



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



JÚLIA NASCIMENTO COSTA

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS
PARÂMETROS DE CORTE NA TEMPERATURA DO PROCESSO
DE FURAÇÃO**

OURO PRETO - MG
2019

JÚLIA NASCIMENTO COSTA
ju.nascimentocosta@gmail.com

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS
PARÂMETROS DE CORTE NA TEMPERATURA DO PROCESSO
DE FURAÇÃO**

Monografia apresentada ao
Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito para a
obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Igor César Pereira

Professor coorientador: DSc. Alisson Augusto Azevedo Figueiredo

OURO PRETO – MG
2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C837a Costa, Julia Nascimento .
Análise numérica e experimental da influência dos parâmetros de corte na temperatura do processo de furação. [manuscrito] / Julia Nascimento Costa. - 2019.
63 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Igor César Pereira.
Coorientador: Prof. Dr. Alisson Augusto Azevedo Figueiredo.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

1. Perfuração direcional . 2. Controle de temperatura. 3. Perfuração e broqueamento - Velocidade de corte. 4. Metais - Corte - Estimativa de parâmetros. 5. Método dos elementos finitos . 6. Cortadora - Geração de calor. 7. Usinagem . I. Figueiredo, Alisson Augusto Azevedo. II. Pereira, Igor César. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

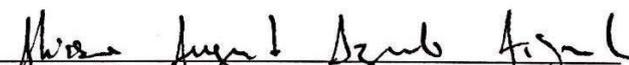
ATA DA DEFESA

Aos 06 dias do mês de dezembro de 2019, às 09h 00min, na sala 06, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno Júlia Nascimento Costa, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia, Prof. DSc. Edson Alves Figueira Junior, Prof. DSc. Alisson Augusto Azevedo Figueiredo e o Prof. DSc. Igor César Pereira. O candidato apresentou o trabalho intitulado: **“Análise Numérica e Experimental da Influência dos Parâmetros de Corte na Temperatura do Processo de Furação ”**, sob orientação do Prof. DSc Igor César Pereira. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o(a) aluno(a) Aprovado.

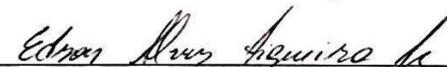
Ouro Preto, 06 de Dezembro de 2019.



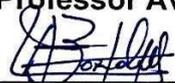
Prof. DSc. Igor César Pereira
Professor Orientador



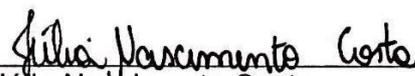
Prof. DSc. Alisson Augusto Azevedo Figueiredo
Coorientador



Prof. DSc. Edson Alves Figueira Junior
Professor Avaliador



Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Professor Avaliador



Júlia Nascimento Costa
Aluno(a)

RESUMO

COSTA, Júlia Nascimento. Análise numérica e experimental da influência dos parâmetros de corte na temperatura do processo de furação. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Ouro Preto.

O presente trabalho contempla uma análise experimental e numérica sobre a influência dos parâmetros de corte na temperatura do processo de furação. A maior parte da potência que é consumida na usinagem é convertida em calor. Por isso, mensurar a temperatura de corte é muito importante para investigar o desgaste da ferramenta, a integridade superficial e dimensional da peça. Primeiramente, foi desenvolvido um método experimental de medição de temperatura em que termopares foram inseridos no interior de furos feitos na peça de trabalho. Os resultados apresentaram que as maiores temperaturas foram encontradas nos experimentos de maior velocidade de corte. Já os efeitos do avanço nas temperaturas de usinagem foram discretos. Numericamente, um modelo caracterizado pela movimentação de uma geração de calor no interior da peça usinada foi desenvolvido. Todavia, devido as particularidades da inserção de uma geração de calor volumétrica, como a existência de duas áreas de dissipação de calor com diferentes proporções, o modelo não atendeu as expectativas pretendidas. Para que o modelo proposto fosse validado, o material da peça deveria ser removido, o que geraria fronteiras para a inserção de fluxos de calor.

Palavras-chave: Furação, Temperatura, Velocidade de corte, Avanço, Elementos finitos, Geração de calor.

ABSTRACT

This study contemplates an experimental and numerical analysis about the influence of cutting's parameters on drilling temperature. Most of the power that is consumed in machining is converted to heat. Thus measuring the cutting temperature is very important to investigate tool wear and the dimensional and surface integrity of the workpiece. First of all, an experimental method of temperature measurement was developed in which thermocouples were inserted into small diameters made in the workpiece. The results showed that the highest temperatures were found in the highest cutting speed experiments. The effects of the feed rate on machining temperatures were discrete. Numerically, a model characterizes by the movement of a heat generation within the workpiece was developed. However, due to the particularities of the insertion of a volumetric heat generation, such as the existence of two flow-shaped heat dissipation areas with different proportions, the model did not meet expectations. For the proposed model to be validated, material has to be removed, which would generate boundaries for the insertion of heat fluxes.

Keywords: *drilling, temperature, cutting speed, feed rate, finite elements, heat generation.*

LISTA DE SIMBOLOS

d - Diâmetro da ferramenta (mm)

n - Rotações por minuto (rpm)

q'' - Fluxo de calor ($\frac{W}{m^2}$)

k - Condutividade térmica ($\frac{W}{m \cdot K}$)

ρ - Densidade específica ($\frac{kg}{m^3}$)

C_p - Calor específico ($\frac{J}{kg \cdot K}$)

q''' - Geração de calor volumétrica ($\frac{W}{m^3}$)

q - Taxa de calor (W)

V - Volume do disco infinitesimal (mm^3)

r - Raio do disco infinitesimal (mm)

l - Espessura do disco infinitesimal (mm)

v_q - Velocidade de avanço ($\frac{mm}{min}$)

t - Tempo de usinagem (s)

q_{total} - Geração de calor volumétrica total ($\frac{W}{m^3}$)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Processo de formação do cavaco em uma broca.....	15
Figura 2- Broca helicoidal com haste cilíndrica	17
Figura 3- Arestas e superfícies de corte de uma broca helicoidal	17
Figura 4- Ângulos de uma broca helicoidal.....	19
Figura 5- Configuração utilizada para manter a distância constante entre a broca e a fibra ótica	21
Figura 6- Posição dos termopares.....	22
Figura 7- Posicionamento dos termopares nos canais de refrigeração da broca	22
Figura 8- Montagem da câmera térmica no CNC.....	23
Figura 9- Fluxo de calor inserido na ferramenta de corte.....	24
Figura 10- Esquema da amostra e posicionamento dos termopares	26
Figura 11- Corpos de prova	31
Figura 12- Montagem da estrutura para ensaios.....	32
Figura 13- Multímetro Agilent 34970 ^a	32
Figura 14 Montagem experimental.....	34
Figura 15-Modelo da peça no software	36
Figura 16- a-Dissipação de fluxo de calor a partir de um disco de espessura l e b- Dissipação de fluxo de calor a partir de um disco infinitesimal.....	38
Figura 17- Linha de corte para avaliação da convergência de malhas	40
Figura 18- Identificação dos termopares na peça de trabalho	41
Figura 19- Variação da temperatura no termopar lateral,101, durante o processo de furação	42
Figura 20- Variação da temperatura no termopar lateral, 102, durante o processo de furação	42
Figura 21- Variação da temperatura no termopar central,103, durante o processo de furação	43

Figura 22- Efeito da variação do avanço na temperatura para o termopar central	44
Figura 23-Efeito da variação do avanço na temperatura para o termopar lateral	45
Figura 24- Efeito da variação do avanço na temperatura no termopar central ...	46
Figura 25- Gráfico do efeito da variação do avanço na temperatura no termopar lateral	47
Figura 26- Perfis de temperatura para determinadas malhas.....	49
Figura 27- Perfis de temperatura para determinadas malhas.....	49
Figura 28- Perfil do fluxo de calor por unidade de tempo.....	50
Figura 29-Forma adimensional do fluxo de calor por tempo	51
Figura 30- Pontos para medição de temperatura: A- Central e B-Extremidade da broca	51
Figura 31-Comparação resultados experimentais e numéricos para o termopar central	52
Figura 32- Comparação resultados experimentais e numéricos para o termopar lateral	53
Figura 33- Perfil do fluxo de calor imposto para a peça de trabalho.....	54
Figura 34- Resultados encontrados por De Souza <i>et al.</i> (2012)	54
Figura 35- Resultados encontrados utilizando modelo proposto.....	55
Figura 36- Percurso da geração de calor na peça de trabalho.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros de corte utilizados.....	33
Tabela 2- Propriedades térmicas da peça usinada	36
Tabela 3-Tempos de furação para cada parâmetro de corte	39
Tabela 4- Variáveis e Indicadores Avanço	40
Tabela 5- Quantidade de elementos tetraédricos para as cinco malhas analisadas	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Formulação do Problema	11
1.2	Justificativa	12
1.3	Objetivos	12
1.3.1	Geral	12
1.3.2	Específicos	12
1.4	Estrutura do Trabalho	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Furação	14
2.1.1	Variáveis do Processo de Furação	14
2.1.2	Fenômeno de formação do cavaco na furação	15
2.2	Ferramentas Empregadas na Furação	16
2.2.1	Geometria das brocas helicoidais	16
2.3	Temperatura no processo de furação	19
2.3.1	Fibra ótica	20
2.3.2	Termopares soldados na superfície de folga da broca	21
2.3.3	Termopares nos canais de refrigeração da ferramenta	22
2.3.4	Câmara térmica	23
2.4	Análise numérica nos processos de furação	24
2.4.1	Análise da temperatura na ferramenta de corte	24
2.4.2	Técnicas de problema inverso	25
2.4.3	Análise da temperatura com a variação dos parâmetros de corte	27
2.4.4	Análise dos efeitos térmicos no material usinado	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	Tipo de pesquisa	29
3.2	Materiais e métodos experimentais	31
3.3	Simulação utilizando o software COMSOL	34
3.4	Variáveis e indicadores	40
3.5	Conclusões finais	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Resultado experimental	41

4.2	Resultado numérico	47
4.2.1	Convergência de malha	48
4.2.2	Simulação numérica	50
5	CONCLUSÕES.....	58
5.1	Recomendações	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Para realizar a fabricação de produtos, principalmente metálicos, são utilizados alguns processos cujo objetivo é dar forma, dimensões e acabamento. Além disto, estes processos conferem uma série de propriedades requeridas para o bom desempenho do produto (KIMINAMI *et al.* 2013).

A usinagem consiste em um processo de fabricação em que há remoção de cavaco. Este, por sua vez, é definido como a porção de material retirada pela ferramenta a qual não possui geometria precisa (FERRARESI, 1997; DIN 8580, 1985).

Um dos procedimentos mecânicos de usinagem mais utilizado em indústrias manufatureiras é a furação. Apesar do seu pequeno avanço tecnológico durante muito tempo, a furação teve um crescimento expressivo de utilização nos CNC, Centros de Usinagem, o que, de fato, proporcionou o desenvolvimento de novos materiais para as brocas, ferramentas de furação, e representou um grande desenvolvimento para este processo (DINIZ, 2006; FERNANDES *et al.*, 2016).

Na usinagem, em geral, há um problema comum em relação à geração de calor oriunda do atrito. Como na furação a ferramenta se encontra introduzida na peça e, ainda, mantém contato com o cavaco por determinado tempo, os efeitos do calor são mais intensos. As altas temperaturas do processo são prejudiciais a vida útil da broca e da qualidade final do material a ser usinado (ABAGGE, 1998; DE SOUSA, 2012; GOK *et al.*, 2014).

Há uma série de fatores que influenciam a geração de calor na furação. Entre eles destacam-se a velocidade de rotação, velocidade de avanço, força de corte, profundidade de corte, geometria da broca, as propriedades do material a ser usinado, dentre outras (DE SOUSA, 2012, SEZEK *et al.*, 2012).

É importante destacar que o controle da temperatura durante a furação foi, e ainda é, o objetivo do estudo de muitos pesquisadores. Alguns destes estudos consistem no uso de termografia, na inserção de termopares na peça, em posições adjacentes à broca, na ferramenta de corte dentre outros. Em suma, as análises experimentais visam,

basicamente, indicar como seria o comportamento térmico quando submetidos a determinados parâmetros de corte (SEZEK *et al.*, 2012).

Além dos estudos de cunho experimental muitos autores realizaram análises numéricas para estimar as temperaturas de corte em função dos parâmetros de corte (FLEISCHER E KELEMEN, 2007), distribuição de temperatura ao longo da aresta de corte (BONO E NI, 2006; LI E SHIH, 2007), fluxo de calor utilizando técnicas de problema inverso (DE SOUZA *et al.*, 2012) dentre outros estudos.

Deste modo, com base no contexto apresentado a questão problema que permeia o estudo é:

Qual a influência dos parâmetros de corte na temperatura de furação? E, como realizar uma avaliação experimental e numérica destes?

1.2 Justificativa

A determinação da temperatura próxima à região de corte com termopar inserido e a validação de um modelo numérico para simular o processo representa um grande avanço não só para aplicações de furação em geral, a fim de garantir a integridade da ferramenta e da peça usinada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver uma metodologia com termopares inseridos no interior do material a ser usinado para estimar as temperaturas no processo de furação através de um modelo numérico.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica acerca dos temas: Furação, fenômeno de formação do cavaco na furação, geometria da ferramenta, temperaturas no processo e análises numéricas já realizadas;
- Mostrar os critérios empregados no desenvolvimento do trabalho, apresentar o equipamento, os materiais e as ferramentas a serem utilizados

nos ensaios. E, ainda, apresentar o software utilizado para a simulação numérica, seu funcionamento e as condições de contorno utilizadas;

- Mostrar os resultados obtidos experimentalmente com auxílio de gráficos de médias e desvios padrões. Apresentar os resultados numéricos e compará-los com os dados experimentais;
- Concluir os resultados obtidos.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo encontra-se a formulação do problema, justificativas para a realização dos experimentos e objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica relacionada ao tema. No terceiro capítulo são apresentados os materiais e métodos para a realização do estudo.

Por fim, nos últimos dois capítulos estão apresentados os resultados e discussões sobre os experimentos realizados e as conclusões do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Furação

De acordo com a NBR 6175 (1971) a furação consiste em um processo que tem como propósito a realização de furos cilíndricos através do movimento de rotação relativa entre a peça e a ferramenta.

A furação é uma das últimas operações realizadas na peça. Deste modo, as ferramentas usadas no processo precisam evitar o retrabalho e garantir confiabilidade (TONSHOFF *et al.*, 2008).

O processo de furação possui uma série de singularidades como as listadas a seguir (KONIG, 1990 e STEMMER, 1995 *apud* CASTRO, 2001):

- Geração de cavaco é de difícil observação;
- Velocidade de corte não é uniforme, varia de zero no centro do furo a um máximo na periferia;
- Ocorre atrito nos cantos vivos;
- Distribuição inadequada de calor na região de corte;
- Fluido de corte chega com dificuldade ao gume da ferramenta, onde é mais necessário.

2.1.1 Variáveis do Processo de Furação

A velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte são variáveis importantes no processo de furação. A velocidade de corte (V_c) pode ser definida como a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte consoante com a direção e o sentido de corte. Esta pode ser calculada pela equação 1:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

onde d representa o diâmetro da ferramenta (em milímetros) e n o número de rotações por minuto (mm/volta).

Ainda consoante com Ferraresi (1997), baixas velocidades de corte juntamente com a ausência da aresta postiça de corte, a força de corte é elevada. Já em velocidades elevadas a força de corte é reduzida e o desgaste da ferramenta e a geração de calor na interface cavaco ferramenta aumentam.

Já o aumento do avanço tende a aumentar a força de usinagem devido ao aumento das áreas referentes aos planos de cisalhamento. Além disto, o avanço pode afetar as condições dimensionais do furo e valores de rugosidade (SILVA, 1999; BEZERRA, 2001; MACHADO et al., 2009).

