



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



**SIMULAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS
NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO
UTILIZANDO O *SOFTWARE ADVANTEDGE™***

MARCELO BORBA JÚNIOR

UBERLÂNDIA – MG

2019

MARCELO BORBA JUNIOR

**SIMULAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NA
FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO UTILIZANDO O
*SOFTWARE ADVANTEDGE™***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

UBERLÂNDIA – MG

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo. Pelo dom da vida, pela minha saúde e pela sabedoria para poder concluir um curso de alta excelência que é a Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Agradeço aos meus pais, Marcelo Borba e Neiry Lucia Guedes Borba, por sempre estarem presentes em todo esse percurso, dando apoio, acreditando em mim e me fazendo seguir em frente nessa jornada de cinco anos que está se encerrando.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, agradeço por me proporcionar o conhecimento e o suporte durante todo o curso de Engenharia Mecânica.

A todos os professores que com saber e competência trouxeram a mim o legado de me formar de maneira séria e promissora, agradeço infinitamente!

Agradeço ao meu orientador Prof. Márcio Bacci da Silva e aos meus orientadores, o doutorando Ivanilson Sousa Costa e o mestrando Gustavo Vilela, obrigado por tão significativo suporte, não só para desenvolvimento deste trabalho, mas também pelos projetos de pesquisas. Obrigado pelo tempo que disponibilizaram para me ajudar em tudo.

Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, agradeço pelo suporte com a disponibilização dos equipamentos, materiais e locais para execução das ações.

Por fim, agradeço aos todos os envolvidos, familiares e amigos que de alguma forma contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

RESUMO

Calor e temperaturas são grandezas que influenciam grandemente os processos de usinagem. Entretanto, obter resultados experimentais de calor e temperaturas não é uma tarefa simples. Metodologias experimentais, analíticas e numéricas tem sido proposta para superar esse desafio. Nesse contexto, este trabalho teve o objetivo de simular a distribuição de temperaturas durante a furação do ferro fundido cinzento. Para isso, foi utilizado o *software* comercial de elementos finitos *AdvantEdgeTM* da *Third Wave Systems*. Medições experimentais foram realizadas utilizando uma metodologia calorimétrica. Os resultados da simulação demonstram que o *software* utilizado é uma ferramenta útil para obtenção da distribuição de temperaturas na peça, cavaco e ferramenta de corte. A temperatura máxima do sistema ocorreu na ferramenta. O método calorimétrico apresentou que 48% da energia mecânica em usinagem foi transformada em calor.

Palavras-chave: temperatura; calor; furação; ferro fundido cinzento, método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Heat and temperatures are quantities that greatly influence machining processes. However, obtaining experimental heat and temperature results is not a simple task. Experimental, analytical and numerical methodologies have been proposed to overcome this challenge. In this context, this work aimed to simulate the temperature distribution during the drilling of a gray cast iron. For this, we used the commercial finite element softwares AdvantEdge The maximum temperature of the system was in the tool. The calorimetric method showed that 48% of the mechanical energy in machining was transformed into heat.TM of Third Wave Systems. Experimental measurements were performed using a calorimetric methodology. The simulation results show that the software used is a useful tool to obtain the temperature distribution in the part, chip and cutting tool.

Key words: temperature; heat; drilling process; gray cast iron, finite element method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ângulos de corte de uma broca helicoidal	11
Figura 2 – Partição típica de calor gerado em usinagem entre cavacos, a ferramenta de corte e a peça em baixo carbono AISI 1113.....	12
Figura 3 - Zonas de geração e dissipação de calor em usinagem.....	15
Figura 4 - Temperaturas máximas na interface cavaco-ferramenta em função da velocidade de corte	18
Figura 5 - Medição de temperaturas por termopares inseridos na ferramenta.	20
Figura 6 - Esquema geral do método do termopar ferramenta-peça utilizado na medição da temperatura de usinagem.	20
Figura 7 - Medição de temperaturas por técnica metalográfica na usinagem de aço de médio carbono com $V_c = 27$ m/min e $f = 0,25$ mm/volta. As isothermas são determinadas pela medição de dureza.....	21
Figura 8 - Medição de temperaturas por radiação de calor por sensores infravermelhos	22
Figura 9 - Método de medição através de sensor infravermelho.....	23
Figura 10 - Montagem experimental para medição da distribuição de temperatura pelo método PVD.	23
Figura 11 - Visão em corte de um calorímetro de Lavoisier e Laplace.....	24
Figura 12 - Esquemas de calorímetros de água para estimativa de: (a) calor total gerado na furação; (b) calor dissipado pela ferramenta; (c) calor dissipado pelos cavacos.....	26
Figura 13 - a) Tensão b) Temperatura c) Deformação	28
Figura 14 - a) Malha da broca b) Malha da peça.....	29
Figura 15 - Broca utilizada para testes experimentais.....	29
Figura 16 - Distribuição de temperaturas na broca (em °C) após 12,7 mm de usinagem, velocidade de corte de 73,2 m/min, broca de metal duro.....	30
Figura 17 - Comparação de resultados entre os softwares ABAQUS e AdvantEdgeTM	32
Figura 18 - Calorímetro do trabalho de Silva (2015).	33
Figura 19 - Fratura frágil de amostra de ferro fundido cinzento, ensaio de tração.	35
Figura 20 - a) Calorímetro de água com recipientes cilíndricos coaxiais encaixados. O corpo de prova é fixado por parafuso Allen M6 x 10 mm; b) Tampa do calorímetro de água.....	36
Figura 21 - Foto do equipamento pronto, no momento do começo da usinagem	37
Figura 22 - - Imagem da simulação com a broca no furo.....	38
Figura 23 - Interface do AdvantEdgeTM e alguns dos parâmetros necessários para simulação de furação	39
Figura 24 - Contato direto entre broca e cavaco (simulação 1).....	41
Figura 25 - Simulação 1: a) Broca de aço rápido sem revestimento. b) Polinômio de temperatura da broca	42
Figura 26 - Simulação 2: a) Broca de aço rápido com revestimento de TiAlN. b) Polinômio de temperatura da broca	43

Figura 27 - Simulação 3: a) Broca de metal duro com revestimento de TiN. b) Polinômio de temperatura da broca.....	44
Figura 28 - Distribuição de temperaturas dos cavacos; a) ferramenta sem revestimento; b) com revestimento de TiNAl	44
Figura 29 - Distribuição de temperaturas na ferramenta e no cavaco da simulação 3 ...	45
Figura 30 - Distribuição de temperaturas na ferramenta – peça dentro do furo da simulação 1	45
Figura 31 - Variação de temperatura no corpo de prova durante o experimento 1	46
Figura 32 - Variação de temperatura no corpo de prova durante o experimento 3	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentagens de calor distribuídos entre os elementos da usinagem e seus respectivos processos.....	15
Tabela 2 - Resultados experimentais do torneamento do aço carbono AISI 1045.....	27
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de tração.....	34
Tabela 4 - Parâmetros da Peça de Trabalho	38
Tabela 5 - Parâmetros da Broca.....	39

LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

CNC	Controle Numérico Computadorizado
AISI	Instituição Americana de Aços e Ferros
APC	Aresta Postiça de Corte
IR	Radiação Infravermelha
HSM	Usinagem em Alta Velocidade
PVD	Deposição Física de Vapor
PVC	Policloreto de Vinila
DIN	Instituto Alemão para Normatização
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais

SÍMBOLOS

α	[°]	Ângulo de incidência
β	[°]	Ângulo de cunha
γ	[°]	Ângulo de saída
σ	[°]	Ângulo de ponta
ψ	[°]	Ângulo da aresta transversal
r_ϵ	[mm]	Raio de quina
Qz	[J]	Quantidade de calor produzida pela deformação e pelo cisalhamento do cavaco (zona de cisalhamento primário)
Qa1	[J]	Quantidade de calor produzida pelo atrito do cavaco com a ferramenta de corte (zona de cisalhamento secundário)
Qa2	[J]	Quantidade de calor produzida pelo atrito da peça com a ferramenta de corte (zona de cisalhamento terciário)
Qc	[J]	Quantidade de calor dissipada pelo cavaco
Qp	[J]	Quantidade de calor dissipada pela peça

