos numéricos com novas condições de fronteira.
- Utilizar diferentes malhas de elementos finitos no estudo numérico.
- Utilizar outro tipo de materiais para teste.
- Utilização de rosetas de extensómetros em várias direções para análise de tensões.
- Utilização de outros programas de elementos finitos com capacidade de cálculo dinâmico, com a inclusão do efeito da temperatura gerada pela broca.

Referências bibliográficas

- [1] Jorge Rodrigues, Paulo Martins, "Tecnologia Mecânica. Tecnologia da deformação Plástico-Vol. 1 Fundamentos teóricos" 2ª edição, vol.1, Escolar Editora, Lisboa, Portugal.
- [2] Lucas F.Martins Da Silva, Fernando J.Lino Alves, António T.Marques, "Materiais de Construção", Publindústria, edições Técnicas, Porto, Portugal.
- [3] De Moura, M.F.S.F, de Moraes, A.B., Magalhães, A.G., "Materiais Compósitos Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico", Publindústria, 2ª Edição, (2009).
- [4] Anabela Mendes Moreira; Materiais de construção I, Materiais Compósitos: Departamento de engenharia Civil área de construção: Instituição de ensino superior de tecnologia de ensino, (2008/2009).
- [5] Singh G, Jain V, Gupta D, Ghai A. Optimization of process parameters for drilled hole quality characteristics during cortical bone drilling using Taguchi method. *J Mech Behav Biomed Mater*, 62, p.355-65, (2016).
- [6] Fernandes MG, Fonseca EMM, Natal R. Thermal analysis during bone drilling using rigid polyurethane foams: numerical and experimental methodologies. *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 38, p.1855-1863 (2016).
- [7] Fernandes MG, Fonseca EMM, Jorge RN. Three-dimensional dynamic finite element and experimental models for drilling processes. *Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications*, p. 1-9. doi.org/10.1177/1464420715609363 , (2015).
- [8] Teixeira, T., Fernandes M.G., Azevedo L., Fonseca E.M.M., Natal R., Influence of drill bit diameter on drilling of polyurethane foams. *7th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Proceedings M2D2017*, J.F.Silva Gomes and S.A. Meguid (Eds.), Publ. INEGI/FEUP, ISBN: 978-989-98832-7-7, pp. 843-852, Albufeira, 11-15 June (2017).
- [9] Khashaba, U.A. "Delamination in Drilling GFRThermoset Composites". *Composite Structures*: 63;313-327 (2004).

- [10] Hocheng, H., Dharan, C. K. H., “*Delamination During Drilling in Composites Laminates*”, Journal of Engineering for Industry, 112: 236-239, (1990).
- [11] Piquet, R., B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider, “*Experimental Analysis of Drilling in Thin Carbon/Epoxy Plate using Special Drills*”, Composites: Part A, 31: 1107-1115, (2000).
- [12] Roy Meade L. E. Wilson, “*Machining, Assembly and Assembly Forms*”, Engineered Materials Handbook, vol1 Composites, ASM International, 9: 667-672, (1987).
- [13] Tsao, C. C., Hosheng, H., “*The Effect of Chisel Length and Associated Pilot Hole on Delamination when Drilling Composite Materials*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, pp. 1087-1092, (2003).
- [14] Durão L. M. P., A. T. Marques, A. G. Magalhães, A. M. Baptista, “*Maquinagem de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica*”, VI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica – CIBEM6, Coimbra – Portugal, vol. II, pp. 1073-1078, (2003).
- [15] Lopez de Lacalle, L.N.; Perez, J., Llorente, J.I, Sanchez, J.A, Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys, Journal of Materials Processing Technology, V. 100, p.1-11, (2000).
- [16] Tsao, C.C; Hocheng, H., Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill, International Journal of Machine Tools &Manufacture, V.45, p. 1261-1270, (2005).
- [17] Durão, L.M.P.; Magalhães, A.G.; Marques, A.T.; Tavares, J. M.R.S.; Baptista, A.P.M. Damage analysis of carbon/epoxy plates after drilling, Int. Journal of Materials and Product Technology, V.32, p. 226-242, (2008).
- [18] Davim, J.P; Reis, P., Drilling carbon fibre reinforced plastics manufactured by auto-clave – experimental and statistical study, Materials and Design, V. 24, p. 315-324, (2003).