A força de usinagem é a responsável por provocar inúmeras deformações na peça, ferramenta e no cavaco. Além disto, quando o cavaco se desloca na superfície de saída da ferramenta ocorre atrito. O trabalho da força responsável pela deformação e pela força de atrito são convertidos em calor e campos de temperatura são gerados a partir destes e das geometrias e propriedades térmicas dos materiais envolvidos no processo (FERRARESI, 1997; MACHADO et al., 2009).

2.1.2 Fenômeno de formação do cavaco na furação

O cavaco pode ser definido como uma porção de material sem geometria definida que é removida da peça que está sendo usinada, sua formação está influenciada pelo desgaste da ferramenta, os esforços de corte dentre outros fatores (TRENT, 2000).

A figura 1 exemplifica um processo de formação de cavaco durante a furação.

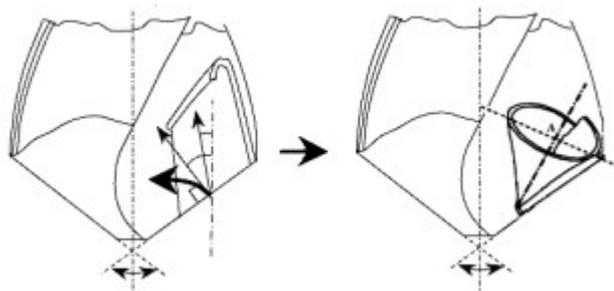


Figura 1- Processo de formação do cavaco em uma broca
Fonte: Ke et al., 2005

Como observado na figura 1, no processo de furação os cavacos são formados a partir do centro da broca. O movimento no centro da broca é mais lento na face de corte em relação a sua extremidade. Devido a variação do ângulo de inclinação e de saída com

o raio da broca os cavacos que são formados nas proximidades do centro da ferramenta são mais curtos que os formados na região externa da broca. Esta diferença de comprimento força o fluxo do cavaco para o centro da ferramenta ao invés de ser perpendicular a face de corte (KE *et al.*, 2005; BORBA, 2013).

É importante destacar que o movimento rotacional do cavaco em relação ao seu próprio eixo é dificultado na furação, o que pode fazer que este quebre ou mude de forma (KE *et al.*, 2005).

Um dos problemas do processo de furação é a remoção dos cavacos do interior do furo formado na peça usinada. Os cavacos que não forem formados de maneira que sua retirada seja facilitada, faz com que o momento torçor necessário para o corte aumente o que pode causar em quebra da ferramenta de corte. Uma das maneiras de facilitar a quebra do cavaco é o aumento do avanço. Todavia, há um limite para o aumento do avanço e caso este não seja respeitado a broca pode quebrar e o avanço da máquina pode ser interrompido (MACHADO *et al.*, 2009)

2.2 Ferramentas Empregadas na Furação

No processo de furação são empregados diferentes tipos de brocas. São exemplos de classificação das brocas utilizadas: chatas, helicoidais, escalonadas, de centro, helicoidais com pastilhas de metal-duro, brocas ocas e outras.

As brocas helicoidais são as ferramentas mais utilizadas no processo de furação. Esta é normatizada em função de suas características construtivas e geométricas (DIN 1836, DIN 1962, ABNT PB-286,1977).

2.2.1 Geometria das brocas helicoidais

De modo geral, as brocas helicoidais são compostas de uma parte cortante e de uma haste (KONIG e KLOCKE, 2002), como é exemplificado na figura 2:

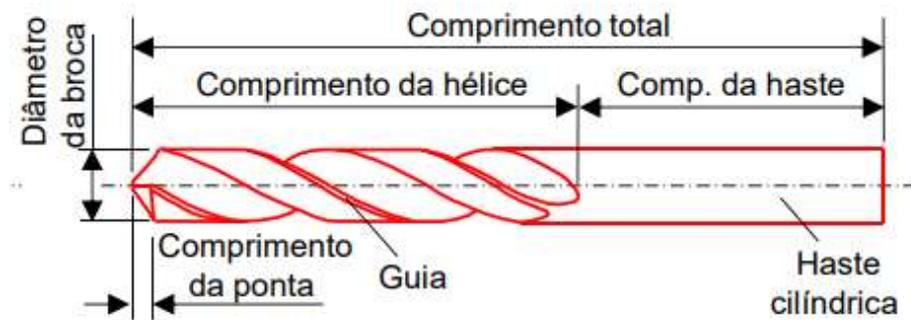


Figura 2- Broca helicoidal com haste cilíndrica
Fonte: König e Klocke (2002)

A Figura 3 mostra as superfícies e arestas da broca.

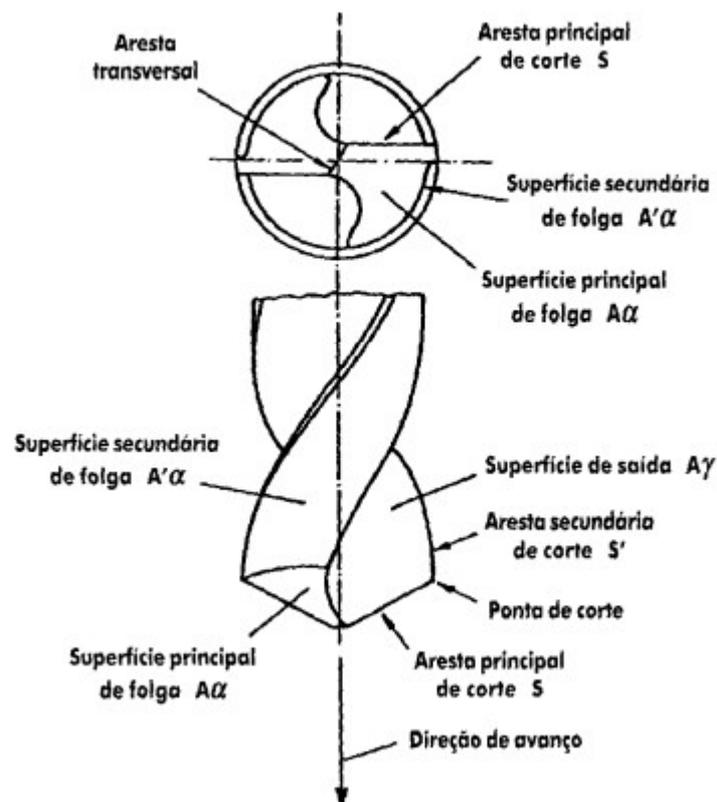


Figura 3- Arestas e superfícies de corte de uma broca helicoidal
Fonte: Diniz et al. (1999)

Algumas definições podem ser feitas a partir das arestas e superfícies da broca helicoidal destacada na figura 3 (DINIZ et al., 1999; MIRANDA, 2003).

- **Superfície de saída ($A\gamma$):** é a superfície situada na cunha de corte que sobre a qual o cavaco é formado e, posteriormente, sofre escoamento da região de trabalho.
- **Superfície principal de folga ($A\alpha$):** é a superfície situada na cunha de corte da ferramenta na qual está contida a aresta principal de corte.
- **Superfície secundária de folga ($A'\alpha$):** é a superfície situada na cunha de corte da ferramenta na qual está contida a aresta de corte secundária principal.
- **Aresta principal de corte (S):** é a aresta situada na cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal.
- **Aresta secundária de corte (S'):** é a aresta situada na cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária.
- **Ponta de corte:** Ponto de intercessão entre a aresta principal de corte e a aresta secundária.

Já os ângulos definidos no sistema de referência são chamados de ângulos da ferramenta. Os principais ângulos presentes na broca helicoidal podem ser mostrados na figura 4:

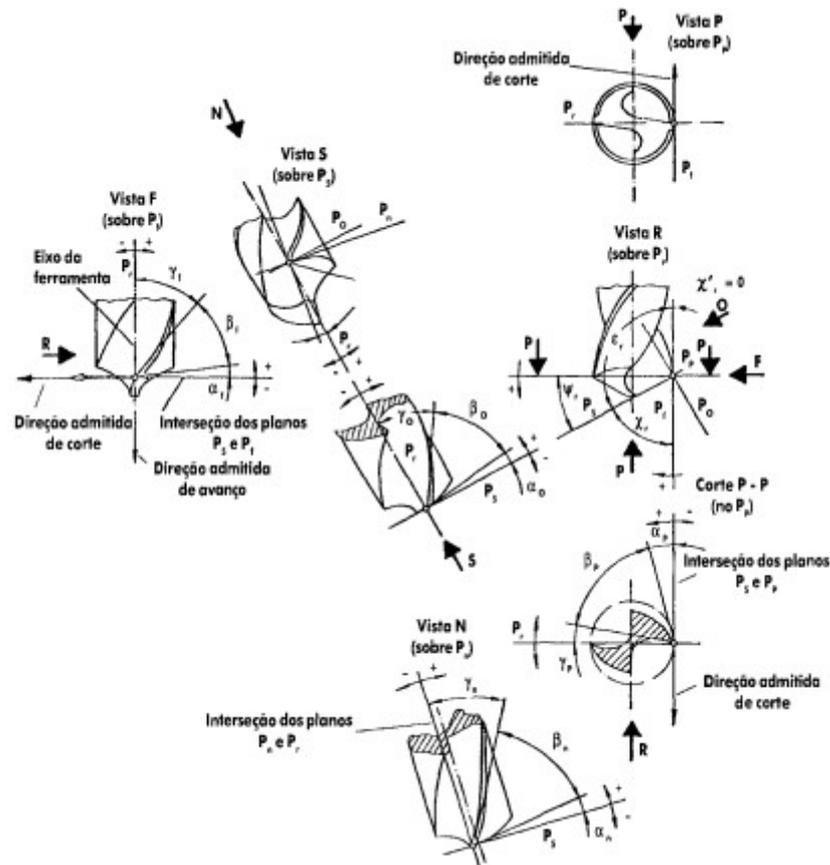


Figura 4- Ângulos de uma broca helicoidal
 Fonte: Machado et al. (2009)

Pela observação da figura 4 é possível identificar alguns importantes ângulos da ferramenta como: ângulo de posição da ferramenta (χ_r), ângulo de posição da aresta secundária da ferramenta ($\chi'r$), ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s), ângulo de ponta da ferramenta (ϵ_r) dentre outros.

2.3 Temperatura no processo de furação

A temperatura em que o corte é realizado é, de fato, muito importante para investigar o desgaste da ferramenta, a integridade superficial e dimensional da peça. Afinal, a maior parte da potência que é consumida na usinagem de determinado metal é convertida em calor. Este aquecimento pode gerar sérios problemas técnicos e econômicos (MACHADO *et al.*, 2009; BENO e HULLING, 2012).

O cálculo do aumento da temperatura na peça usinada é considerado complexo pois é necessário considerar a distribuição do fluxo de calor, a condutividade térmica dos materiais e, ainda, a variação das propriedades de acordo com a variação da temperatura.

A geração de calor ocorre durante vários processos na usinagem como no atrito da peça usinada e na superfície de folga da ferramenta e entre o cavaco e a superfície de saída. A entrada de calor na peça sofre um aumento em processos de deformação ao quais acontecem devido à pressão da aresta de corte na superfície da peça recém usinada (WAENECKE, 1974; FLEISCHER E KELEMEN, 2007).

Bono (2001) considera que todo o calor gerado no plano de cisalhamento é conduzido para a peça de trabalho. Deste modo, o calor gerado por cisalhamento é aplicado como um fluxo de calor logo abaixo da aresta de corte. Isto indica que à medida que a broca avança o calor é adicionado a peça de trabalho de forma contínua. As temperaturas raramente atingem estado estacionário e aumenta com a profundidade do furo.

Existem alguns modelos de dissipação de calor durante a usinagem de um material. Preger (1977) sugere que cerca de 80% do calor é dissipado para os cavacos e que a ferramenta de corte e a peça são responsáveis pela dissipação de 10% cada. Já Vieregge (1953) propunha um modelo em que a entrada de calor na peça usinada flutua e depende dos parâmetros de corte utilizados. Em suma, coerente com a literatura a entrada de calor durante a furação na peça de trabalho é estimada entre 10 e 35% do valor total da energia esta faixa deve a faixa de parâmetros de corte (FLEISCHER E KELEMEN, 2007).

Os métodos mais comuns são a termografia, pirometria, uso de termopares dentre outros. Os termopares se destacam pelos seus resultados satisfatórios. A escolha de um sistema de medição adequado é crucial para aproximar as informações coletadas da realidade em campo (WEINGAETNER, 2006 e HALCSIK *et al.*, 2018).

É importante destacar que uma série de trabalhos cujo objetivo é mensurar temperaturas no processo de furação foram realizadas ao longo dos anos utilizando diferentes técnicas.

2.3.1 Fibra ótica

Benó e Huling (2012) utilizaram fibra ótica para mensurar as temperaturas médias em função do tempo em duas posições: no centro do raio e no canto da broca na furação do inconel 718, aço e de uma liga de titânio (Ti6-4). A figura 5 exemplifica o experimento realizado.

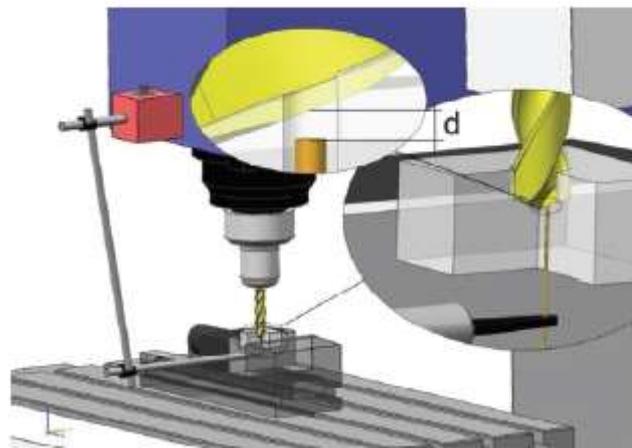


Figura 5- Configuração utilizada para manter a distância constante entre a broca e a fibra ótica
 Fonte: Beno e Huling (2012)

Como demonstrado na figura 5, para que as medições ocorressem sem erros a fibra ótica deveria ser posicionada a uma distância constante da fonte de calor e para que isso fosse possível o deslocamento foi sincronizado com o movimento da broca.

Os autores concluíram que o método precisa ser combinado com análise computacional devido ao grande banco de dados produzido e a possibilidade de dados de temperatura inválidos (o que se deve ao fato de que a temperatura é calculada pela razão de sinais).

Além disto, mesmo com diferentes materiais de peças de trabalho (Ti6-4, inonel 718 e aço ferramenta SS2244-4) e diferentes velocidades de corte (60m/min para o Ti6-4; 35m/min para o Inonel 718 e 100m/min para o aço ferramenta SS2244-4) os resultados observados indicaram que a diferença de usinabilidade dos materiais das peças são diretamente refletidos nas temperaturas encontradas. Ademais, durante os experimentos realizados a temperatura possui maior variação próxima ao centro da broca.

2.3.2 Termopares soldados na superfície de folga da broca

Li e Shih (2007) com objetivo de validar um modelo térmico de elementos finitos usando calor inverso, usinaram Ti-6Al-4V com uma taxa de remoção de material de $384\text{mm}^3/\text{s}$. A velocidade de corte utilizada foi de 183m/min, com avanço de 0,05mm/rot e profundidade de furação de 10,2mm. Para validar os resultados numérico, termopares foram utilizados na superfície de folga para estimar a temperatura na usinagem com fluido

de corte. A figura 6 exemplifica a posição que os termopares foram fixados para os experimentos com fluido de corte.