Q_f	[J]	Quantidade de calor dissipada pela ferramenta de corte
Q_{ma}	[J]	Quantidade de calor dissipada pelo meio ambiente
$\Delta\theta_c$	[°]	Aumento de temperatura
F_c	[N]	Força de corte
F_f	[N]	Força de avanço
J	[4,184 J/cal]	Equivalente mecânico de calor
ρ	[g/cm ³ ou kg/m ³]	Densidade ou massa específica
c	[cal/g.°C]	Calor específico
h	[mm]	Espessura de corte
b	[mm]	Largura de corte
F_z	[N]	Força de cisalhamento
V_z	[m/min]	Velocidade de cisalhamento
V_c	[m/min]	Velocidade de corte
f	[mm/volta]	Avanço
Q	[J]	Calor
Q_{perda}	[J]	Quantidade de calor perdida
Q_{ganho}	[J]	Quantidade de calor recebida
m	[kg]	Massa de água em que os objetos estarão submersos
ΔT	[°C]	Variação da temperatura da água
η	[rpm]	Rotações
a_p	[mm]	Profundidade do furo
E_{tot}	[J]	Energia total do sistema

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	11
CAPÍTULO II.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. TEMPERATURA EM USINAGEM.....	14
2.2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NA USINAGEM.....	19
2.3. MÉTODO CALORIMÉTRICO PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	24
2.4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PROCESSOS DE USINAGEM.....	28
2.5. SOFTWARE ADVANTEDGE.....	31
CAPÍTULO III.....	33
3. MATERIAIS UTILIZADOS.....	33
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA.....	34
CAPÍTULO IV.....	36
4. METODOLOGIA.....	36
CAPÍTULO V.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1. SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DE FURAÇÃO.....	41
CAPÍTULO VI.....	49
6. CONCLUSÃO.....	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um termo empregado em todos os processos em que se confecciona a uma peça qualquer acabamento, formas ou dimensões, ou mesmo uma combinação desses três itens, produzindo cavaco, que por sua vez representa a porção de material da peça removida pela ferramenta e que apresenta forma geométrica irregular (FERRARESI, 2012). A usinagem começou como uma atividade manual e evoluiu de tal forma que hoje já se usam máquinas controladas por comando numérico, conhecidas como CNC. São máquinas de ultra precisão que possibilitam atender os mercados automotivo, naval, aeroespacial, de eletrodomésticos, de eletrônicos etc.

A furação é um processo de usinagem que possui o objetivo de produzir furos. Utiliza-se para esse fim, uma broca que executa um movimento relativo de rotação entre a peça e a ferramenta (STEMMER, 2005). o movimento de avanço é responsável pela retirada de cavaco de dentro do furo, assim como os ângulos pré-estabelecidos da ferramenta de corte. Na Figura 1 é apresentada a geometria e os ângulos de corte de uma broca helicoidal.

Figura 1 – Ângulos de corte de uma broca helicoidal

α = ângulo de incidência

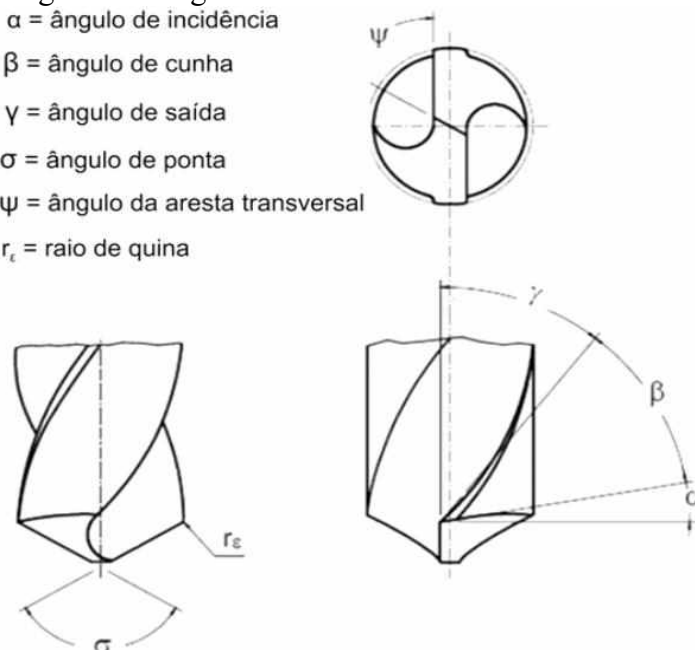
β = ângulo de cunha

γ = ângulo de saída

σ = ângulo de ponta

ψ = ângulo da aresta transversal

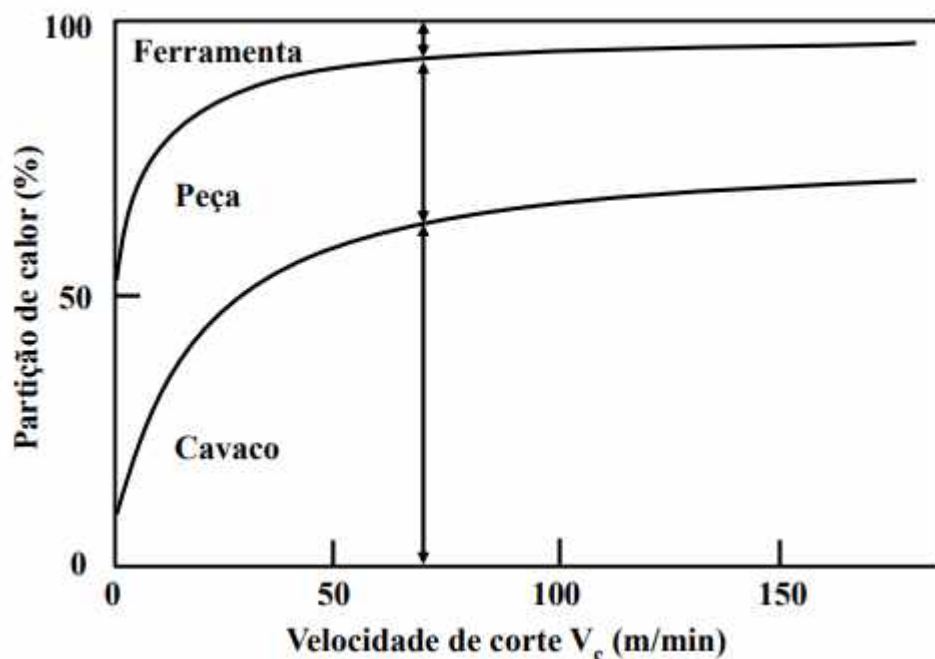
r_ϵ = raio de quina



Fonte: Chen e Liao (2003) (adaptado).

No processo de furação, como em todo processo de usinagem, há geração de calor e, conseqüentemente, um aumento das temperaturas associadas ao corte. Isso é prejudicial para a ferramenta de corte devido a redução de sua resistência mecânica com esse aumento. Segundo Ferraresi (2012), cerca de 90 % da energia consumida nos processos de usinagem é transformada em calor e distribuída para os quatro sistemas envolvidos: peça, cavacos, ferramenta de corte e meio ambiente (ou fluido de corte). Nesse sentido, na Figura 2 é apresentada a partição típica de Souza (2011), do calor gerado na usinagem de aço carbono sem fluido de corte, demonstrando que os cavacos DISSIPAM a maior parte do calor gerado. Entretanto, apesar de a ferramenta de corte absorver uma menor parcela do calor gerado, as pequenas seções de corte e a presença de altas taxas de deformação na interface cavaco-ferramenta desenvolvem maiores temperaturas, que podem comprometer a vida da ferramenta (TRET e WRIGHT, 2000).