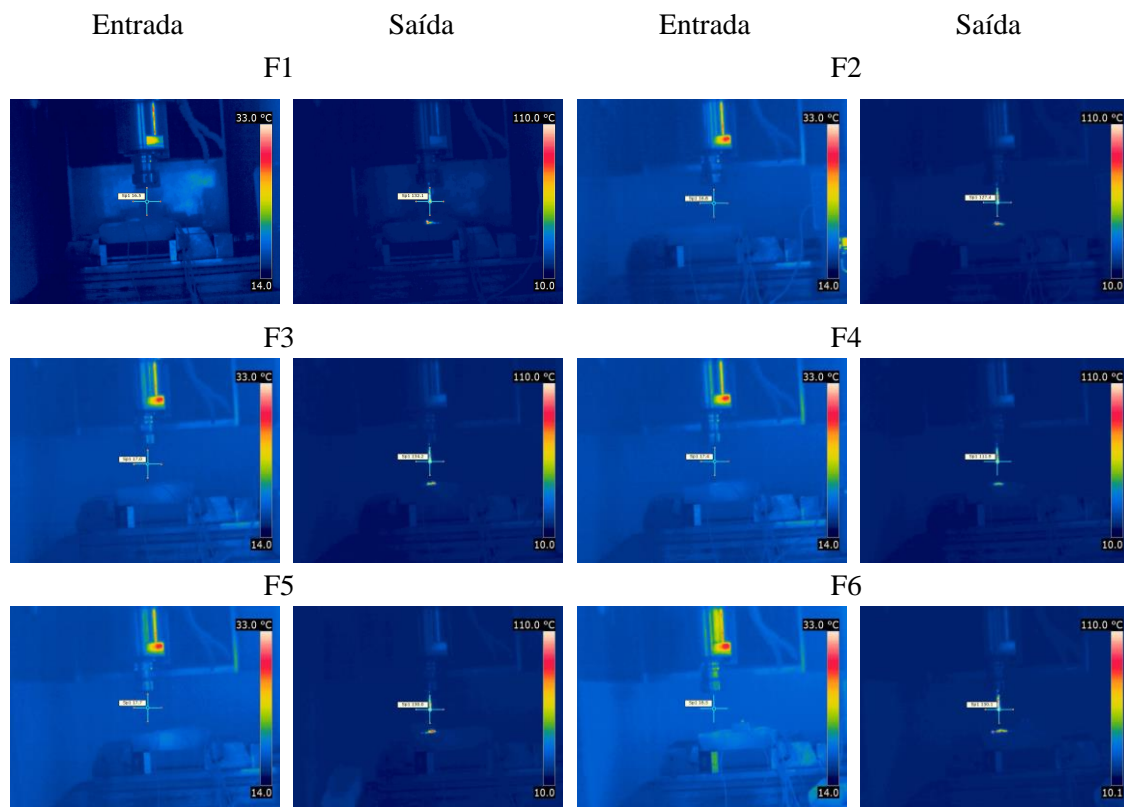
-
- [19] João Guimarães, Luis M.Durão, F.Jorge Lino, A.Baptista, Tiago Fernandes, Pedro Pacheco; Novas Ferramentas para maquinação de compósitos com aplicação na área de transportes. *Artigo: Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*, Porto, Portugal
- [20] A. Completo, A. Festas, J.Paulo Davim, “Tecnologia de fabrico”, *Publindústria* p32 a 34
- [21] Ricardo Jorge S. Chita; Estudo da delaminação em compósitos. *Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto*, (2012)
- [22] Hugo Alexandre S. Lúcio; Comportamento do osso cortical submetido a processos de furação. *Tese de Mestrado em Tecnologia Biomecânica. Instituto Politécnico de Bragança*, (2015).
- [23] S. R. H. Davidson and D. F. James, “Measurement of thermal conductivity of bovine cortical bone,” *Medical Engineering & Physics*, vol. 22, no. 10, pp. 741 – 747, (2000).
- [24] L. S. Matthews, C. A. Green, and S. A. Goldstein, “The thermal effects of skeletal fixation-pin insertion in bone,” *Journal Bone Joint Surgery*, vol. 66, no. 7, pp.1077-83, (1984).
- [25] Sampaio, Cátia; Avaliação térmica provocada pela furação óssea. *Tese de Mestrado em Tecnologia Biomédica. Instituto Politécnico de Bragança*, (2014).
- [26] Davidson S. R. Heat transfer in bone during drilling. *A thesis for degree of Master of Applied Science Graduate Department of Mechanical and industrial Engineering Institute of Biomaterials and Biomedical Engineering. University of Toronto*. (1999).
- [27] “FLIR T365 Infrared Thermal Camera,” [Online]. Available: <http://www.flircameras.co.uk/flir-t365-infrared-thermal-camera.html>. [Acedido em 22 05 2017].
- [28] Vladimir. GOGA, “finite element model of the strain gauge for determining uniaxial tension”, *Technical University of Ostrava, Mechanical Series. N°2, Vol LIX*, (2013).