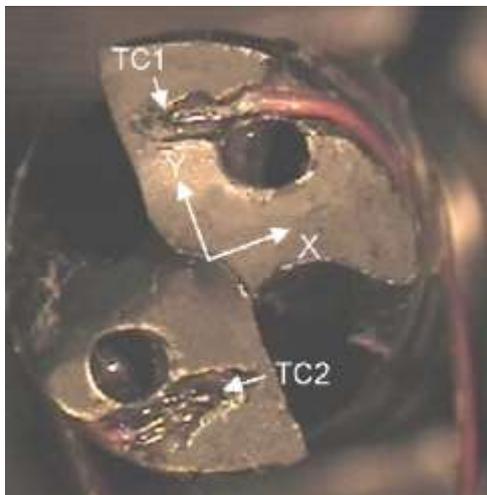


Figura 6- Posição dos termopares
Fonte: Li e Shih (2007)

Um modelo é usado para definir o coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido de corte utilizado e a partição do calor na área de contato com da ferramenta-peça.

O estudo em questão mostrou que a temperatura mais alta da broca ocorreu na aresta de corte. E, ainda, que o fluido de corte é determinante para reduzir as temperaturas de corte nas bordas e na aresta transversal da ferramenta.

2.3.3 Termopares nos canais de refrigeração da ferramenta

Çakiroglu e Acir (2013) para mensurarem as temperaturas na broca usaram termopares tipo K nos canais de refrigeração da broca, conforme exemplificado na figura 7.



Figura 7- Posicionamento dos termopares nos canais de refrigeração da broca
Fonte: Çakiroglu e Acir (2013)

O material usinado foi a liga Al 7075 e as medidas de controle foram velocidade de corte, taxa de avanço e a ferramenta utilizada. A usinagem foi realizada utilizando o modelo de peça de trabalho fixa e peça rotativa.

Por fim, análises de regressão foram utilizadas e comparadas com os resultados de medição de temperatura da broca mostrando boa concordância com os resultados experimentais.

2.3.4 Câmera térmica

Giasin, Ayvar-soberanis e Hodzic (2016) fizeram uma série de furos nas peças de trabalho (pilhas de metal e laminados de fibra metálicas) e utilizaram termopares e termografia por infravermelho para determinar a emissividade das superfícies e laterais dos materiais.

Ademais, a termografia infravermelha foi utilizada para medir as temperaturas no processo e ainda identificar a zona termicamente afetada pela usinagem. A figura 8 mostra como a peça de trabalho e a câmera são fixadas no CNC.

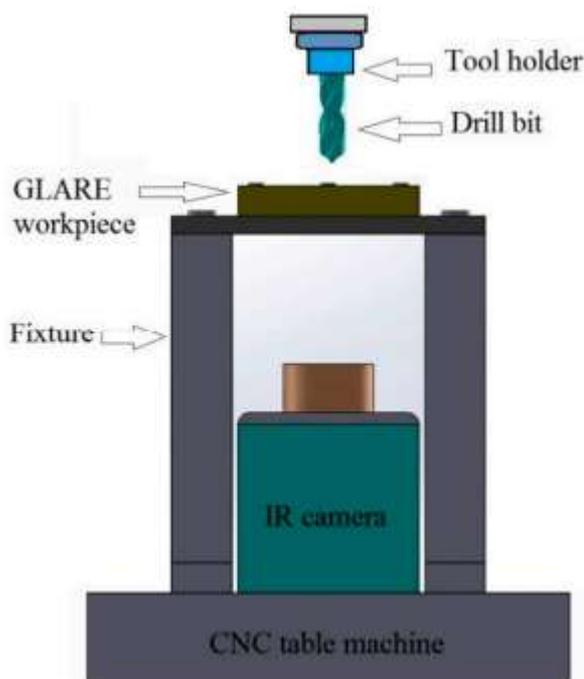


Figura 8- Montagem da câmera térmica no CNC
Fonte: Giasin, Ayvar-soberanis e Hodzic (2016)

A temperatura aumentou com o aumento da taxa de alimentação e orientação das fibras do material usinado.

2.4 Análise numérica nos processos de furação

Analogamente aos estudos com foco experimental diversos autores desenvolveram simulações numéricas para estimar as temperaturas no processo de furação.

2.4.1 Análise da temperatura na ferramenta de corte

Bono e Ni (2006) com o objetivo de analisar o perfil de temperatura ao longo das arestas de corte de uma broca, utilizaram um modelo de elementos finitos o qual prevê a distribuição de temperatura onde os fluxos de calor aplicados são definidos a partir de equações analíticas.

O modelo considera o calor gerado no plano de cisalhamento e o gerado na face de inclinação da ferramenta para definir a quantidade de calor que vai para a mesma.

Uma liga de alumínio 319 foi utilizada no modelo que foi desenvolvido com o software de elementos finitos ABAQUS Standard. A figura 9 mostra a ferramenta de corte modelada no software.

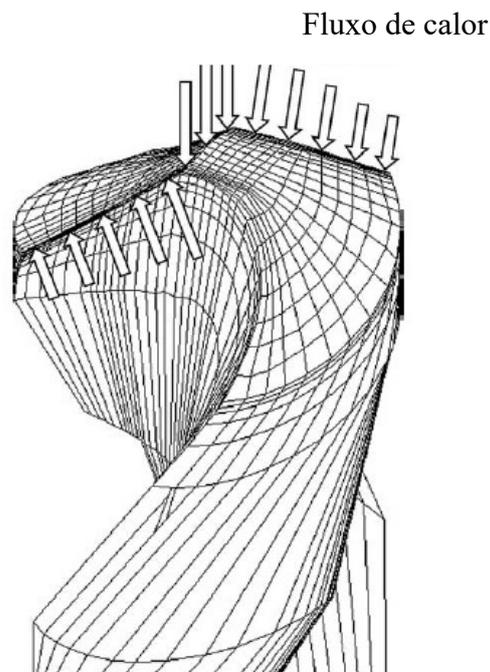


Figura 9- Fluxo de calor inserido na ferramenta de corte
Fonte: Bono e Ni (2006)

Um fluxo de calor foi aplicado em toda aresta de corte, como observado na figura 9, e as demais superfícies do modelo foram consideradas adiabáticas. Como a temperatura da broca aumenta próxima a sua extremidade, mas permanece relativamente constante próxima a sua haste, apenas parte da ferramenta foi modelada.

Os gradientes de fluxo de calor diminuem com a distância a partir das arestas de corte para garantir que as cargas de fluxo de calor fossem aplicadas em áreas de tamanhos adequados. É importante destacar que o modelo aplica fluxo de calor apenas aos elementos que estão em contato com a peça. Com o avanço da broca o fluxo é aplicado aos elementos de acordo com o envolvimento destes no corte.

O que torna o trabalho diferente dos demais estudos realizados é que as cargas de fluxo de calor aplicadas no estudo assumem que o calor pode fluir para dentro e para fora da peça com o contato ferramenta-peça.

O modelo proposto difere da crença presente na literatura em que as maiores temperaturas ocorrem próximas ao canto externo da broca e prevê que as maiores temperaturas estão na borda da aresta transversal o que é consistente com os resultados práticos realizados.

2.4.2 Técnicas de problema inverso

De Souza *et al.* (2012) realizou um trabalho cujo o principal objetivo foi apresentar uma possibilidade de obtenção da taxa de transferência de calor na interface de corte e, ainda, definir os campos de temperatura formados na peça de trabalho com base em soluções numérica e técnicas de problemas inversos de transferência de calor.

O estudo teve como base a técnica de problemas inverso baseado nas funções de Green e observadores dinâmicos para estimar a temperatura máxima e o fluxo de calor na peça de aço microligado a partir de temperaturas experimentais. A figura 10 mostra o esquema da amostra com os respectivos termopares.

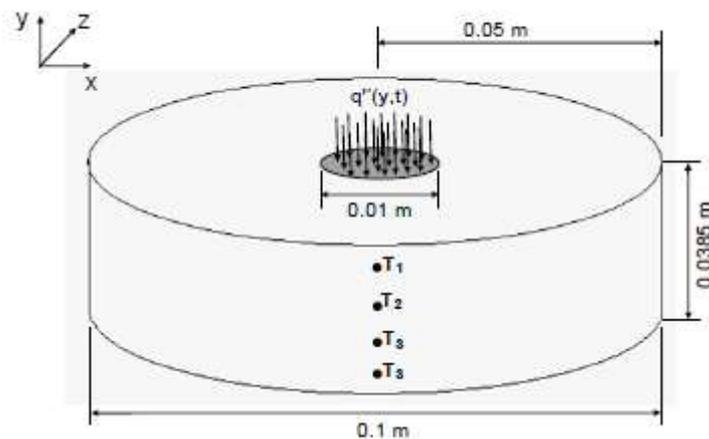


Figura 10- Esquema da amostra e posicionamento dos termopares
 Fonte: De Souza et al. (2012)

O modelo térmico considerou a broca como uma fonte de calor em movimento e foi validado com dois experimentos prévios. Comparações entre os dados experimentais e estimados apresentaram uma boa concordância em todos os pontos de termopares destacados pela figura 10.

A vantagem da técnica utilizada consiste no cálculo do problema inverso apenas uma vez. Afinal, a técnica inversa necessita somente uma vez dos dados de temperatura medidos de forma experimental e das temperaturas do problema auxiliar que são calculadas apenas uma vez. Outra vantagem é que a técnica se baseia na função de transferência global o que faz que a técnica seja mais flexível para a implementação.

Já Huang *et al.* (2007) estimaram o fluxo de calor aplicado na superfície de corte da ferramenta com um problema inverso de condução de calor tridimensional. O algoritmo desenvolvido pelos autores usa o Steepest Descent Method (SDM) e um código comercial CFX é aplicado com base nas distribuições de temperatura simuladas e medidas por quatro sensores localizados na superfície de furação.

Os dados obtidos experimentalmente, a partir da usinagem de uma liga de titânio, são usados para estimar o fluxo real de calor durante a furação em velocidades diferentes. As experiências numéricas ilustram a validação do fluxo de calor usando medições exatas e de erro. Os resultados mostram que o fluxo de calor estimado pode ser obtido com o modelo de algoritmo inverso defendido pelos autores.

Brandão, Coelho e Lauro (2011), também utilizando métodos de problema inverso, realizaram um trabalho para determinar o fluxo de calor e o coeficiente convectivo na usinagem de um aço ferramenta AISI H13 endurecido.

Para validar o modelo de condução de calor proposto, foram utilizados termopares fixos próximos a parede do furo. Os testes foram realizados a seco e com sistemas de lubrificação.

Os resultados encontrados mostram que o fluxo de calor e a temperatura diminuem quando o sistema é lubrificado em relação a usinagem a seco.

2.4.3 Análise da temperatura com a variação dos parâmetros de corte

Fleischer e Kelemen (2007) fizeram um estudo com objetivo de apresentar um modelo que descreve a geração de calor baseado nos parâmetros de corte e da geometria da ferramenta.

Experimentalmente, foram medidos durante a usinagem a temperatura usando termopares tipo K e a força usando um dinamômetro durante a usinagem de um ferro fundido vermicular. Para a análise numérica o software utilizado foi o Abaqus.

Através da variação dos parâmetros de corte, os resultados dos experimentos mostraram a influência destes nas temperaturas encontradas. A dependência do calor da velocidade de corte em relação ao avanço por dente fixado é linear. Da mesma forma, a influência do diâmetro da ferramenta também é uma linear. O trabalho concluiu também que o desgaste da ferramenta influencia diretamente no calor introduzido.

2.4.4 Análise dos efeitos térmicos no material usinado

Díaz-Álvarez *et al.* (2015) desenvolveram um modelo de duas dimensões usando o software comercial de elementos finitos Abaqus o qual analisa a furação a seco de uma liga de titânio (Ti6Al4V). As cargas térmicas que a peça de trabalho foi submetida foram calculadas tendo como base a evolução do torque medido em ensaios e modelos tridimensionais.

Os resultados numéricos foram comparados com medições experimentais que foram realizadas através de termopares localizados na lateral da peça de trabalho. Como conclusão do trabalho, os autores confirmaram que o modelo atendia as expectativas e,

ainda, que as maiores temperaturas eram encontradas próximas a saída da broca causando maior dano térmico ao material usinado.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as características de desenvolvimento da pesquisa, os procedimentos experimentais, assim como materiais e equipamentos utilizados para a realização do trabalho.

A temperatura no processo de furação foi avaliada para um tipo de ferro fundido cinzento em diferentes condições de usinagem com auxílio de termopares tipo K. Além disto, com o auxílio do software COMSOL o experimento também foi avaliado numericamente.

3.1 Tipo de pesquisa

Primeiramente, para a realização de uma pesquisa de qualidade é necessário conhecer as variáveis e classificação destas.

Consoante com Gil (2008) a pesquisa nada mais é que um processo sistemático e formal de desenvolvimento do método científico. Seu objetivo fundamental consiste em descobrir respostas para determinados problemas com auxílio de procedimentos científicos. Já Demo (1995) assume a pesquisa como atividade cotidiana.

Uma pesquisa pode ser classificada de duas formas:

- Pesquisa Qualitativa: na qual é possível encontrar afinidade entre o mundo real e o sujeito. Um vínculo entre ambas as partes é criado o qual não pode ser mensurado ou transformado em números. Uma pesquisa qualitativa explora informações subjetivas e em profundidade (SILVA E MENEZES, 2005).
- Pesquisa Quantitativa: neste tipo de pesquisa, opiniões e informações são traduzidas para números para serem classificadas e analisadas. Ou seja, como o próprio nome sugere, este tipo de pesquisa quantifica os dados para responder um problema de pesquisa. Para que isto seja possível, o uso de recursos e técnicas estatísticas como porcentagem é carecido. Ademais, a pesquisa quantitativa possui raízes no pensamento positivista lógico que tende a enfatizar o raciocínio dedutivo e regras de lógica (POLIT, BECKER e HUNGLER, 2004).

Deste modo, o presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza quantitativa. Afinal, serão usados métodos estatísticos, gráficos e tabelas para analisar as diferentes temperaturas encontradas nos ensaios e no modelo numérico proposto.

Com base nos objetivos, é possível classificar a pesquisa em três diferentes grupos: Pesquisa exploratória; pesquisa descritiva e pesquisa explicativa (GIL, 2008).

- **Pesquisa exploratória:** Este tipo de pesquisa tem como objetivo familiarizar com o problema pouco conhecido ou explorado. Esta pode envolver levantamentos bibliográficos e até entrevistas e o pesquisador pode gerar hipóteses no final da pesquisa.
- **Pesquisa descritiva:** seu objetivo é descrever as características de fenômenos, experiências ou de determinada população. Esta conta com técnicas padronizadas de coletas de dados, como questionários e observações.
- **Pesquisa explicativa:** já este tipo de pesquisa identifica os fatores que determinam e/ou contribuem para que determinado fenômeno ocorra. Além disto, é válido destacar que esta pesquisa depende da análise subjetiva de seu autor.

Deste modo, em relação ao objetivo o trabalho em questão trata-se de uma pesquisa exploratória. Isto se deve ao fato de que o estudo envolve hipóteses através de simulação de um caso real, com embasamento bibliográfico para comparações e conclusões.

Assim, o atual trabalho pode ser classificado coerente com os procedimentos técnicos como uma pesquisa bibliográfica e experimental.

A pesquisa bibliográfica é desenvolvida com o auxílio de materiais já elaborados, constituído principalmente de livros, artigos científicos, catálogos e dissertações (GIL, 2008). No trabalho, uma pesquisa bibliográfica sobre o processo de furação, materiais da ferramenta e da peça, pesquisas relacionadas à métodos de modelagem do processo e métodos de medição de temperatura foram feitos.

Na pesquisa experimental são selecionadas variáveis capazes de influenciar o fenômeno suas formas de controle. No trabalho, os procedimentos experimentais foram feitos variando os parâmetros de corte e a influência destes na temperatura nos ensaios feitos em laboratório e no modelo numérico construído.