Figura 2 – Partição típica de calor gerado em usinagem entre cavacos, a ferramenta de corte e a peça em baixo carbono AISI 1113.



Fonte: SHAW (1984) (adaptado).

Segundo Trent e Wright (2000), o calor gerado na zona de cisalhamento primário no processo de furação é, em sua maioria, transmitido ao cavaco, e uma menor parte é dissipado por condução para a peça usinada. Ainda, uma importante fonte de calor para a ferramenta pode ser a interface entre a peça e a superfície de folga em furações utilizando brocas com pequenos ângulos de folga ou quando se trata de uma ferramenta desgastada.

A medição de calor e temperaturas na usinagem é de extrema relevância para o processo, porém as medições experimentais são difíceis de implementar, exigem tempo recursos, etc, dessa maneira, o objetivo deste trabalho é simular a distribuição de temperaturas durante furação do ferro fundido cinzento por meio do *software* comercial *AdvantEdgeTM*. Medições experimentais foram realizadas utilizando o método calorimétrico visando compreender a fenomenologia do processo.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. TEMPERATURA EM USINAGEM

Desde a metade do século XIX, muitos estudos de usinagem vêm envolvendo temperatura, porém foi Taylor quem engajou nesse assunto com seu estudo *On the Art of Cutting Metals*, publicado em 1907. Desde então, o calor gerado no processo de furação vem ganhando muita importância nos estudos, sobretudo atualmente, pois ao entender a transferência de energia térmica de um sistema a outro na usinagem, pode-se melhorar vários parâmetros nessa área, como o tempo de corte, a vida útil da ferramenta e a própria usinabilidade em termos de dureza (TAYLOR, 1907).

O aprofundamento neste assunto tem sido levantado principalmente pelos danos ocasionados pelo aumento de temperatura durante os processos de fabricação. Assim, são sugeridas novas pesquisas e estudos a respeito dessa influência para se ter um parâmetro e controle tanto da vida da ferramenta quanto do efeito desta variável em questão na peça que será fabricada.

Segundo Lo Casto *et al.* (1994), a temperatura é uma das mais importantes variáveis na investigação do comportamento das ferramentas de corte, visto que isso permite o controle de sua vida útil. Ferraresi (2012) afirma que cerca de 87 a 90% da energia mecânica é transformada em calor e distribuído nos quatro sistemas envolvidos. O calor gerado na usinagem é transferido para quatro partes envolvidas, em porcentagens diferentes. A quantidade de calor destinado a cada um desses elementos está diretamente ligada aos parâmetros de corte, e dessa forma, quanto há um aumento da velocidade de corte, avanço ou profundidade, o calor do sistema irá aumentar também.

A quantidade de energia dissipada para a peça, ferramenta e cavaco pode alterar de acordo com algumas propriedades inerentes ao sistema, como por exemplo: o calor específico e a condutividade térmica dos materiais dos corpos e as dimensões das seções por onde esse calor é distribuído. Para melhor exemplificar essa situação, Takeuchi, Sakamoto e Sata (1982)

afirmam que a ferramenta recebe de 10 a 30 % da energia envolvida, enquanto Shaw (1997) disse que 90 % vai para o cavaco, 5 % para a ferramenta e os outros 5 % para a peça.

A Tabela 1 mostra um resumo das partições do calor gerado de acordo com o tipo de processo de usinagem.

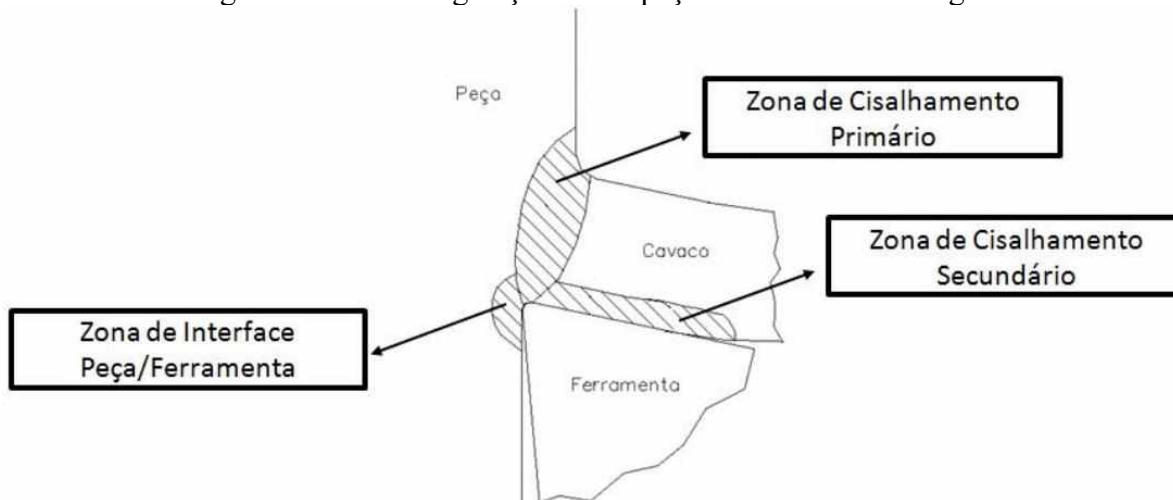
Tabela 1 – Percentagens de calor distribuídos entre os elementos da usinagem e seus respectivos processos.

Elemento	Torneamento	Fresamento	Furação
Ferramenta	2,1 – 18,0 %	5,3 – 10 %	5,0 – 15,0 %
Peça	1,1 – 20,0 %	1,3 – 25,0 %	10,0 – 35,0%
Cavaco	74,6 – 96,3 %	65,0 – 74,6%	55,0 – 75,0 %

Fonte: Adaptado de Fleischer, Pabst e Kelemen (2007), citado por Putz et. al. (2017).

Nos quatro sistemas envolvidos na usinagem (peça, ferramenta, cavaco e fluido), há a dissipação da maior parte da energia envolvida ao longo do processo. A Figura 3 mostra a geração de calor em usinagem.

Figura 3 - Zonas de geração e dissipação de calor em usinagem



Fonte: MACHADO et al. (2009) (adaptado).

O aumento da temperatura é iniciado na zona primária de cisalhamento (região I: zona de cisalhamento primário). Este aquecimento ao longo do plano de corte gera uma redução da resistência ao cisalhamento e a deformação plástica do material da peça, o que tende a diminuir as forças de corte. Já o calor originado na zona secundária (região II: zona de cisalhamento secundário) é produzido pelo atrito e pelo cisalhamento na superfície de saída. O cavaco é posteriormente deformado e pode ocorrer a aderência na superfície de saída da ferramenta. Por fim, a zona terciária (região III: zona de cisalhamento terciário) encontra-se na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta. A geração de calor nesta região

ocorre principalmente com a utilização de ângulos de folga menores que 1° e pode ocorrer mesmo no caso de ferramentas sem desgaste de flanco, uma vez que é necessária uma deformação mínima para a formação de cavacos (SILVA e WALLBANK 1999; SUTTER e RANC, 2007).

O balanço de energia de todas as quantidades de calor existentes no sistema e todos os seus parâmetros estão listados a seguir. O balanço energético apresentado por Ferraresi, 2012:

$$Q_z + Q_{a1} + Q_{a2} = Q_c + Q_p + Q_f + Q_{ma} \quad (2.1)$$

Onde:

- Q_z = quantidade de calor produzida pela deformação e pelo cisalhamento do cavaco (zona de cisalhamento primário) (J)
- Q_{a1} = quantidade de calor produzida pelo atrito do cavaco com a ferramenta de corte (zona de cisalhamento secundário) (J)
- Q_{a2} = quantidade de calor produzida pelo atrito da peça com a ferramenta de corte (zona de cisalhamento terciário) (J)
- Q_c = quantidade de calor dissipada pelo cavaco (J)
- Q_p = quantidade de calor dissipada pela peça (J)
- Q_f = quantidade de calor dissipada pela ferramenta de corte (J)
- Q_{ma} = quantidade de calor dissipada pelo meio ambiente (J)

Em seguida será abordada, separadamente, as diversas componentes da região do calor durante o processo de fabricação.