[29] [online] Available <https://eaiconvergiu.wordpress.com/2013/01/29/as-diferencas-entre-os-metodo-implicito-e-explicito/> [Acedido em 28/08/2017]

[30] *Ansys Tutorial*, Finite Element Description.

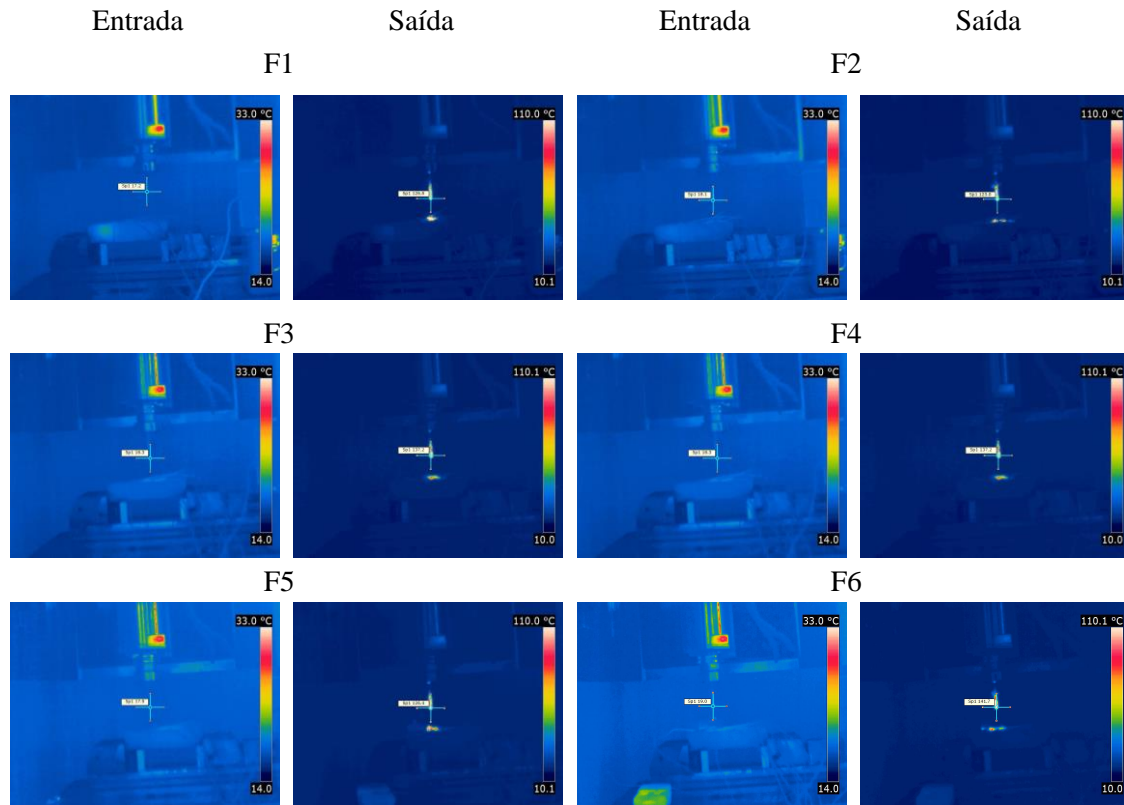