3.2 Materiais e métodos experimentais

Para a realização dos experimentos foram utilizados dezoito corpos de prova de ferro fundido cinzento (GG30) de 29,3mm de altura e 30mm de diâmetro. A ferramenta de trabalho utilizada foi uma broca helicoidal de 12mm de diâmetro e a mesma ferramenta foi utilizada para a realização de todos os ensaios propostos.

Para a fixação dos termopares foi realizado três furos de 1,5 mm de diâmetro em uma das superfícies planas dos corpos de prova. A posição dos furos foi definida de acordo com o diâmetro da broca que seria utilizada nos experimentos (12 mm) de forma que um dos furos estivesse no centro da broca e os outros dois na sua extremidade. Para avaliar a temperatura próximo a ponta de corte e na aresta transversal.

Devido ao ângulo da ponta da broca os furos para os termopares foram realizados com diferentes profundidades. Os furos externos tinham profundidade de 10 mm em relação a superfície que estes foram realizados enquanto o furo central estava a 9 mm de profundidade.

A figura 11 mostra os corpos de prova preparados para os ensaios.



Figura 11- Corpos de prova
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Nota-se através da figura 11 os furos para locação dos termopares descritos anteriormente em somente uma das faces enquanto a outra superfície encontra-se lisa para ser perfurada durante os ensaios.

Com os corpos de prova já prontos para o ensaio os termopares tipo K foram fixados no fundo dos furos de 1,5mm de diâmetro com auxílio de uma cola. A montagem do sistema está ilustrada na figura 12.

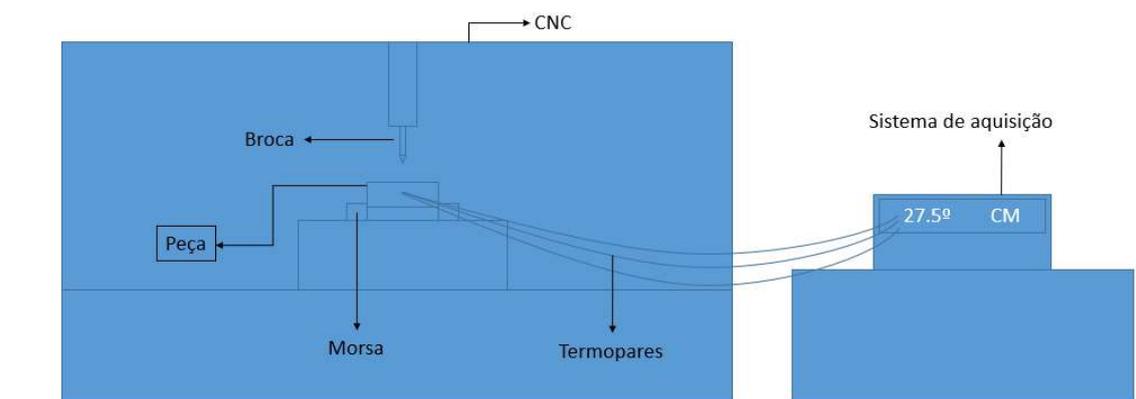


Figura 12- Montagem da estrutura para ensaios

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem Romi D600. Os termopares foram ligados em diferentes canais do multímetro Agilent 34970A, exemplificado pela figura 13. A taxa de aquisição foi definida como uma medição a cada milissegundo e o software foi acionado manualmente junto a aproximação da broca e desligado assim que a usinagem teve fim.



Figura 13- Multímetro Agilent 34970^a

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Os parâmetros de corte dos ensaios foram definidos previamente e definidos na tabela 1:

Tabela 1- Parâmetros de corte utilizados

Velocidade de corte	Avanço
20m/min	0,15mm/rot
20m/min	0,3mm/rot
60m/min	0,05mm/rot
100m/min	0,05mm/rot

Fonte: Pesquisa direta (2019)

É possível observar dois pontos importantes nos parâmetros escolhidos. Para uma mesma velocidade de corte há duas variações de avanço e para o mesmo avanço há duas velocidades de corte. Com as situações descritas é possível verificar o efeito destes parâmetros de corte na temperatura da furação.

É importante destacar que para todas as condições foram feitos um teste e duas réplicas. Além disto, para todos os dezoito ensaios foi utilizada a mesma ferramenta de corte, como descrito anteriormente.

A figura 14 mostra a montagem final dos experimentos mostrando os aparelhos descritos anteriormente e a montagem dos termopares.



Figura 14 Montagem experimental
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Com os resultados obtidos pelo software, os dados obtidos foram tabulados com o auxílio do software Microsoft Excel.

Paralelamente aos ensaios experimentais foi realizado um modelo no software COMSOL para estimar as temperaturas nos pontos em que os termopares foram inseridos.

3.3 Simulação utilizando o software COMSOL

As simulações numéricas do presente trabalho foram realizadas no software comercial COMSOL. Este se baseia na solução de problemas através do método de elementos finitos.

O COMSOL Multiphysics é um software de simulação para modelagem de projetos, dispositivos e processos que abrangem todas as áreas da engenharia, manufatura e pesquisas científicas (COMSOL, 2019).

A física utilizada para o trabalho foi a *Heat Transfer* presente na plataforma COMSOL Multiphysics. Este módulo de transferência de calor possui um conjunto abrangente de recursos para investigar projetos térmicos e efeitos de carga de calor (COMSOL, 2019).

Basicamente, a resolução do problema utilizando este tipo de software pode ser listada nos seguintes passos:

1. Seleção da dimensão espacial do problema;
2. Definição da física do problema;
3. Seleção do tipo de estudo;
4. Definição da geometria utilizada;
5. Adição de material aos domínios;
6. Adição das condições de contorno iniciais;
7. Definição da malha;
8. Estudo;
9. Apresentação de resultados.

Primeiramente, a dimensão espacial do problema escolhida foi a 3D e o tipo de estudo selecionado foi o regime transiente, devido as variações de temperatura em função do tempo.

Na maior parte dos casos a transferência de calor em sólidos acontece devida somente à condução e pode ser descrita pela lei de Fourier expressa pela equação 2:

$$q'' = -k\nabla T \quad (2)$$

onde q é o fluxo de calor, k a condutividade térmica e ∇T o gradiente de temperatura.

É possível verificar pela equação anterior que o fluxo de calor condutivo, q'' , é proporcional ao gradiente de temperatura.

Assim, a equação que rege a física *Heat Transfer* em sólidos no COMSOL pode ser descrita pela equação 3.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) + q''' \quad (3)$$

onde ρ é densidade específica, C_p o calor específico, $\frac{\partial T}{\partial t}$ o gradiente de temperatura ao longo do tempo, $\nabla \cdot (k\nabla T)$ um laplaciano vetorial em coordenadas cartesianas e q''' a geração de calor volumétrica.

Em seguida a geometria dos corpos de prova foi inserida no software. A figura 15 mostra a figura que simula a condição real de furação feita na prática.

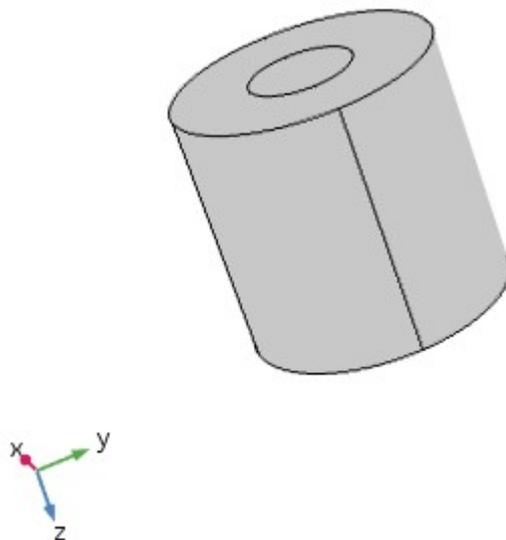


Figura 15-Modelo da peça no software
Fonte: Pesquisa direta (2019)

É possível identificar através da observação da figura 15 que há um cilindro simulando o corpo de prova utilizado o qual possui as mesmas dimensões do mesmo (30 mm de diâmetro e 29,3 mm de comprimento). Além disto, é possível observar também, na parte superior do cilindro da peça, um cilindro de 12 mm de diâmetro no qual ocorre o deslocamento da geração de calor volumétrica.

A tabela 2 apresenta as propriedades termofísicas utilizadas na simulação da peça usinada.

Tabela 2- Propriedades térmicas da peça usinada

Ferro fundido cinzento GG30 (Peça)	
Propriedade	Valor
Condutividade térmica	53,3W/m.K
Densidade	7,06E3 - 7,34E3 kg/m ³
Calor específico	490J/kgK

Fonte: Subtech (2019) e AZO materials (2019)

Inicialmente, foi considerada que a temperatura inicial de todo domínio era de 20°C. A base da peça de trabalho foi considerada termicamente isolada, ou seja, adiabática e nas demais superfícies foi considerado uma troca de calor com o ar externo ($h = 10W/m^2K$ e $T_{\infty} = 20^{\circ}C$).

Os estudos de simulações numéricas em processos de furação encontrados na literatura geralmente utilizam um fluxo de calor como condição de contorno para caracterizar a energia térmica transportada para a peça a partir da ferramenta. Todavia, este trabalho teve como base a utilização de uma geração de calor volumétrica para simular a energia térmica transportada para a peça usinada durante o processo de furação.

Um disco de espessura infinitesimal, l , foi considerado o domínio responsável pela geração de calor. Este se desloca da superfície superior da peça de trabalho até a posição final imposta no processo de furação, simulando o percurso da broca. É importante destacar que a simulação do trabalho não considerou a remoção de material.

A geração de calor pode ser relacionada com a taxa de calor da seguinte forma:

$$q''' \left[\frac{W}{m^3} \right] = \frac{q}{V} \quad (4)$$

onde q é a taxa de calor em W gerada pelo volume do disco infinitesimal, dado por $V = \pi r^2 l$ (em que l é a espessura e r o raio do disco).

Já a taxa de calor se relaciona com o fluxo de calor, q'' , através da equação descrita como.

$$q = q'' * A \quad (5)$$

onde A é a área da superfície do disco ($A = \pi r^2$).

Deste modo, é possível relacionar geração de calor volumétrica e fluxo de calor como.

$$q''' = \frac{q'' * A}{V} = \frac{q'' * \pi r^2}{\pi r^2 l} \quad (6)$$

Como a espessura do disco foi considerada infinitesimal toda a dissipação de calor, a partir da superfície lateral do disco, exemplificada na figura 16 a, foi desprezada. Então, a área a ser considerada (área de troca térmica) é o somatório da área da superfície superior e inferior do disco infinitesimal, as quais possuem dissipação de fluxos de calor exemplificadas na figura 16 b.

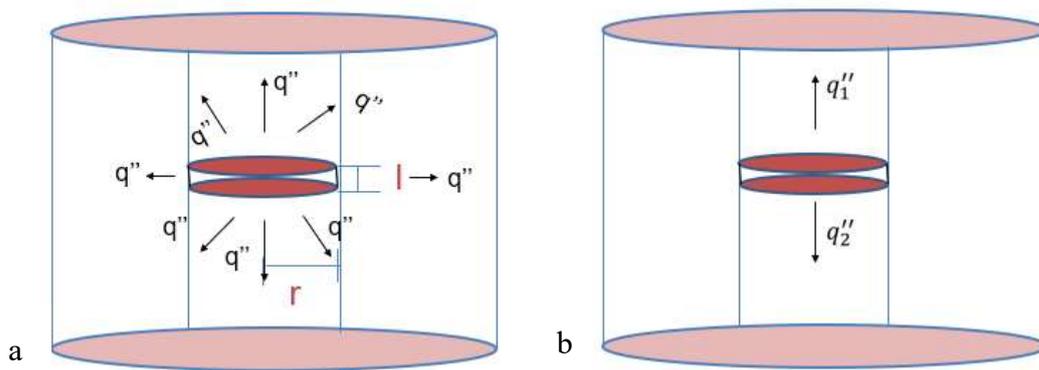


Figura 16- a-Dissipação de fluxo de calor a partir de um disco de espessura l e b- Dissipação de fluxo de calor a partir de um disco infinitesimal

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Considerando que os fluxos de calor dissipados e as áreas das superfícies foram consideradas iguais a equação de geração de calor total é dada por:

$$q'''_{tot} = \frac{q'' * 2\pi r^2}{\pi r^2 l} = \frac{2 * q''}{l} \quad (7)$$

Todavia, através da observações dos resultados dos estudos realizados no próprio software foi verificado que os fluxos de calor dissipados pelas áreas superior e inferior não eram iguais. Desta forma, a geração de calor é dada pela equação 8.

$$q''' = \frac{q_1 + q_2}{V} \quad (8)$$

onde q_1 e q_2 são as taxas de calor dissipada pela área superior e inferior do disco infinitesimal, respectivamente.

Relacionando a geração de calor com os fluxos de calor a equação 9 pode ser obtida.

$$q'''_{total} = \frac{(q_1'' + q_2'') * A}{A * l} = \frac{(q_1'' + q_2'')}{l} \quad (9)$$

onde q_1'' é o fluxo de calor dissipado pela área superior do disco infinitesimal e q_2'' o fluxo de calor dissipado pela área inferior do disco infinitesimal de espessura l .

Deste modo, a equação 10 apresenta a lógica utilizada para gerar o domínio do projeto, um disco infinitesimal, e fazer que este percorra ao longo da peça de trabalho. Basicamente, a expressão caracteriza a lógica que faz a geração de calor só existir em

uma região específica do furo. Esta região se movimenta conforme o tempo avança em função da velocidade de avanço da ferramenta.

$$\begin{cases} \text{Se } vq * t < z \text{ e } z < (vq * t + l) \\ \quad \text{Tenho fluxo de calor} \\ \text{Senão, não tenho fluxo de calor} \end{cases} \quad (10)$$

onde que vq é a velocidade de avanço para os parâmetros de corte utilizados, z é a altura da peça de trabalho, t é o tempo de usinagem, $qtot$ é a geração de calor total e $fluxo(t)$ é o perfil adimensional do fluxo de calor, uma função de intensidade da geração de calor versus tempo.

Para a função $fluxo(t)$ foi utilizado o modelo de fluxo descrito por De Souza (2012) adaptado para o tempo de furação de cada condição de corte do estudo. Para estimar este tempo, a velocidade de avanço e a posição final na broca (23mm) foram consideradas. A tabela 3 apresenta o tempo de furação de cada condição de corte.

Tabela 3-Tempos de furação para cada parâmetro de corte

Velocidade de corte	Avanço	Velocidade de avanço	Tempo de furação
20m/min	0,15 mm/rot	79,57mm/min	8,67 segundos
20m/min	0,3 mm/rot	159,15mm/min	17,35 segundos
60m/min	0,05 mm/rot	79,57mm/min	17,35 segundos
100m/min	0,05mm/rot	132,60mm/min	10,41 segundos

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Com intuito de resultados mais assertivos, um estudo de convergência de malhas foi realizado com o objetivo de selecionar a malha mais adequada para a simulação. Para isto, foi traçado uma linha para que os gráficos de temperatura fossem avaliados, exemplificada na figura 17.

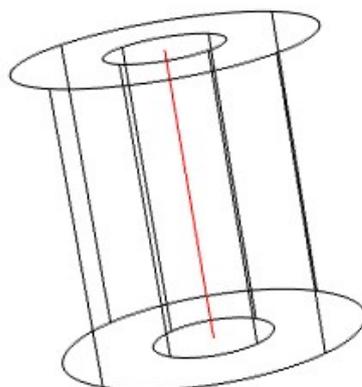


Figura 17- Linha de corte para avaliação da convergência de malhas
 Fonte: Pesquisa direta (2019)

Como pode ser observado pela figura 17, a linha traçada conecta as duas extremidades da peça de trabalho e encontra-se exatamente no centro da mesma.