2.1.1. Calor Gerado na Zona de Cisalhamento Primário

A maior parte do calor gerado na zona de cisalhamento primário é dissipada pelo cavaco, mas uma pequena fração, chamada de Q_c , é conduzida na peça e aumenta sua temperatura o que pode gerar problemas de precisão dimensional (MACHADO e DA SILVA, 2004).

A velocidade de corte influencia muito na temperatura de corte. A temperatura do cavaco pode chegar a 1000 °C durante a usinagem de aços endurecidos e de algumas ligas de

níquel sob certas condições de corte. A faixa normal de temperatura do cavaco para a usinagem de aços é de 500 °C a 650 °C (MACHADO *et al.*, 2011).

Para Nakayama (1956), nos processos de usinagem, o aumento de temperatura $\Delta\theta_c$ depende da rotação e do número de revoluções da ferramenta. Para este aumento de temperatura, existe uma equação que permite seu cálculo. Este método é descrito pela Equação 2.2:

$$\Delta\theta_c = \frac{(1-Q)(F_c - F_f \tan(\phi))}{J \cdot \rho \cdot c \cdot h \cdot b} = \frac{(1-Q)(F_z \cdot V_z)}{J \cdot \rho \cdot c \cdot h \cdot b \cdot V_c} \quad (2.2)$$

Onde:

F_c = Força de corte (N)

F_f = Força de avanço (N)

ϕ = Ângulo de cisalhamento (graus)

J = Equivalente mecânico de calor (4,184 J/cal)

ρ = Densidade ou massa específica (g/cm³ ou kg/m³)

c = Calor específico (cal/g.°C)

h = Espessura de corte (mm)

b = Largura de corte (mm)

F_z = Força de cisalhamento (N)

V_z = Velocidade de cisalhamento (m/min)

V_c = Velocidade de corte (m/min)

A velocidade de corte terá pouca influência na temperatura do cavaco devido ao diminuto tempo (poucos milissegundos) que uma pequena porção do cavaco passa sobre a superfície de saída da ferramenta para conduzir calor (MACHADO *et al.*, 2011). A condução de calor para a peça ou para a ferramenta, como já mencionado, será muito pequena devido ao pouco tempo de contato do cavaco entre elas. Outro fator que colabora para isso é a zona de fluxo na zona de cisalhamento secundário, sendo que o calor fluirá da zona de fluxo para o cavaco e não o contrário.

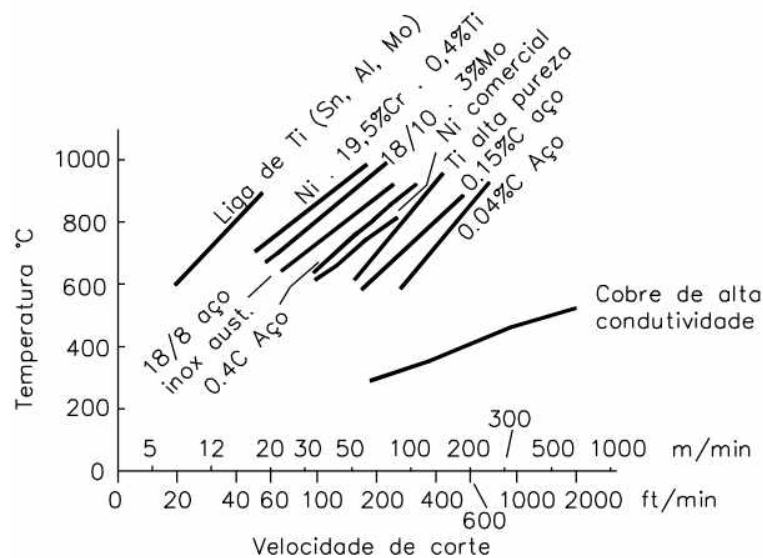
2.1.2. Calor Gerado na Zona de Cisalhamento Secundário

Essa região é a principal fonte de calor para a peça e a ferramenta. Uma vez que a região da ferramenta que recebe esse calor (região de contato ferramenta peça e cavaco-ferramenta) é reduzida e não muda com o tempo, como ocorre com a peça, desenvolvem-se ali temperaturas que podem chegar até 1200 °C, que muito contribuem para o desgaste da ferramenta (MACHADO e DA SILVA, 2004; DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

O fluxo de calor não flui do cavaco para a ferramenta, sendo assim, a geração de calor neste local é totalmente governada pelas condições da interface e de corte. A APC (Aresta Postiça de Corte), formada durante a usinagem, afasta a ferramenta da zona de fluxo, que é a principal fonte de calor. Assim, conforme a velocidade de corte é aumentada, a APC diminui e podemos afirmar que a temperatura da interface cavaco-ferramenta aumenta de acordo com a velocidade de corte (MACHADO; DA SILVA, 2004).

Com essa relação direta, pode-se dizer que também existe um limite para a velocidade de corte para cada par ferramenta peça. Trent (2000) afirma que as temperaturas de corte são tão altas e desgastam tanto a ferramenta que chegam a ser irrealista tentar calcular o aumento de temperatura naquela região com o presente estado do conhecimento dos fenômenos envolvidos.

Figura 4 - Temperaturas máximas na interface cavaco-ferramenta em função da velocidade de corte



Fonte: TRENT et al.(2000) (adaptado)

A Figura 4 mostra a temperatura máxima desenvolvida na interface cavaco-ferramenta-peça na usinagem de vários materiais, em relação à velocidade de corte.

Conforme o gráfico, observa-se que existe uma relação de dependência entre a velocidade de corte e a temperatura máxima na interface ferramenta-peça. Essa relação existe para cada uma das ligas metálicas apresentadas nessa Figura e a explicação para isso pode depender de alguns fatores. Segundo Trent (2000), o ponto de fusão da liga, a resistência do material e a presença de fase de baixa resistência ao cisalhamento, podem influenciar para esse resultado apresentado no gráfico.

2.1.3. Calor Gerado na Zona de Cisalhamento Terciário

A temperatura na zona terciária também aumenta com a velocidade de corte. Se a usinagem ocorrer com uma ferramenta que possui ângulo de folga pequeno (menor que 2°) ou se o desgaste de flanco atingir proporções consideráveis, a interface peça/superfície de folga da ferramenta se torna a terceira fonte importante de calor. Nesse caso, a análise é similar à da zona de cisalhamento secundário, com a presença de zona de fluxo, o que provoca altas temperaturas na superfície de folga, culminando na falha da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2011).

2.2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NA USINAGEM

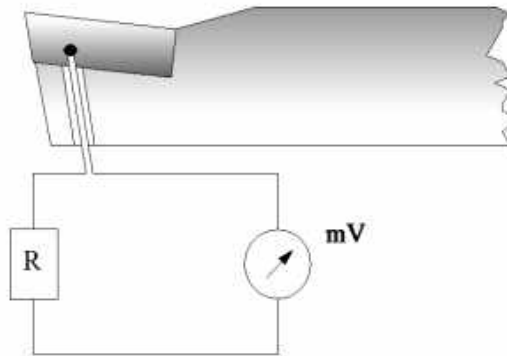
A medição de temperatura nos processos de usinagem é um importante parâmetro para se analisar e controlar a qualidade superficial da peça, da vida da ferramenta e outros fatores para melhorar a usinabilidade. Existem várias técnicas de medição e cada uma delas tem suas principais vantagens e desvantagens. As dificuldades de estudo da temperatura em processos de usinagem se devem ao fato de que o processo depende de vários parâmetros envolvidos e porque este processo apresenta transferência de calor numa região muito restrita. A técnica adequada para um determinado problema depende da situação em consideração, tais como: a facilidade de acesso, o tamanho da área de medição, a dinâmica do corte (contínuo ou interrompido), a precisão necessária, o custo de instrumentação etc. (KOUMANDURI *et HOU*, 2001).