Anexo A

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondente ao bloco 1 para a broca de 4mm.



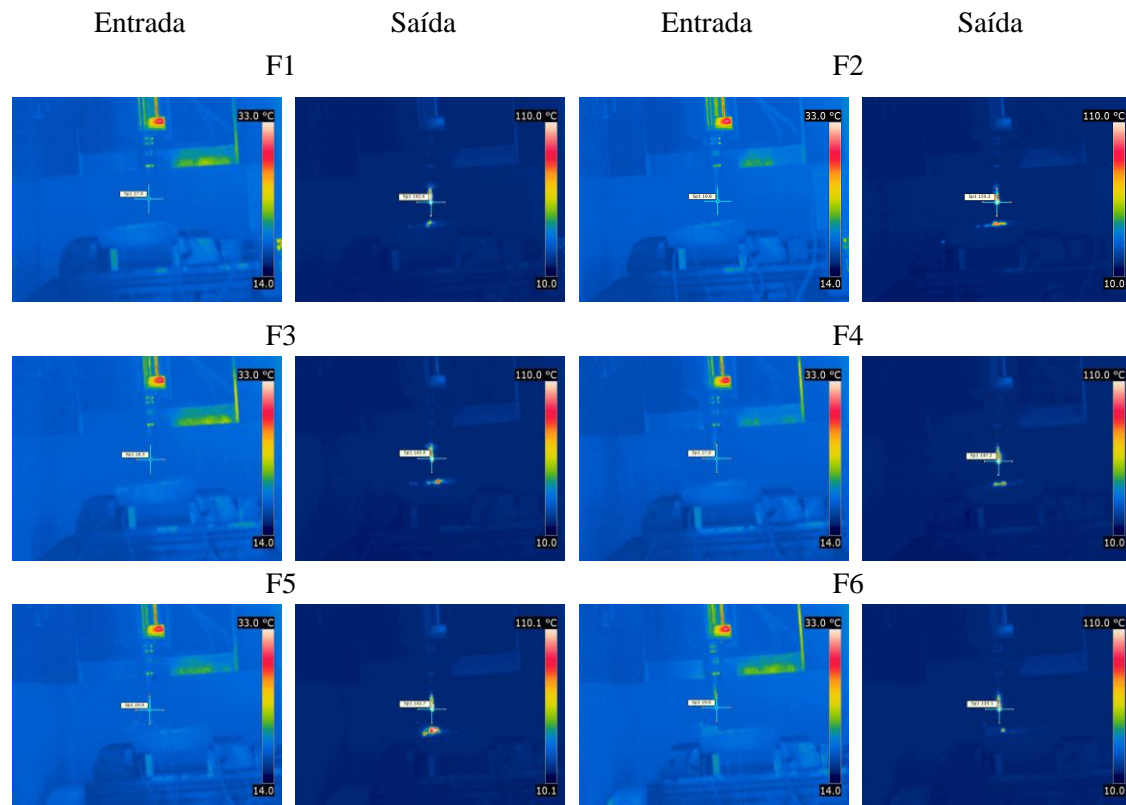
Anexo B

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondente ao bloco 1 para a broca de 5mm.