3.4 Variáveis e indicadores

A tabela 04 apresenta as variáveis pertinentes a esta pesquisa e quais seus respectivos indicadores:

Tabela 4- Variáveis e Indicadores Avanço

Variáveis	Indicadores
Temperatura do corpo de prova	Velocidade de corte
	Avanço de corte
	Geração de calor

Fonte: Pesquisa direta (2019)

3.5 Conclusões finais

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho. Foram especificados o tipo de pesquisa realizada, seus objetivos, procedimentos utilizados, variáveis, indicadores e instrumento de coletas de dados. No capítulo seguinte serão apresentados os resultados, discussões e contribuição do trabalho para o processo de furação no geral.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo tem como base apresentar os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados em laboratório e apresentar os resultados numéricos obtidos com o auxílio do software COMSOL. E, ainda, realizar discussões a partir dos dados encontrados.

4.1 Resultado experimental

Para mensurar as temperaturas os termopares foram fixados nos furos de 2,5mm de diâmetro presentes nos corpos de prova. A figura 18 mostra a identificação dos termopares na peça de trabalho.

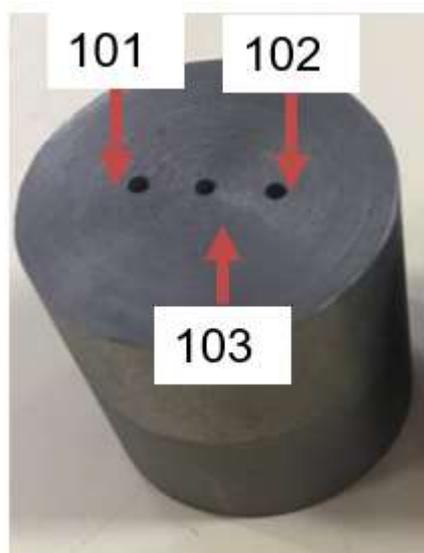


Figura 18- Identificação dos termopares na peça de trabalho
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para cada condição de contorno foram realizados um ensaio e duas réplicas, as figuras 19, 20 e 21 mostram os gráficos gerados nos ensaios com os seguintes parâmetros de corte: $v_c = 60\text{m/min}$ e $f = 0,05\text{mm}$.

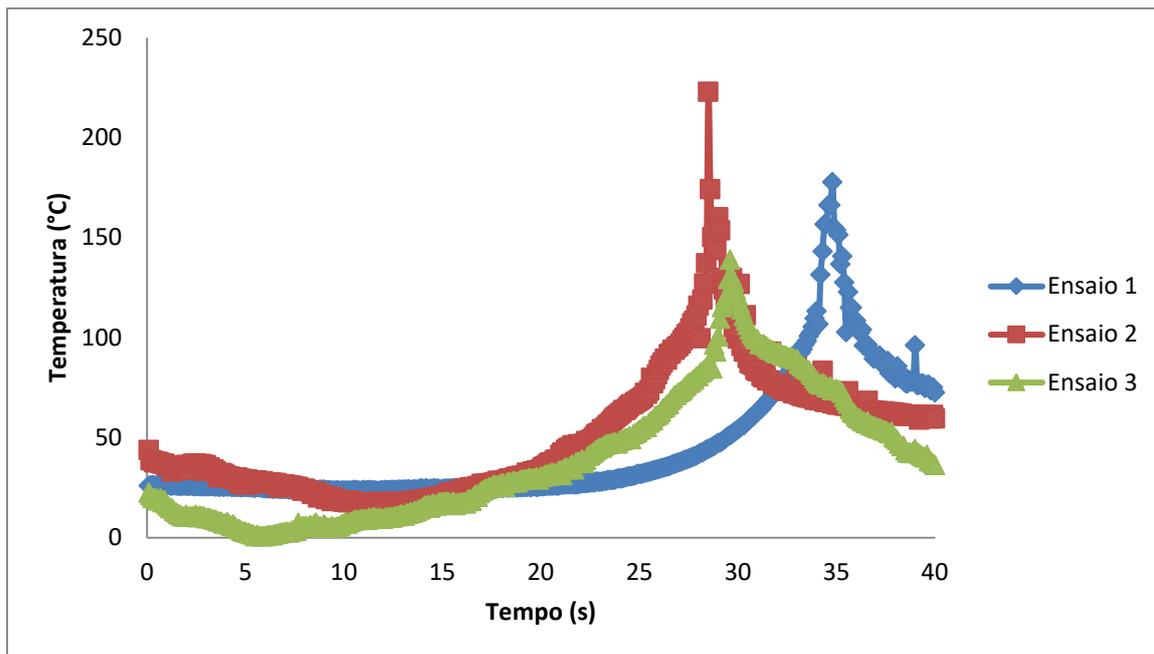


Figura 19- Variação da temperatura no termopar lateral,101, durante o processo de furação

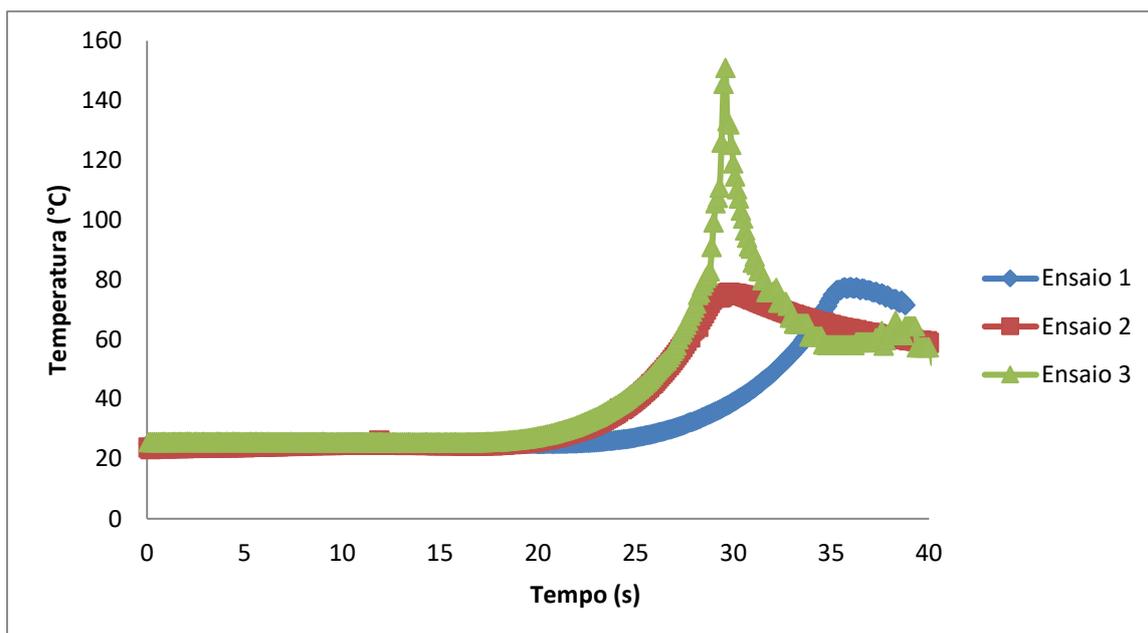


Figura 20- Variação da temperatura no termopar lateral, 102, durante o processo de furação

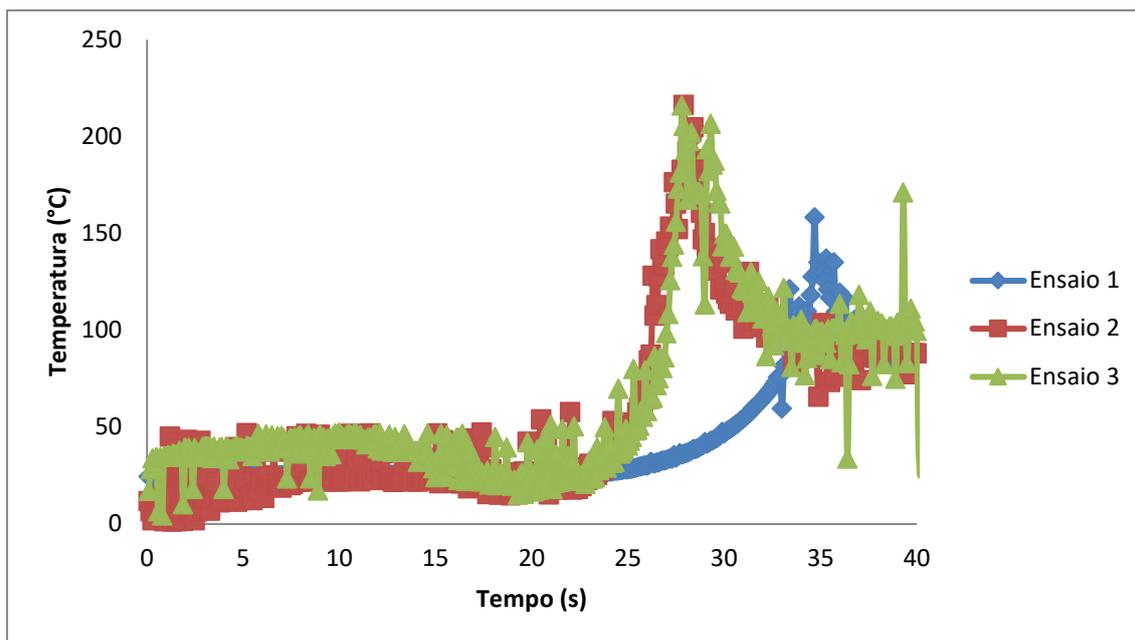


Figura 21- Variação da temperatura no termopar central,103, durante o processo de furação

Observando os resultados das figuras 19, 20 e 21 é possível verificar que o comportamento da curva temperatura versus tempo não teve diferença significativa nas repetições realizadas. Esta representa uma curva característica para o ensaio a qual não teve alterações significativas de formato quando comparado com os demais parâmetros de corte utilizados.

É possível verificar também que os tempos de usinagem encontrados foram maiores que os estimados na tabela 3 o que é justificado pelo fato de que o sistema de aquisição foi acionado junto a CNC o que fez com que o tempo de deslocamento da broca até atingir a peça de trabalho também fosse contabilizado.

Os termopares 101 e 102, cujos gráficos temperatura *versus* tempo podem ser encontrados nas figuras 19 e 20, representam os termopares posicionados nos furos laterais na peça usinada, o que aproximam as extremidades da broca.

É possível observar que a temperatura encontrada nos termopares externos é menor em comparação ao pico encontrado no gráfico referente aos ensaios do termopar 103, figura 21, o qual está localizado no centro da peça usinada.

O centro da broca é caracterizado por altos níveis de deformação o que justifica suas maiores temperaturas. Entretanto, nas posições mais externas a broca a usinagem é

caracterizada por ter o maior ângulo de saída possível motivo pela menor temperatura quando comparado com o termopar central.

A partir das curvas obtidas para os ensaios realizados com a velocidade de corte de 20m/min e avanços variados, as médias e os desvios padrões, medida que expressa o grau de dispersão de um determinado conjunto de dados, dos picos de maior temperatura do termopar central foram calculados com o objetivo de avaliar a influência do avanço na temperatura de usinagem. Deste modo, um gráfico temperatura versus avanço foi gerado o qual pode ser observado na figura 22.

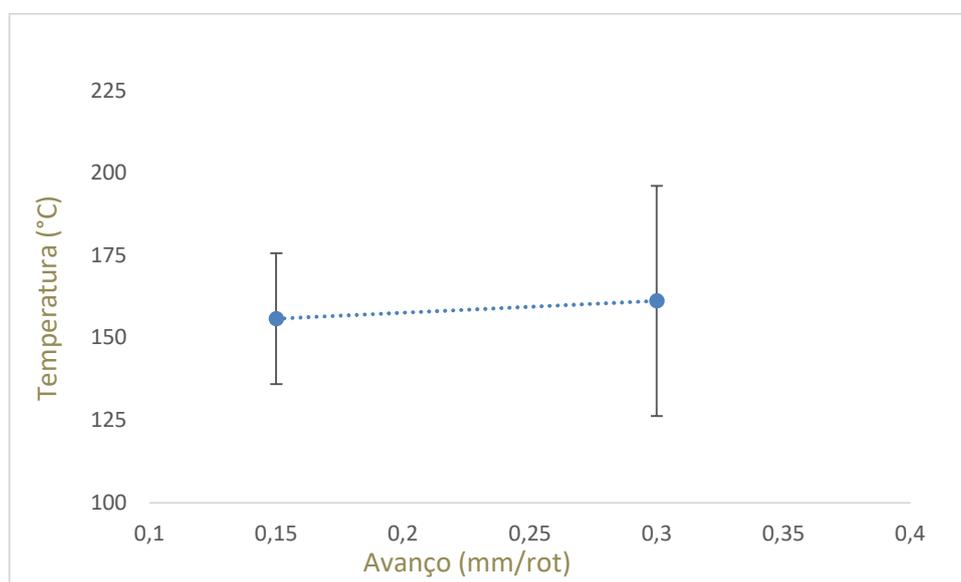


Figura 22- Efeito da variação do avanço na temperatura para o termopar central

De acordo com o gráfico presente na figura 22 a diferença de temperatura das médias referentes aos ensaios realizados não foi muito discrepante, aproximadamente 6°C. Além disto, na repetição dos experimentos foi possível identificar um maior desvio padrão nos dados obtidos para os ensaios referentes ao maior avanço.

Da mesma forma, os termopares laterais foram avaliados e o que apresentou resultados menos dispersivos foi escolhido para estudo. A figura 23 apresenta as médias e os desvios padrões dos ensaios.

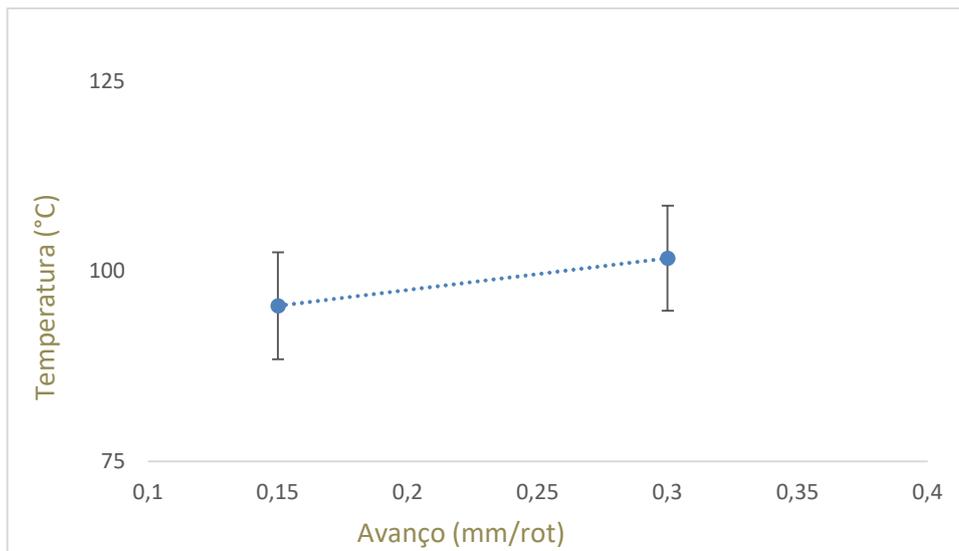


Figura 23-Efeito da variação do avanço na temperatura para o termopar lateral

Para o termopar lateral escolhido como referência, ambos avanços utilizados apresentaram desvio padrão de aproximadamente 7°C . Analogamente ao que aconteceu no termopar central, as temperaturas encontradas também não são muito discrepantes.

Uma das hipóteses que justifica a pequena diferença entre os resultados obtidos é que, associado ao aumento de avanço, o tempo de usinagem é reduzido. O que pode fazer com que este não seja suficiente para a identificação das maiores temperaturas, deixando as duas condições de corte similares.