Na sequência, serão abordadas algumas das metodologias mais conhecidas para se medir a temperatura na usinagem, assim como alguns exemplos de pesquisas.

2.2.1. Método de medição por termopares inseridos

O método de inserção do termopar dentro da ferramenta é realizado quando se coloca um termopar de tamanho muito pequeno em diversas posições da ferramenta de corte. Os microfuros feitos para se inserir esses termopares podem ser realizados pelo processo de eletroerosão. Este método permite registrar a variação da temperatura com o tempo em diferentes pontos da ferramenta, inclusive em pontos próximos à cunha de corte, local de extremo interesse para estudo (FERRARESI, 2012).

Figura 5 - Medição de temperaturas por termopares inseridos na ferramenta.

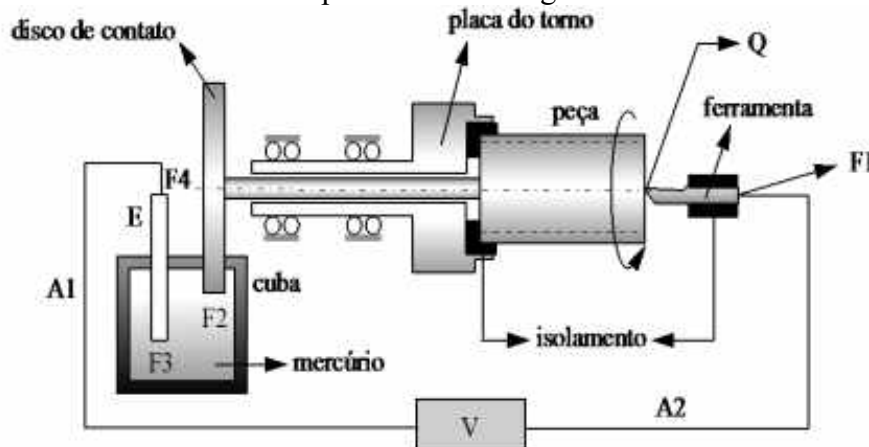


Fonte: MACHADO et DA SILVA (2004, p.105) (adaptado)

2.2.2. Método do termopar ferramenta-peça

A Figura 9 mostra o esquema do termopar ferramenta-peça, em que o funcionamento desta medição é feito por sinal elétrico: quando dois materiais diferentes são colocados em contato, uma corrente elétrica percorre por eles, desde que estes materiais estejam a temperaturas diferentes. Este fenômeno físico é denominado “efeito Seebeck” e o valor da força eletromotriz gerada depende somente da natureza dos condutores e da diferença de temperatura entre os dois contatos (BORCHARDT *et* GOMES, 1979).

Figura 6 - Esquema geral do método do termopar ferramenta-peça utilizado na medição da temperatura de usinagem.



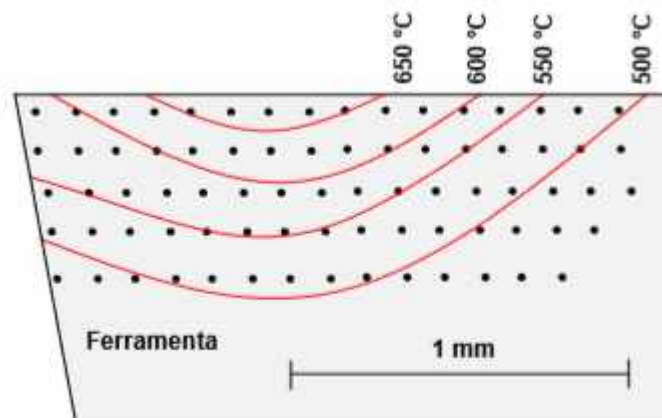
Fonte: MACHADO et DA SILVA (2004, p. 104)

Na Fig. 9, o contato entre a ferramenta e a peça é o contato quente (Q). A junta de referência, caracterizada pelos pontos com a letra F, chamada de junta fria, é mantida a 0 °C. É colocado mercúrio na cuba para que o circuito seja fechado, havendo contato elétrico do disco com o elemento E. Os fios A1 e A2 fazem contato com o voltímetro, que indica a força eletromotriz gerada, fornecendo sinal elétrico, e através de calibrações do sistema, pode-se gerar uma curva que fornece valores de temperatura (MACHADO et al., 2011). Esta calibração é realizada para cada par de materiais ferramenta-peça e também depende da faixa de temperatura em que serão submetidos na usinagem. Um sistema de aquisição de dados é utilizado para a medição da força eletromotriz e da temperatura gerada na junta quente, para posteriormente obter a curva de calibração. Existem trabalhos/pesquisas que são relacionadas apenas para essa calibração e confecção de tais curvas (MACHADO et al., 2011).

2.2.3. Medição por propriedades metalográficas

A medição por propriedades metalográficas é baseada no decréscimo da dureza de ferramentas de corte em função do aumento de temperatura. As ferramentas de aço-carbono endurecidas perdem dureza a partir de 250 °C, reduzindo seu valor rapidamente após um aquecimento além de 600 °C. As ferramentas de aço rápido não sofrem amolecimento apreciável até 600 °C, mas entre 600 °C e 850 °C sua dureza cai rapidamente. Calibrando-se a dureza em função da temperatura e do tempo de aquecimento, uma família de curvas pode ser obtida e a temperatura de usinagem pode ser avaliada (TRENT et WRIGHT, 2000).

Figura 7 - Medição de temperaturas por técnica metalográfica na usinagem de aço de médio carbono com $V_c = 27$ m/min e $f = 0,25$ mm/volta. As isotermais são determinadas pela medição de dureza.

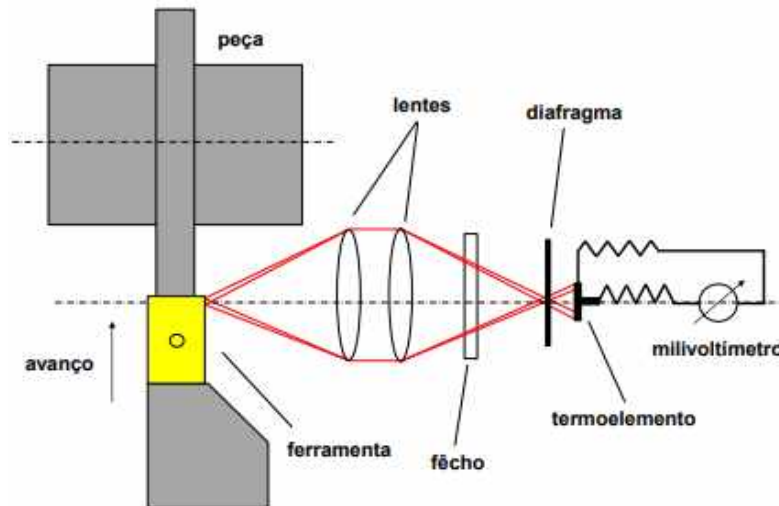


Fonte: TRENT et WRIGHT (2000, p.118) (adaptado).

2.2.4. Método de medição por infravermelho

O método de medição por infravermelho é realizado através de sensores infravermelhos, ou pirômetros, sendo mais utilizada para obtenção da temperatura superficial dos elementos do processo de usinagem. Os sensores consistem em uma lente para focalizar a energia (IR) infravermelha sobre um detector que converta a energia em sinal elétrico para que possa ser indicado em sinais de temperatura. A principal vantagem deste método é que ele não requer que se tenha contato com a superfície na qual se realizará a medição, embora a sua desvantagem resida no fato de que só é possível a medição em superfícies expostas durante a operação. A figura 6 exemplifica esta medição, com o aparelho.