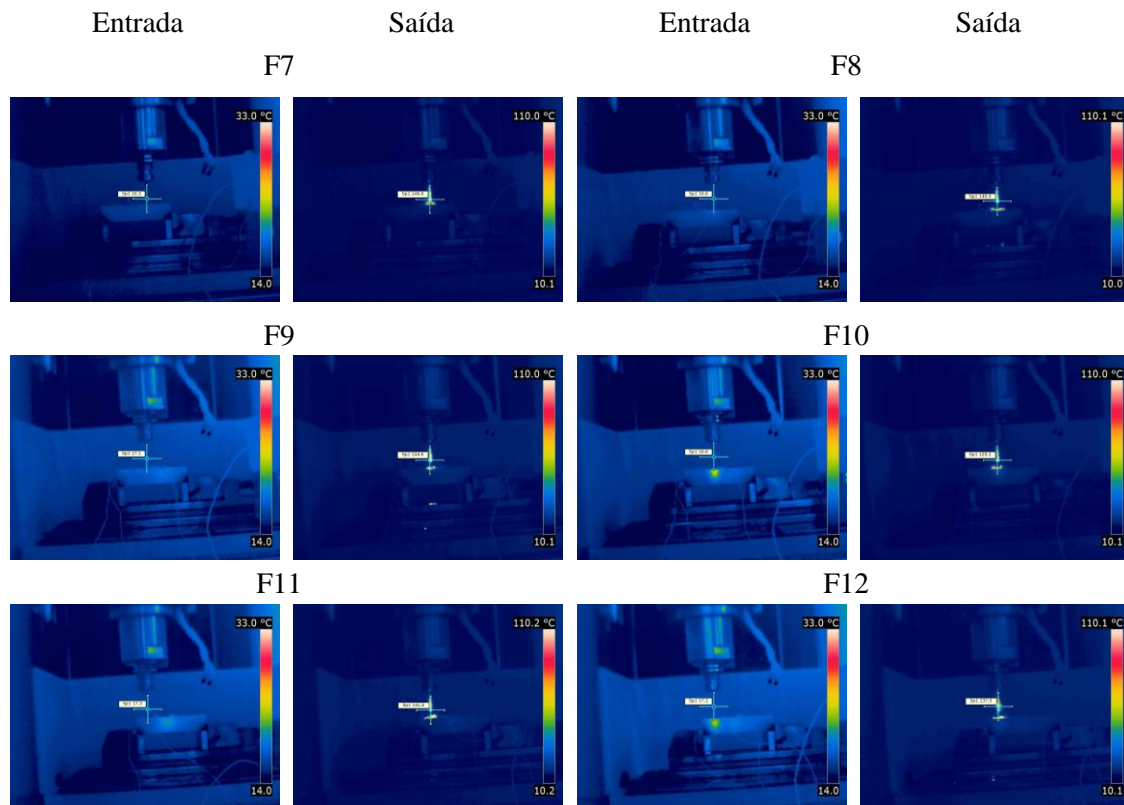
Anexo C

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondente ao bloco 1 para a broca de 6mm.