Com o objetivo de avaliar o efeito da velocidade de corte na temperatura, um gráfico temperatura versus velocidade de corte foi construído com base nas médias e desvios padrões dos valores dos picos de temperatura do termopar central e um dos termopares laterais dos experimentos realizados com avanço fixo. Os dados podem ser encontrados na figura 24.

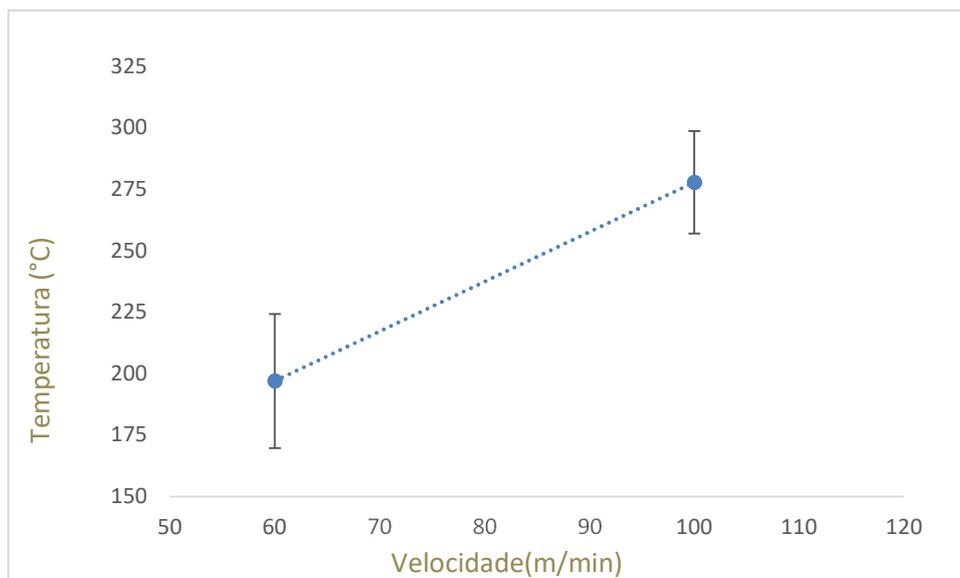


Figura 24- Efeito da variação do avanço na temperatura no termopar central

Com base no gráfico presente na figura 24 é possível verificar que a diferença das médias não foi discreta como a apresentada nos experimentos de variação do avanço. A diferença de temperatura entre as médias dos picos de maior temperatura do termopar central de foi de $80,8^{\circ}\text{C}$ e as maiores temperaturas foram encontradas nos ensaios realizados na maior velocidade de corte: 100m/min.

Além disto, para o termopar central os ensaios realizados com a velocidade de corte de 60m/min apresentaram um desvio padrão de 27,2. Já os ensaios realizados a 100m/min tiveram desvio padrão de 20,9.

Analogamente ao termopar central um dos termopares laterais também foi avaliado e o resultado é apresentado na figura 25.

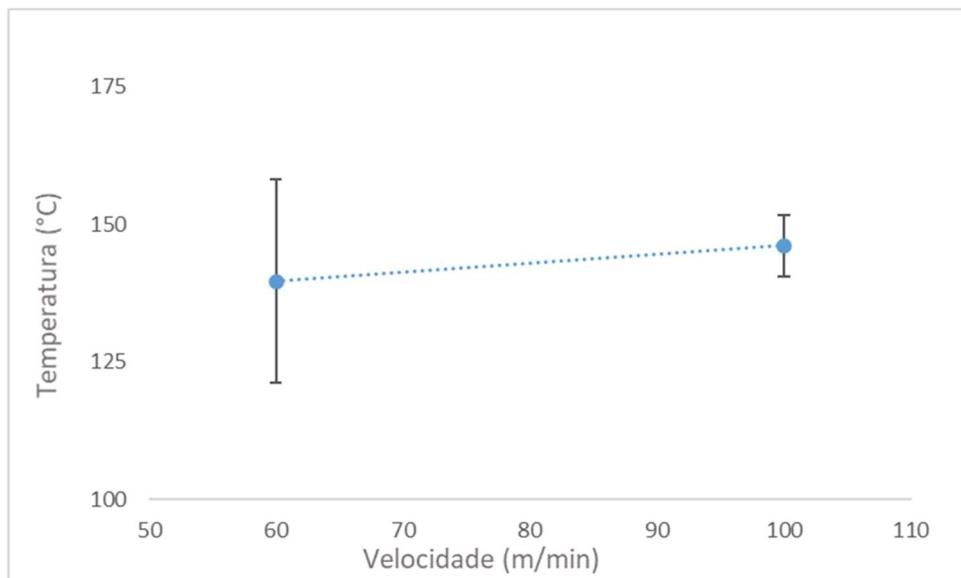


Figura 25- Gráfico do efeito da variação do avanço na temperatura no termopar lateral

A diferença das médias dos picos de maior temperatura foi mais singela que as encontradas no termopar central, aproximadamente $6,4^{\circ}\text{C}$. O desvio padrão encontrado para a velocidade de corte de $60\text{m}/\text{min}$ foi de $18,56$. Já os ensaios realizados a $100\text{m}/\text{min}$ tiveram desvio padrão de $5,58$.

Baseado nos referenciais utilizados, velocidades de corte altas são atreladas a maiores níveis de desgastes da ferramenta e, conseqüentemente maiores temperaturas. Por isso as maiores temperaturas foram identificadas pelos termopares dos ensaios referentes a velocidade de $100\text{m}/\text{min}$.

Já em relação a posição das medições, a posição central é associada a maiores deformações, o que justifica as maiores temperaturas encontradas pelos termopares localizados nesta posição. Entretanto, as posições laterais da peça de corte, referentes as laterais da broca, são caracterizadas por serem regiões onde ocorrem cisalhamento, o que justifica as menores temperaturas em relação a posição central.

4.2 Resultado numérico

Neste subitem serão apresentadas as simulações numéricas realizadas no software comercial COMSOL o qual se baseia na solução de problemas pelo método de elementos finitos.

4.2.1 Convergência de malha

Para a obtenção dos resultados numéricos, como já descrito anteriormente, foi necessário realizar um estudo de convergência de malha para que a estrutura mais adequada fosse selecionada para o estudo.

Cinco tipos de malhas disponíveis no programa foram selecionadas para análise. A tabela 5 apresenta a quantidade de elementos tetraédricos em cada malha numérica analisada.

Tabela 5- Quantidade de elementos tetraédricos para as cinco malhas analisadas

Malha	Número de elementos
Extra fina	303538
Fina	25017
Normal	11915
Grosseira	23954
Extra grosseira	879

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A figura 26 apresenta os perfis de temperatura para o tempo de 10 segundos na linha traçada no centro da peça de trabalho, apresentada na figura 16, para cada malha analisada.

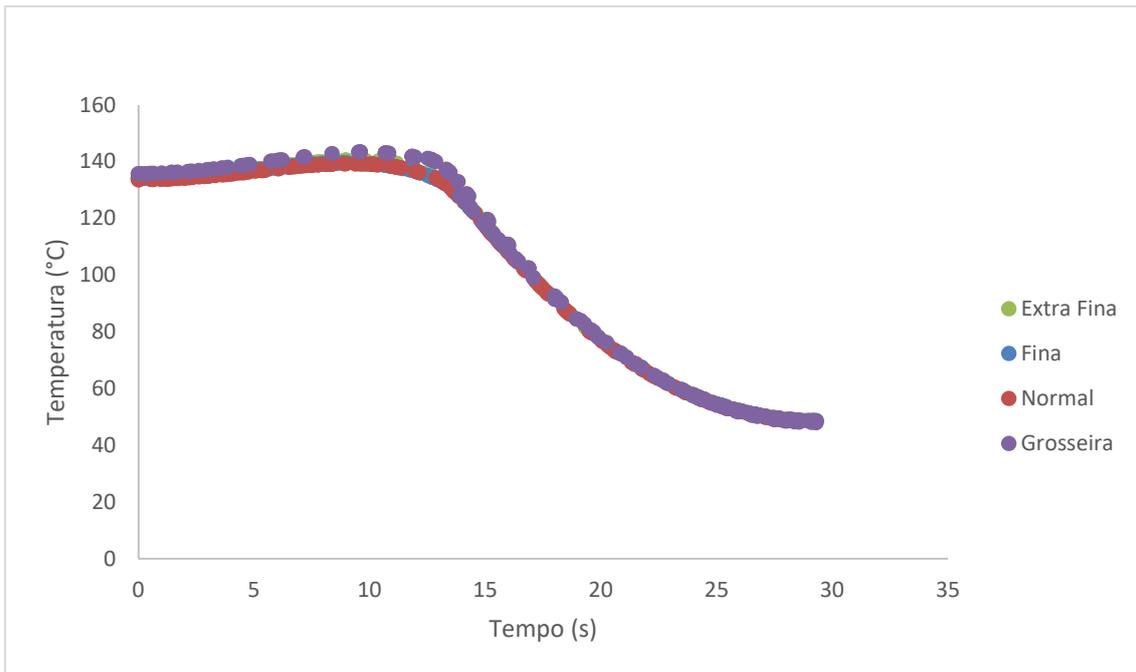


Figura 26- Perfis de temperatura para determinadas malhas
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Como os dados se aproximaram uma análise mais detalhada do ponto que as malhas se divergiam foi necessário o qual foi apresentado pela figura 27.

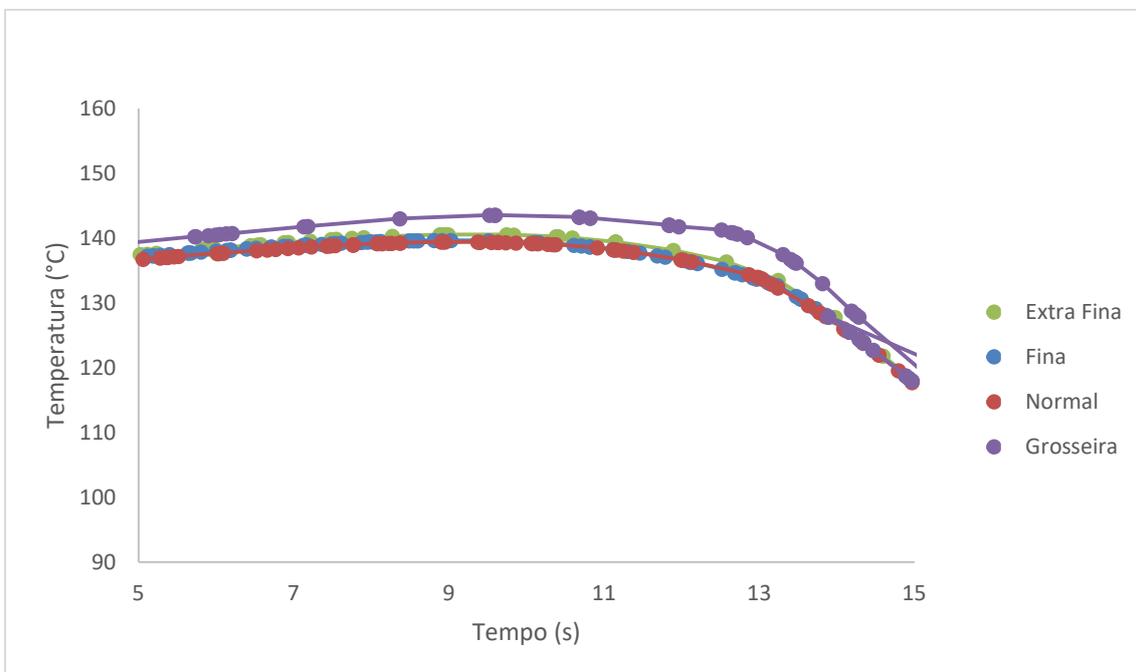


Figura 27- Perfis de temperatura para determinadas malhas
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para que a convergência de malha fosse realizada foi utilizado uma geração de calor e parâmetros de corte arbitrários. As malhas fina, extra fina e normal apresentaram convergência. Todavia, as malhas mais refinadas (fina e extra fina) estão atreladas a maiores custos computacional o que fez que a malha de convergência do estudo escolhida fosse a normal.

4.2.2 Simulação numérica

Após a convergência de malha do modelo numérico, faz-se necessário a determinação da geração de calor volumétrica para a análise das temperaturas a serem simuladas.

Como nos experimentos realizados o fluxo de calor imposto não foi medido, a alternativa foi buscar valores de referência para o fluxo de calor na literatura. Deste modo, o trabalho realizado por De Souza *et al.* (2012) foi tomado como referência devido aos parâmetros de corte, material da peça de trabalho e da ferramenta utilizados. A figura 28 apresenta um exemplo de perfil de fluxo de calor utilizado por De Souza *et al.* (2012).

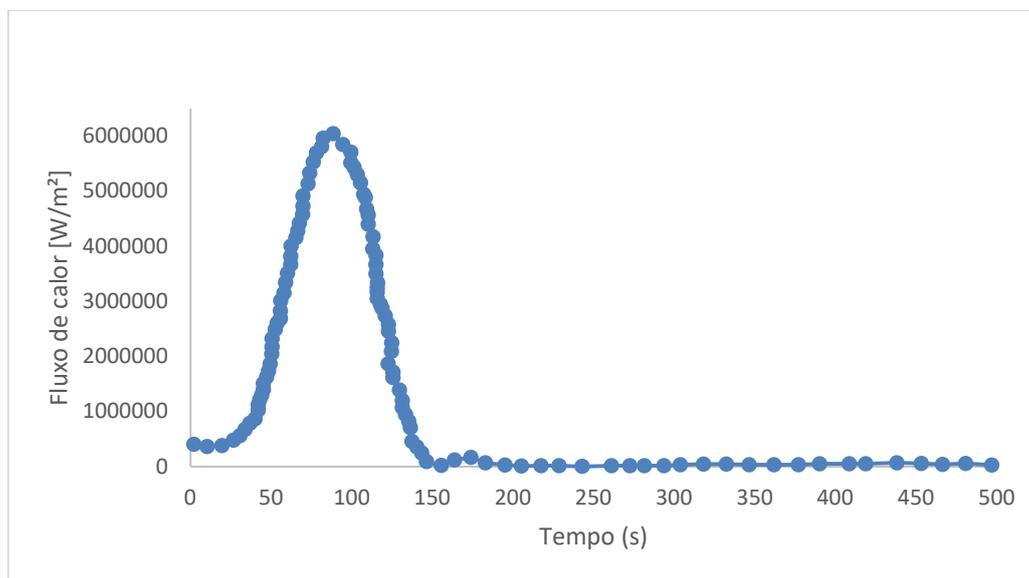


Figura 28- Perfil do fluxo de calor por unidade de tempo
Fonte: De Souza et al. (2012)

Como o tempo de usinagem de De Souza *et al.* (2012) era muito maior que os do presente estudo, o perfil do fluxo de calor foi adaptado para os tempos de corte de cada

condição utilizada nos experimentos. Outra modificação realizada foi a utilização apenas da forma adimensional do perfil de fluxo de calor.

A figura 29 exemplifica uma adaptação do perfil de fluxo de calor para os parâmetros de corte de 60m/min e avanço de 0,05mm/rot, o qual possui um tempo de usinagem de 17,35 segundos.