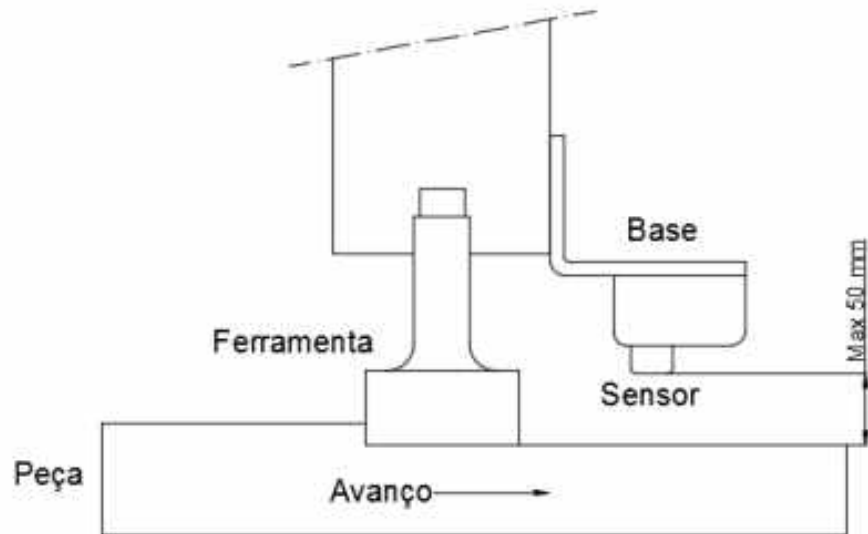
Figura 8 - Medição de temperaturas por radiação de calor por sensores infravermelhos



Fonte: FERRARESI (2012) (adaptado)

Um bom exemplo de trabalho que utilizou essa técnica para realizar medidas de temperatura é o de Davoodi e Hosseinzadeh (2012), em que um sensor infravermelho de alta velocidade juntamente com um *software* foi utilizado para medir a temperatura na superfície da peça durante uma usinagem do tipo HSM (*High Speed Machining*) de ligas de bronze. A figura 7 mostra o sensor instalado acima da peça a ser usinada, logo atrás da ferramenta de corte, para obter a temperatura da superfície usinada imediatamente após a ferramenta ter realizado o corte.

Figura 9 - Método de medição através de sensor infravermelho

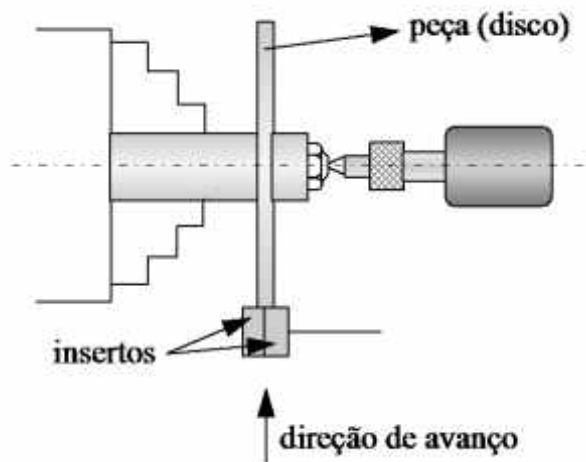


Fonte: Davoodi et Hosseinzadeh (2012, p. 2137) (adaptado)

2.2.5. Método de medição por filme PVD

Kato, Yamaguchi, Watanabe e Hiraiwa foram os pioneiros a utilizarem e publicarem os resultados do uso de medição por filme PVD, que consiste em depositar vários materiais de pontos de fusão diferentes numa superfície perpendicular à superfície de saída do metal. Após a deposição do filme de um determinado material, as partes da ferramenta são unidas e postas para usinar um disco em um processo de corte ortogonal (MACHADO *et al.*, 2011). Dessa forma, temperatura de corte é estimada através do filme fundido do material depositado pelo método PVD que caracteriza temperaturas de usinagem superiores ao seu ponto de fusão. A figura 8 mostra um esquema de como é montado.

Figura 10 - Montagem experimental para medição da distribuição de temperatura pelo método PVD.



Fonte: MACHADO et DA SILVA (2004).

2.3. MÉTODO CALORIMÉTRICO PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

A termodinâmica é um ramo na física em que se estuda as transformações de energia que envolvem trabalho e calor, em que o calor é a representação da energia em trânsito e dinâmica que está relacionada ao movimento (ATKINS *et* JONES, 2006). Entendendo como expressão, o calor é utilizado para indicar a quantidade de troca de energia de um sistema e sua vizinhança devido a uma diferença de temperatura, sendo que essa troca ocorre do ponto de maior temperatura para o menor.

Um calorímetro ideal é um sistema fechado que não permite qualquer troca de energia térmica (calor) com o ambiente externo, fazendo com que todas as trocas ocorram em seu interior. Assim, considera-se os elementos no interior do calorímetro como um sistema fechado. Todavia, o calorímetro real não tem uma eficiência igual ao ideal e não pode ser considerado totalmente isolado, havendo alguma transferência térmica com o meio externo (SHAW, 1984).

O primeiro calorímetro foi desenvolvido por Antoine Lavoisier (1743-1794) e Pierre Laplace (1749-1827). A dupla construiu um aparelho em que era colocado uma esfera de gelo em um componente fechado e, no interior desta mesma esfera, era colocado um objeto quente. A quantidade de calor era medida através da água que saía do calorímetro, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Visão em corte de um calorímetro de Lavoisier e Laplace.



Fonte: DANOSO (s.d., p.10 - 11).

Após essa invenção de 1789, vários outros calorímetros foram inventados, melhorando o modo de medição, a troca de temperatura entre os corpos internos e o isolamento para evitar a perda de temperatura para o meio externo. Um dos mais utilizados é o calorímetro de água,

onde os corpos ficam submersos em água e um termopar mede a temperatura do líquido até o equilíbrio, podendo haver ou não agitação da água com uma fonte externa.

2.3.1. Equacionamento calorimétrico

No método calorimétrico, os corpos trocam energia em forma de calor dentro do calorímetro, sendo que o mais energético cede para o menos. Após certo tempo, a temperatura atinge um valor constante, ou seja, atinge-se um equilíbrio térmico onde os corpos estão com a mesma energia térmica. Quando o equilíbrio é alcançado, pelo princípio da conservação de energia, a quantidade de calor que um meio cede é igual a quantidade de calor que o outro meio recebe. A troca de temperatura é relacionada a quantidade de calor recebida e perdida.

$$Q_{perda} = Q_{ganho} \quad (2.3)$$

Essa quantidade de calor pode ser calculada através da equação fundamental da calorimetria (Equação 2.4):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Onde:

m = massa de água em que os objetos estarão submersos (kg)

c = calor específico (cal/g. °C)

ΔT = Variação da temperatura da água (°C)

O calor específico é uma característica de cada material. Ele é caracterizado como sendo a quantidade de calor necessária para que cada grama de uma substância sofra uma variação de temperatura correspondente a 1 °C.