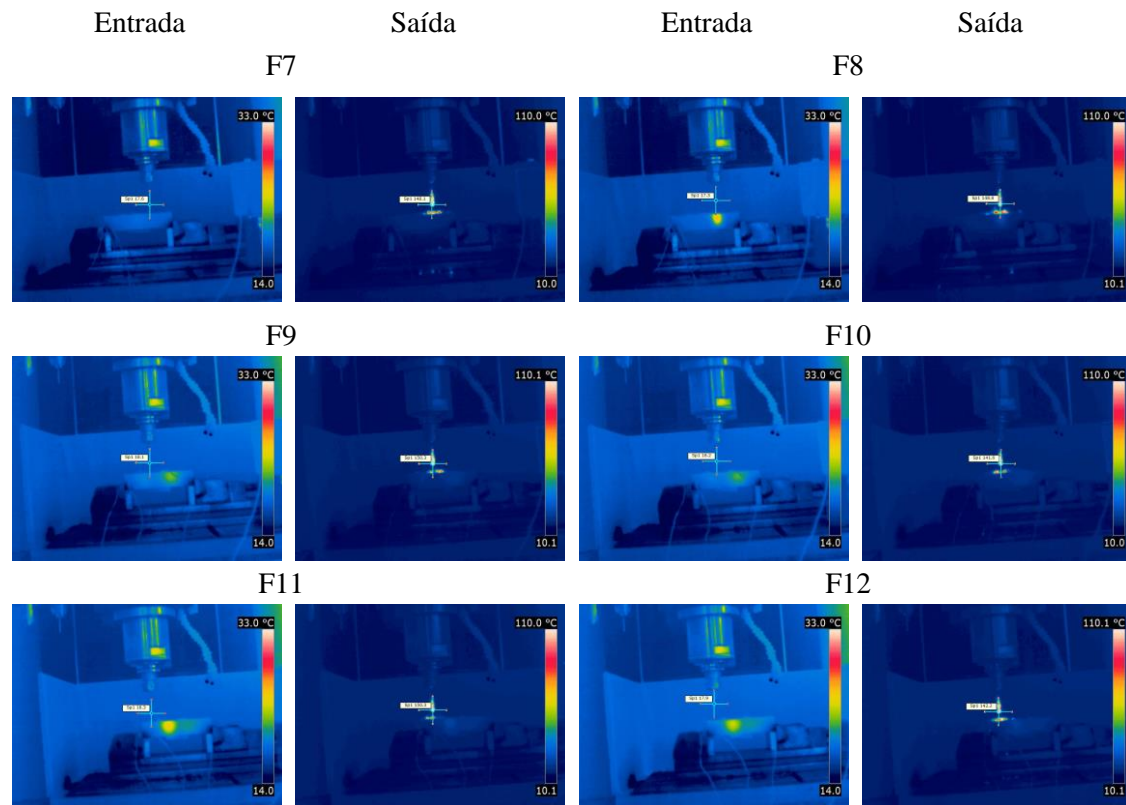
Anexo D

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondente ao bloco 2 para a broca de 5mm.



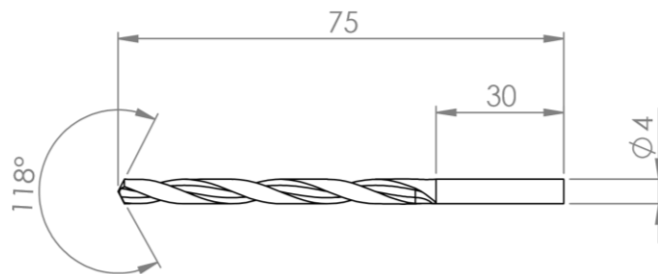
Anexo E

Imagens termográficas antes e após cada furação correspondente ao bloco 2 para a broca de 6mm.

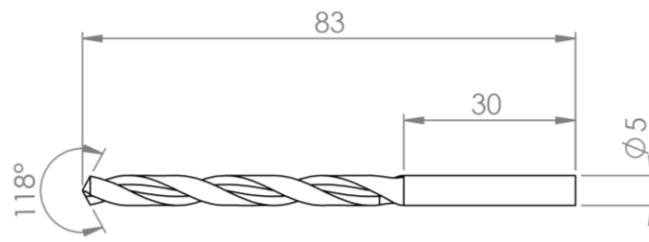


Anexo F

Broca de 4mm.



Broca de 5mm.



Broca de 6mm.