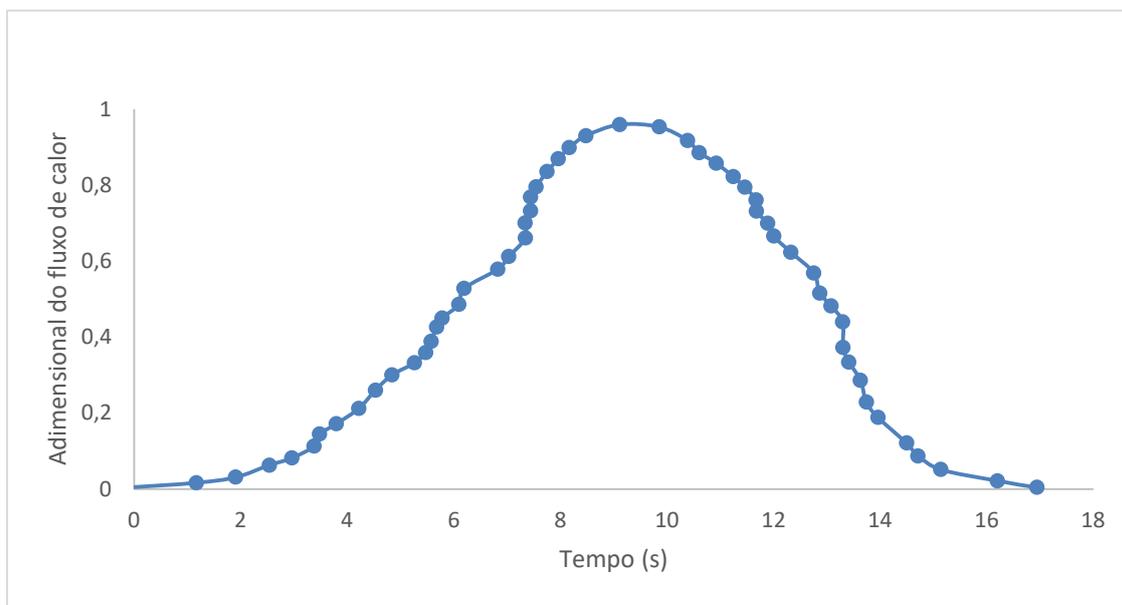


Figura 29-Forma adimensional do fluxo de calor por tempo

A figura 30 apresenta os pontos utilizados para a aferição dos resultados obtidos pelo estudo numérico.

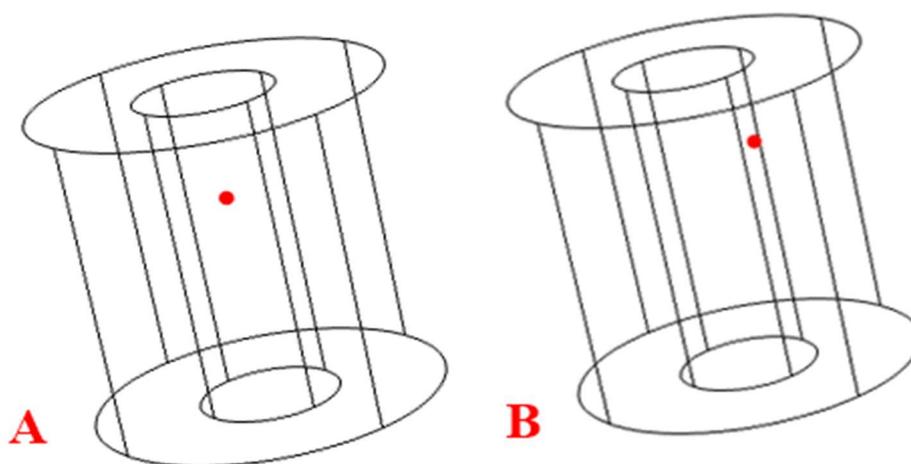


Figura 30- Pontos para medição de temperatura: A- Central e B-Extremidade da broca

De acordo com a figura 30 é possível identificar que os pontos usados para aferição dos resultados numéricos são equivalentes as posições que o termopar central e um dos termopares laterais foram posicionados na peça de trabalho. É importante destacar que devido à similaridade dos resultados encontrados nos dois termopares laterais nos estudos experimentais, apenas um deles foi considerado na simulação numérica.

Os resultados numéricos do estudo realizado utilizando $v_c = 60\text{m/min}$, $f = 0,05\text{mm/rot}$ e geração de calor calculada a partir do fluxo de calor proposto por De Souza *et al.* (2012) foram comparados com os resultados experimentais. O estudo comparativo destes são mostrados na figura 31 e 32.

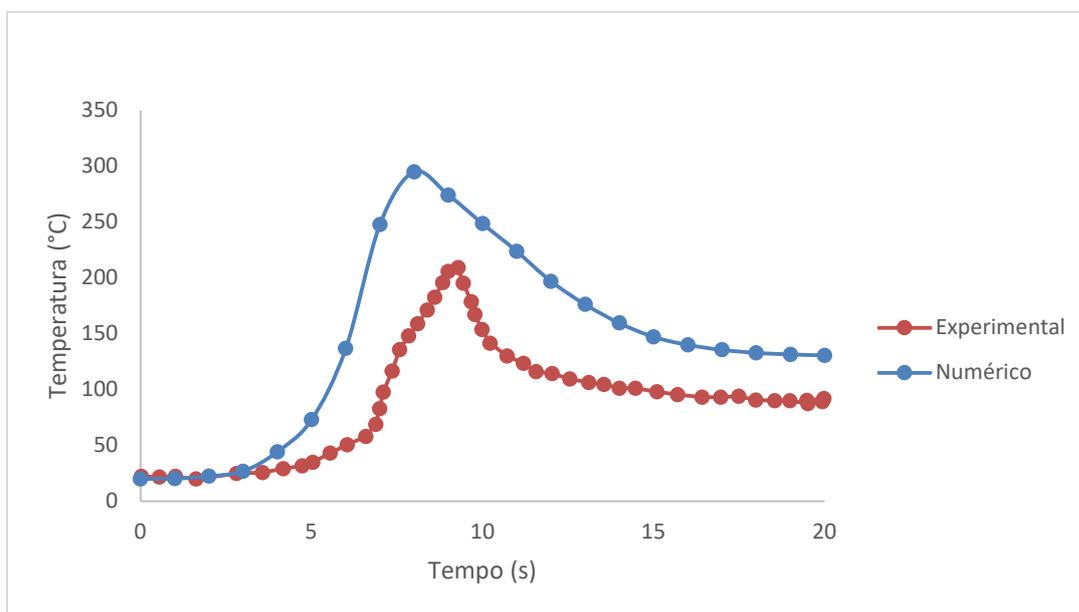


Figura 31-Comparação resultados experimentais e numéricos para o termopar central

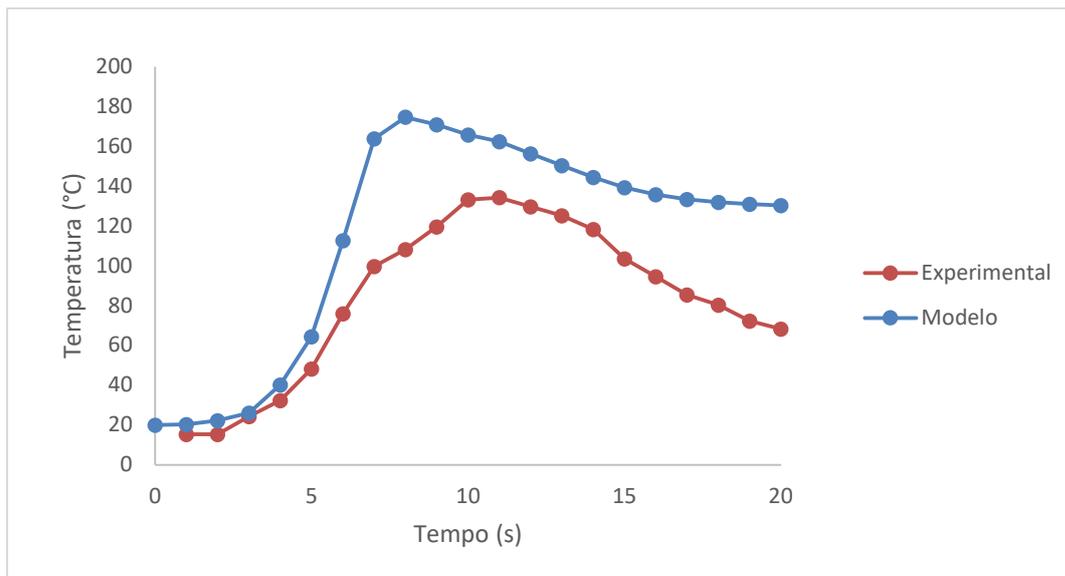


Figura 32- Comparação resultados experimentais e numéricos para o termopar lateral

É possível observar que as temperaturas encontradas numericamente são maiores que as experimentais. Para investigar os resultados numéricos encontrados e verificar a eficácia do modelo, um dos casos apresentados por De Souza *et al.* (2012) em sua tese foi reproduzido.

Basicamente, De Souza *et al.* (2012) realizaram a furação de uma peça cilíndrica de aço microligado, apresentada na figura 10, com velocidade de avanço de 0,00013m/s e profundidade de 0,035m. O perfil do fluxo de calor utilizado pode ser apresentado na figura 33.

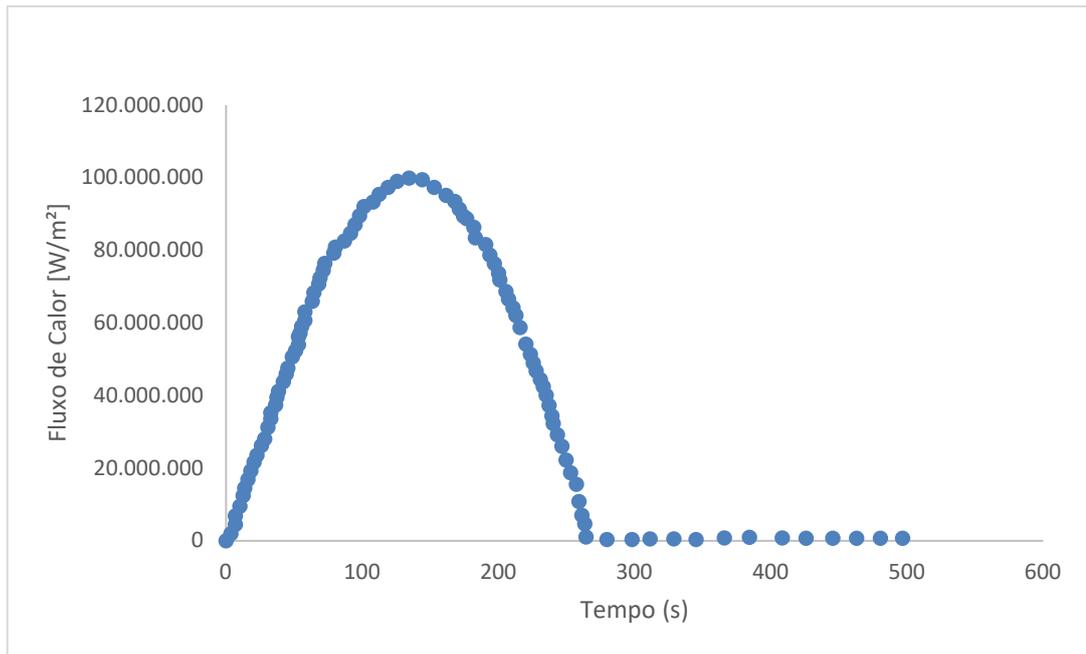


Figura 33- Perfil do fluxo de calor imposto para a peça de trabalho
 Fonte: De Souza *et al.* (2012)

Deste modo, os parâmetros de corte utilizados por De Souza *et al.* (2012), as dimensões da peça e ferramenta assim como seus respectivos materiais foram inseridos no modelo proposto. Os seis pontos de medição de temperatura são equivalentes as posições dos termopares apresentados na figura 10. As figuras 34 e 35 apresentam os resultados de De Souza *et al.* (2012) e do modelo proposto, respectivamente.

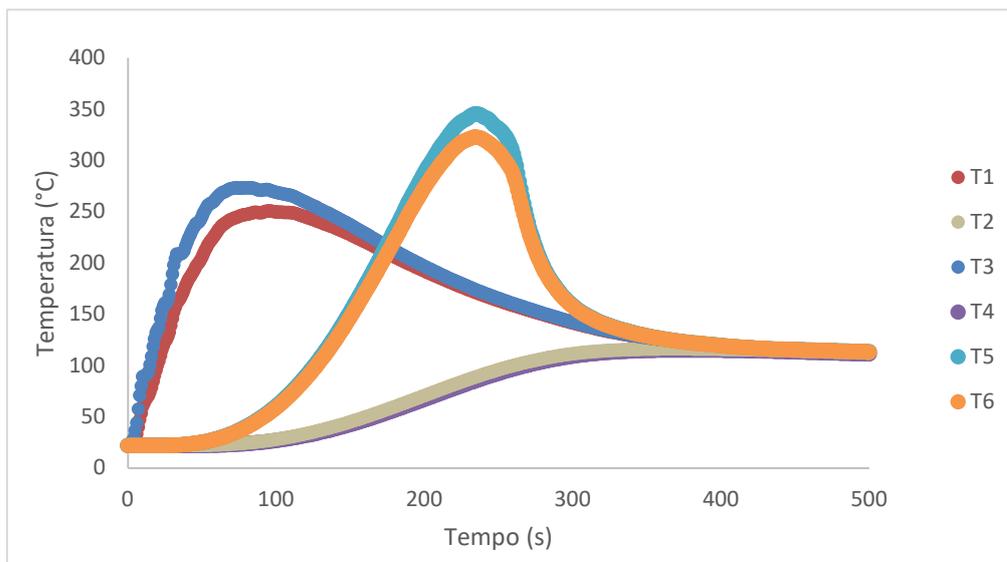


Figura 34- Resultados encontrados por De Souza *et al.* (2012)
 Fonte: De Souza *et al.* (2012)

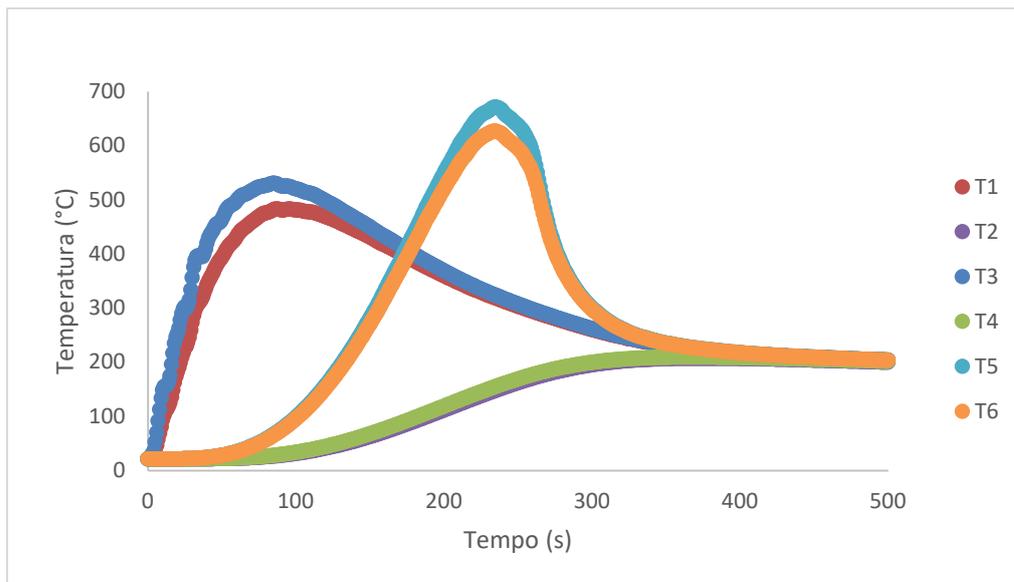


Figura 35- Resultados encontrados utilizando modelo proposto
 Fonte: Pesquisa direta (2019)

Após a comparação das duas figuras foi possível verificar que, qualitativamente, o perfil de temperatura encontrado entre os modelos é similar. No entanto, quantitativamente, os valores de temperatura são diferentes entre os estudos. Uma série de hipóteses foram levantadas para justificar os elevados valores de temperatura encontrados:

- A literatura apresenta diversos trabalhos de simulação numérica envolvendo o processo de furação, mas os parâmetros de corte e materiais utilizados não são iguais aos usados no ensaio realizado neste trabalho;
- O ideal seria estimar o próprio fluxo de calor, o que pode ser feito por técnicas de problema inverso ou medições experimentais, o que não foi o foco do trabalho;
- Para utilização de fluxo de calor como condição de contorno é necessário a presença de fronteiras para sua aplicação. Para que isso fosse aplicado no presente estudo seria necessário a remoção de material, o que não foi possível ser realizado com o modelo proposto;
- A literatura referente a porcentagem de calor que é dissipada para a ferramenta, peça e cavaco estão presentes em uma faixa extensa. O que dificulta a caracterização exata da quantidade de calor que é transportada para cada região no estudo realizado;

- Quando se considera uma geração de calor volumétrica, a qual foi utilizada no modelo como tendo a forma de disco infinitesimal, existem duas áreas de dissipação de calor em forma de fluxo: área superior e área inferior do disco. E a proporção de transferência de calor por estas áreas altera de acordo com o avanço da ferramenta. A figura 36 mostra o percurso da geração de calor volumétrica na qual pode ser observado a dissipação do calor nas duas áreas descritas.