2.3.2. Calorímetro na usinagem

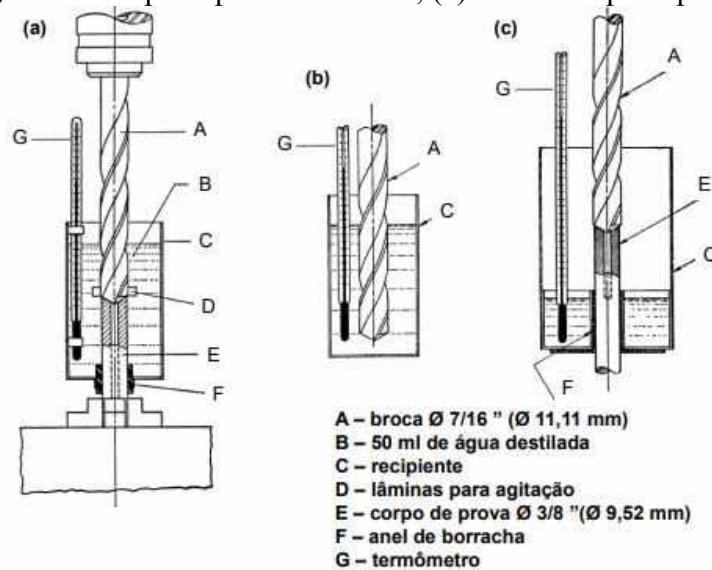
Devido à praticidade e eficiência de um calorímetro em auxiliar na obtenção da temperatura, muitos estudos são realizados na área de usinagem utilizando-o. Komanduri e Hou (2001), afirmaram que não só o calor pode ser obtido na usinagem, mas também a potência, as forças, o trabalho e a temperatura média dos elementos envolvidos etc.

Segundo Ferraresi (2012), as primeiras experiências registradas em usinagem, realçando seu aspecto térmico ocorreram no século XVIII. Elas utilizando o método do calorímetro, medindo a temperatura da água que envolve uma peça em sua usinagem, bem

como a ferramenta utilizada e o cavaco. Os resultados revelaram que, de fato, praticamente toda a energia mecânica do processo é convertida em energia térmica.

A experiência citada por Ferraresi (2012) também foi investigada por Schmidt e Roubik (1945). Os autores estavam com a intenção de investigar a partição da temperatura na ferramenta, peça e cavaco durante a furação, utilizando um calorímetro de água. Foram utilizados três equipamentos diferentes para que esses dados pudessem ser coletados. A Figura 12 mostra a configuração do experimento.

Figura 12 - Esquemas de calorímetros de água para estimativa de: (a) calor total gerado na furação; (b) calor dissipado pela ferramenta; (c) calor dissipado pelos cavacos.



Fonte: SCHMIDT et ROUBIK (1945, apud KOMANDURI et HOU, 2001) (adaptado).

Os corpos de prova eram barras de $3/8''$ (9,52 mm) e a profundidade do furo foi de $7/16''$ (11,11 mm). Todo o calor medido foi da alteração da temperatura da água, através da broca, peça e cavaco submersos em água. Para medir a dissipação na peça e na ferramenta, o furo era feito com a peça dentro da água e após terminar o corte, retirava-se a broca, rapidamente, colocando em outro calorímetro também com água e medindo a alteração da temperatura, tanto do calorímetro que estava a broca, quanto do que estava a peça.

O calor dissipado pelos cavacos foi obtido observando o aumento de temperatura do calorímetro de água na qual foram permitidas apenas cavacos interagindo com a água (Fig. 12c). Nas três configurações, a temperatura inicial e a temperatura final da água são registradas por termômetro.

Os resultados mostraram uma distribuição de 70% a 80 % de energia para o cavaco, quase 10 % para a peça e o restante para a ferramenta. Vale ressaltar que esses dados contêm alguns erros pois nem toda energia vai para os objetos e se tem perdas.

Para o torneamento, Quan, He e Dou (2008), realizaram testes no aço carbono AISI 1045 com variadas velocidades de corte em um calorímetro de recipiente adiabático de aço revestido com espuma adiabática (baixa condutividade térmica). Enquanto Schmidt e Roubik (1975) fizeram uso de um termômetro, Quan, He e Dou preferiram utilizar um termopar para saber a variação da temperatura da água.

O experimento também contou com três termopares diferentes para realizar as medições. Antes da usinagem, as temperaturas iniciais da água, da peça, da ferramenta de corte e do ar foram registradas. Após a usinagem, a peça é levada para outro calorímetro afim de medir sua temperatura. Dessa forma, todas as quantidades de calor (Q) podem ser calculadas, tomando suas devidas porcentagens (R). A Tabela 2 mostra os resultados para diferentes velocidades de corte.

Tabela 2 - Resultados experimentais do torneamento do aço carbono AISI 1045.

Parâmetro	400 m/min	500 m/min	600 m/min	700 m/min	800 m/min
q _c (W)	504,8	890,2	1169,2	1908,0	1987,2
q _p (W)	487,0	568,4	632,5	808,0	827,0
q _f (W)	39,6	39,5	33,9	46,1	65,5
q _{ma} (W)	1,9	2,1	2,6	3,3	5,4
q (W)	1024,3	1500,2	1938,2	2765,4	2885,1
P _c (W)	1633,0	2033,0	2480,0	2823,0	2988,0
R _c (W)	49,4	59,4	63,7	69,1	69,0
R _p (W)	46,8	37,9	34,5	29,3	28,7
R _f (W)	3,8	2,7	1,8	1,7	2,3

Fonte: QUAN et al (2008) (adaptado).

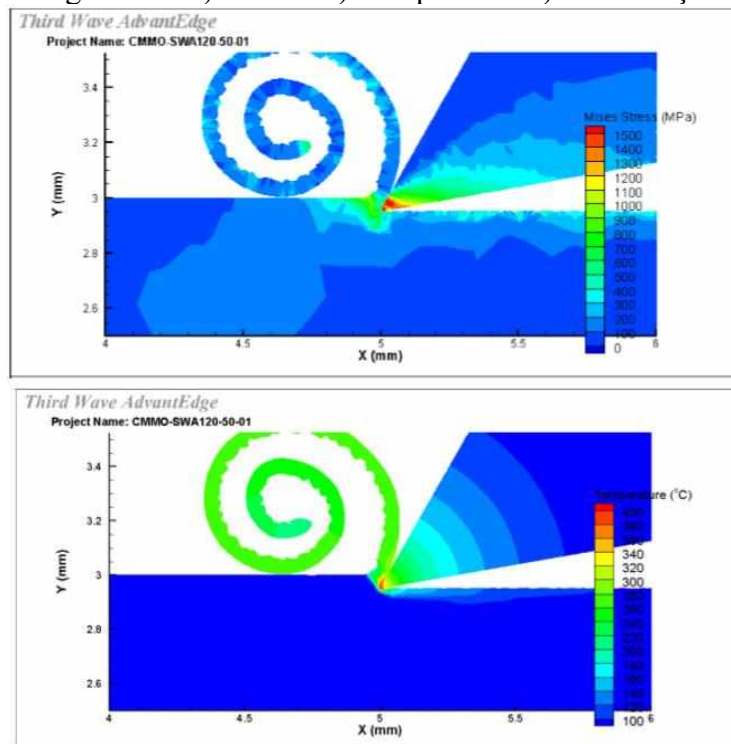
Com base nesses resultados, observa-se que a parcela da ferramenta e peça é maior a menores velocidades de corte, por mais que a temperatura aumente. Por outro lado, o cavaco aumenta tanto a quantidade de calor, quando a porcentagem, indicando que chegará uma hora que as temperaturas da peça e da ferramenta de corte não poderão aumentar continuamente à medida que a velocidade de corte aumenta.

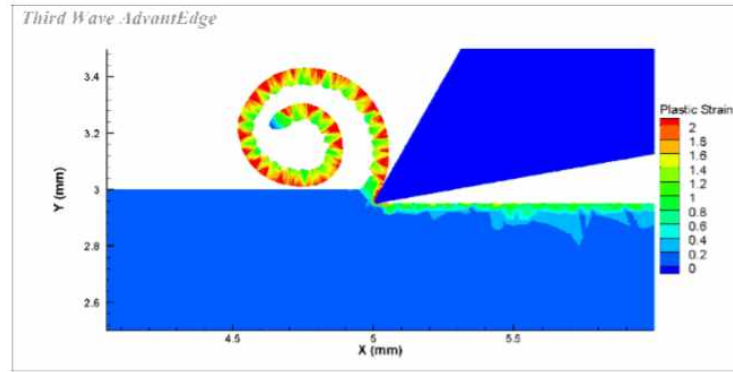
Outro estudo relevante sobre o tema foi o de Silva (2015), o qual realizou uma pesquisa na mesma linha da de Schmidt e Roubik (1945), com a furação do ferro fundido cinzento dentro de um calorímetro de água projetado por Da Silva – tal experimento será abordado na Metodologia e Análise de Resultados deste trabalho.