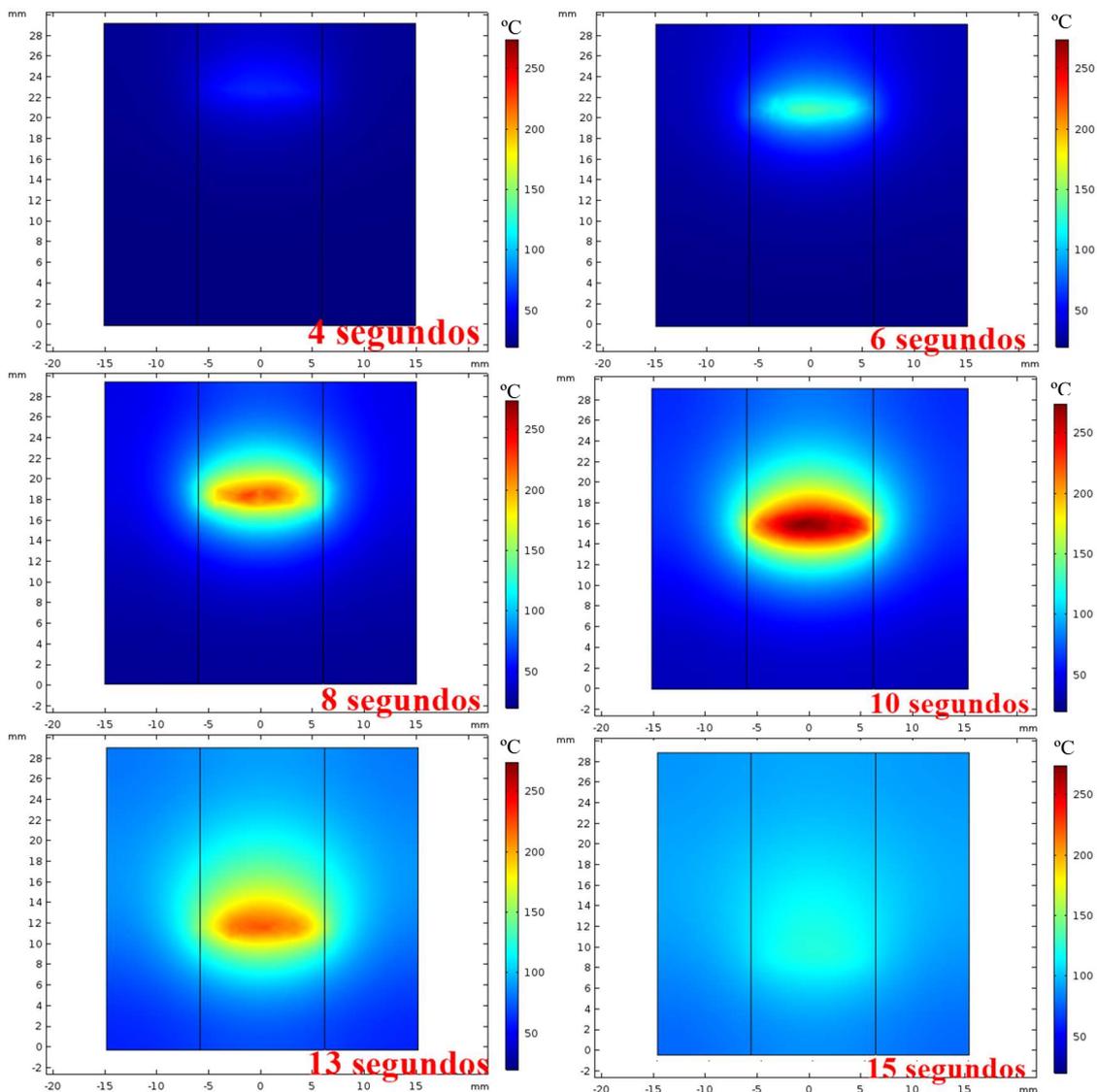


Figura 36- Percurso da geração de calor na peça de trabalho

É possível verificar na figura 36 que nos instantes iniciais a geração de calor é menos intensa e atinge maiores valores com o avanço do tempo, o que se deve a

característica do perfil do fluxo de calor inserido no modelo. A posição final da geração de calor é equivalente a posição final da broca.

Devido a utilização de diferentes parâmetros de corte e, conseqüentemente, diferentes tempos de usinagem, a localização dos pontos de maior temperatura serão diferentes.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões referentes ao trabalho realizado e as recomendações para trabalhos futuros com base nos resultados encontrados e nas discussões realizadas.

O propósito do trabalho foi avaliar as influências dos parâmetros de corte na temperatura de furação de forma experimental e numérica.

Para o trabalho experimental, termopares foram fixados às peças de trabalho e com base nos picos de maior temperatura encontrados, as médias e os desvios padrões foram calculados para o termopar central e para um dos termopares laterais.

Para os ensaios que avaliaram a influência do avanço nas temperaturas da furação não houve muita discrepância nos resultados encontrados. Esta similaridade de resultados está associada ao menor tempo de usinagem dos maiores avanços, o qual pode não ser suficiente para a identificação das maiores temperaturas.

Em relação ao efeito da velocidade de corte, os maiores valores de temperatura encontrados estão associados às maiores velocidades de corte. Isto se deve ao fato de que estas são associadas a maiores níveis de desgastes da ferramenta e, conseqüentemente, maiores temperaturas.

Quando a posição dos termopares é avaliada, identifica-se maiores temperaturas na posição central. Fato que é associado à maiores deformações. Já as posições referentes as laterais da broca, são caracterizadas por serem regiões onde ocorre cisalhamento, justificando as menores temperaturas encontradas em relação a posição central.

Numericamente, o software COMSOL foi utilizado para avaliar os efeitos dos parâmetros de corte nas temperaturas durante a furação. O deslocamento de uma geração de calor volumétrica em formato de um disco infinitesimal foi adotado. Após a aferição dos resultados foi possível identificar que o modelo apresentou resultados divergentes dos encontrados de forma experimental.

Portanto, conclui-se que o presente trabalho não alcançou todos os seus objetivos e não respondeu satisfatoriamente à questão problema. O modelo experimental construído contribuiu para o entendimento dos efeitos dos parâmetros de corte na furação e, ainda, apresentou uma nova forma de inserção do termopar na peça de trabalho. Já o modelo numérico apresentou curvas de temperaturas que possuem pontos de máximos acima da

faixa de desvio padrão apresentadas nos ensaios experimentais. O que provou que para que os resultados fossem efetivos, o material da peça deveria ser removido, o que geraria fronteiras para a inserção de fluxos de calor. E, ainda, a forma mais assertiva de inserir o fluxo de calor no modelo, seria estimar o próprio fluxo de calor de forma experimental.

5.1 Recomendações

- Criar um modelo numérico que caracterize a remoção de material da peça de trabalho para que seja possível trabalhar com fluxo de calor nas fronteiras;
- Realizar experimentos medindo o fluxo de calor de cada parâmetro de corte utilizado;
- Realizar estimativas para o fluxo de calor no processo de furação;
- Realizar estimativas da quantidade de calor dissipada para a peça, ferramenta e cavaco;
- Realizar experimentos e modelos numéricos para a mudança de material da peça de corte.

REFERÊNCIAS

ABAGGE, M. 1998. Necrose Térmica do Osso Produzida por Perfuração com Broca Metálica, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6175: Processos Mecânicos de Usinagem. Rio de Janeiro, 1972.

AGAPIOU, J. S.; DEVRIES, M. F. On the determination of thermal phenomena during drilling—Part I. Analytical models of twist drill temperature distributions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 30, n. 2, p. 203-215, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Critério de Classificação dos Aços, NBR NM 172/2000. Rio de Janeiro, 2000.

AZEVEDO et al. Análise de tensões em materiais sólidos de espuma de poliuretano rígidas sob furação, 2016.

BEZERRA, A. A. Influência dos principais parâmetros de corte no processo dealargamento de uma liga de alumínio-silício. 1998. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1998.

BENO, Tomas; HULLING, U. Measurement of cutting edge temperature in drilling. *Procedia CIRP*, v. 3, p. 531-536, 2012.

BONO, M. Thesis on experimental and analytical issues in drilling, The University of Michigan, 2001.

BONO, Matthew; NI, Jun. The location of the maximum temperature on the cutting edges of a drill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 7-8, p. 901-907, 2006.

BORBA, Rodrigo Barros de. Estudo da influência das afiações em brocas escalonadas de canal reto na furação da liga de alumínio SAE 306. São João Del-Rei, 2013.

BRANDAO, Lincoln Cardoso; COELHO, Reginaldo Teixeira; LAURO, Carlos Henrique. Contribution to dynamic characteristics of the cutting temperature in the drilling process considering one-dimension heat flow. *Applied thermal engineering*, v. 31, n. 17-18, p. 3806-3813, 2011.

CASTILLO, Willian Jefferson González. Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos, 2005.

CASTRO, Pablo Ricardo Amarante. Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal, 2001.

ÇAKIROĞLU, Ramazan; ACIR, Adem. Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method. *Measurement*, v. 46, n. 9, p. 3525-3531, 2013.

CUESTA, M. et al. Heat transferred to the workpiece based on temperature measurements by IR technique in dry and lubricated drilling of Inconel 718. *Applied Thermal Engineering*, v. 104, p. 309-318, 2016.

DE SOUSA, Priscila FB et al. Estimation of heat flux and temperature field during drilling process using dynamic observers based on Green's function. *Applied Thermal Engineering*, v. 48, p. 144-154, 2012.

DEMO, Pedro. *Metodologia científica em ciências sociais*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1995.

DÍAZ-ÁLVAREZ, J. et al. Numerical modelling of the thermal effects on material in drilling processes Ti6Al4V Alloy. *Procedia engineering*, v. 132, p. 427-432, 2015.

DIN 8580 Fertigungsverfahren. Berlin: Beuth Vervag, 1985.

DINIZ, et al. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: MM Editora, 1999. 244 p.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, 5ª ed, São Paulo, Artliber, 2006.

DOLODARENKO, A. G., HAM, I. Effects of built-up edge in drilling. *ASME*, p. 287-292, 1976.

FERNANDES et. al., Influence of bone drilling parameters on the thermal stress distribution, 2016.

FERNANDES et al. Thermal evaluation of bone drilling in a cortical bone with and without irrigation, 2015.

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: E. Blücher, 1997.

FIGUEIREDO, Alisson Augusto Azevedo. *Uso de correlações entre temperaturas superficiais e qualificação da técnica de imagens infravermelhas para a detecção e localização de tumores de mama*. 2018. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

FLEISCHER, J.; PABST, R.; KELEMEN, S. Heat flow simulation for dry machining of power train castings. *CIRP annals*, v. 56, n. 1, p. 117-122, 2007.

GIASIN, Khaled; AYVAR-SOBERANIS, S.; HODZIC, A. Evaluation of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication effects on machining GLARE laminates using design of experiments. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 533-548, 2016.

GIL, Antonio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOK et al., Optimization of processing parameters of a developed new driller system for orthopedic surgery applications using Taguchi method, 2014.

HUANG, Cheng-Hung et al. A three-dimensional inverse problem in estimating the applied heat flux of a titanium drilling—Theoretical and experimental studies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 50, n. 17-18, p. 3265-3277, 2007.

KE, F., Ni, J e STEPHENSON, D. A. Continuous chip formation in drilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, article in press, PP. 1-7, 2005.

KIMINAMI et al., *Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos*. São Paulo, 1 ed, 2013.

KÖNIG, W., KLOCKE F., *Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren*, 5 Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1997.

KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren* (Tradução: Prof. Dr.-Ing WALTER L. WEINGAERTNER). Düsseldorf: 4. ed. VDI. 1990. 416 p.

LI, Rui; SHIH, Albert J. Spiral point drill temperature and stress in high-throughput drilling of titanium. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, n. 12-13, p. 2005-2017, 2007.

MACHADO, R. A.; SILVA, M. B.; *Usinagem dos metais*. 4. rev. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Universidade Federal de Uberlândia, 1999.

MACHADO, Álisson Rocha et al. *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher, 2015.

MIRANDA, G. W. A., *Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAlN*. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

POLIT, D.F.; BECK, C.T.; HUNGLER, B.P. *Fundamentos de Pesquisa em Enfermagem: métodos, avaliação e utilização*. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

SEZEK, S., AKSKAL, B., KARACA, F. 2012. Influence of drill parameters on bone temperature and necrosis: A FEM modelling and in vitro experiments, *Journal of Comp. Materials Science*, 60, p.13-18.

SILVA, E. L. MENEZES, E. M. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 4ª ed. 2005 - Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte II*. 2. ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 1995, 326 p.,Bibliografia: p. 1-32.

Substech. Grey cast iron ASTM 40. Disponível em: < https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=grey_cast_iron_astm_40 > . Acesso em 05 de Novembro de 2019.

TEIXEIRA, Cleiton Rodrigues. *Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos furos produzidos*, 1995.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Metal Cutting. 4. ed. London: Butterworths-Heinemann Ltd, 2000.

TONSHOFF et al. Machining of Holes Developments in Drilling Technology, 2008.

TU et. al., 2013. Finite Element Simulations of Bone Temperature Rise During Bone Drilling Based on a Bone Analog, Journal of Medical Biological Eng., 33(3), p.269-274.

UÇAK, Necati e ÇIÇEK, Adem. The effects of cutting conditions on cutting temperatura and hole quality in drilling of inconel 718 using solid carbide drills. Journal of manufacturing process. Pages 662-673. 201.

VIERGE, G., 1953, Die Energieverteilung und die Temperatur bei der Zerspaltung, Werkstatt und Betrieb, 11:691–703.

WARNECKE, G., 1974, Spanbildung bei metallischen Werkstoffen, ed. T.V. Resch

WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B. Fundamentos de Usinagem, Furação, Torneamento Interno, Mandrilamento e Rebarbação. 1º Relatório Convênio Rudolph-LMP, Florianópolis, UFSC, 1993.

YAN, S.; ZHU, D.; ZHUANG, K.; ZHANG, X. & DING, H. Modeling and analysis of coated tool temperature variation in dry mil ling of Inconel 718 turbine blade considering flank wear effect Journal of Materials Processing Technology, 2014, v 214 , n 12 , p 2985 – 3001

ZERSPANTECHNIK, Vieweg Braunschweig 1977.

Certifico que a aluna **Júlia Nascimento Costa**, autora do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Análise numérica e experimental da influência dos parâmetros de corte na temperatura do processo de furação**”, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



DSc. Igor Cesar Pereira
Orientador



DSc. Alisson Augusto Azevedo Figueredo
Coorientador

Ouro Preto, 16 de dezembro de 2019