2.4.SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PROCESSOS DE USINAGEM

Matsumuraa e Shoichi (2013) envolveram a furação de uma liga de titânio em uma análise de elementos finitos para realizar uma avaliação desse processo de corte. Com a argumentação de economizar tempo, foi utilizada uma simulação híbrida que combina testes físicos e modelagem de computador, oferecendo uma forma mais eficiente e acessível para examinar os resultados. O método dos elementos finitos foi utilizado para avaliação do corte ortogonal. A fim de economizar tempo, foi utilizado uma análise 2D no *software AdvantEdgeTM*, pois o uso do programa em 3D pode levar mais horas de serviço. Na Figura 13, é demonstrado o uso do *software* para realizar medições de temperatura, tensão e deformação. Através destas medidas, com a avaliação da deformação residual em X e Y e com os experimentos físicos, pode-se ter um adequado estudo da condição superficial da peça de trabalho.

Figura 13 - a) Tensão b) Temperatura c) Deformação





Fonte: Matsumura e Shoichi (2013) (adaptado).

Han e Wu (2014), em seu trabalho, apresentaram um modelo termomecânico acoplado em 3D desenvolvido no *software AdvantEdgeTM* da *Third Wave Systems* para estudar o processo de furação. As forças de furação e temperatura foram investigadas nas sondagens do aço AISI 1045 e da liga de titânio Ti6Al4V utilizando o método dos elementos finitos. As malhas do corpo de prova e da broca são mostradas na Figura 14. A peça de trabalho foi modelada como sendo elástico-plástica, assim, conforme o cavaco se forma, a malha da região de corte é automaticamente redefinida.

Figura 14 - a) Malha da broca b) Malha da peça

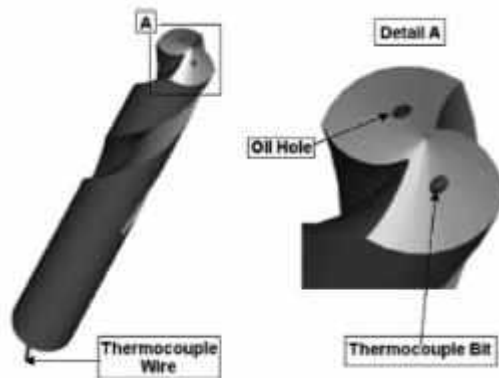


Fonte: Han et Wu (2014) (adaptado).

Os resultados desse trabalho indicaram que os dados obtidos na simulação foram condizentes com os resultados experimentais; o torque de perfuração da liga Ti6Al4V foi menor do que o da perfuração do aço 1045, mas a temperatura de perfuração foi maior no aço. Assim, a simulação de elementos finitos também é uma ferramenta importante para estudar o processo de perfuração.

Ozcelik e Bagci (2005) estudaram a influência da velocidade de corte na usinagem e investigaram a influência desse parâmetro na temperatura gerada. Uma nova abordagem experimental foi desenvolvida para medir a temperatura no processo de furação. As temperaturas da broca foram medidas pela inserção termopares padrão através do orifício de refrigeração das brocas de metal duro com revestimento de TiAlN, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Broca utilizada para testes experimentais



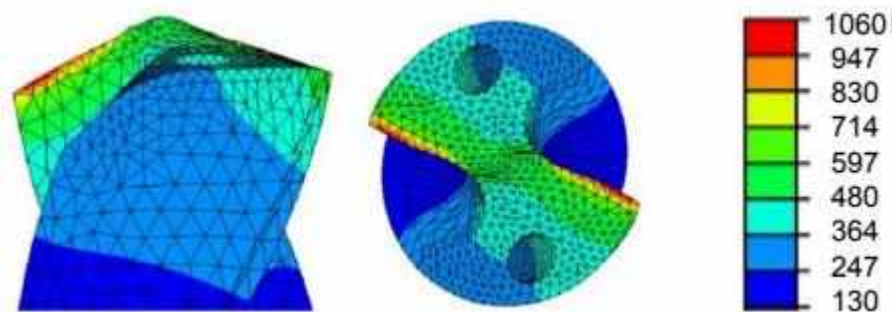
Fonte: Ozcelik et Bagci (2015).

O estudo experimental foi realizado utilizando dois materiais de peça diferentes, o aço AISI 1040 e uma liga de alumínio Al 7075-T651. A temperatura da broca foi prevista usando cálculos numéricos com o auxílio do software *Third Wave AdvantEdgeTM*, que utiliza o modelo Lagrangiano e método explícito de integração no tempo para a análise de elementos finitos. Os resultados obtidos no estudo experimental foram comparados aos resultados de simulação e demonstraram uma boa concordância entre os resultados para temperatura.

Exemplificando outros *softwares* que também são utilizados para a simulação nos vários processos de usinagem, temos o programa Abaqus e o COMSOL.

Com o programa Abaqus, que utiliza o método dos elementos finitos, Li e Shih investigaram a distribuição de temperaturas na ferramenta de corte durante a furação a seco de titânio comercialmente puro. Os resultados de sua pesquisa numérica foram verificados por meio de estudos experimentais através do método dos termopares inseridos nos canais de lubrificação da broca. Os autores observaram que as maiores temperaturas estão concentradas ao longo da aresta de corte da ferramenta e a temperatura máxima localizada próximo à ponta de corte, onde a velocidade de corte (periférica) é maior. A Figura 16 mostra os resultados obtidos.

Figura 16 - Distribuição de temperaturas na broca (em °C) após 12,7 mm de usinagem, velocidade de corte de 73,2 m/min, broca de metal duro.



Fonte: Li e Shih (2017).

Para o *software* CONSOL tem-se um ótimo exemplo de trabalho de Lazoglu et al (2017) onde ele também utilizou métodos numéricos e analíticos. Para seus métodos analíticos, foram utilizados termopares do tipo-K inseridos nas ferramentas de metal duro. Os resultados dos dois experimentos não foram realmente iguais, apresentando erros de 10% comparados uns ao outro.

2.5. SOFTWARE ADVANTEDGE

O *software* utilizado neste trabalho utiliza como método numérico o Método dos Elementos Finitos (MEF) para realizar as simulações necessárias requeridas pelo operador do sistema.

O MEF tem fornecido informações valiosas para o entendimento dos processos de corte, além de modelos preditivos que podem fornecer resultados confiáveis em muitos parâmetros de usinagem. Apesar de haver outras técnicas numéricas disponíveis, como o método das diferenças finitas (MDF) e o método dos volumes finitos (MVF), em termos de modelagem, o MEF provou ser superior e muito mais versátil que aqueles. Isso se comprova pelo grande número de publicações disponíveis na literatura que associam a análise de elementos finitos aos processos de usinagem (MARKOPOULOS, 2013).

Na usinagem dos materiais, os modelos numéricos utilizando FEM foram desenvolvidos para simular a formação de cavaco com o intuito de analisar e quantificar os fenômenos físicos durante o processo de usinagem (CHILDS, 2001). Muitos destes métodos foram empregados para calcular a temperatura ou o gradiente de temperatura na interface peça ferramenta.

No MEF o material é apresentado com uma mecânica contínua, onde parâmetros como química, rede cristalina etc., são negligenciados para a continuidade do material. Os nós e seus números são determinados arbitrariamente, os parâmetros da malha são configurados de tal forma que eles só determinam a sensibilidade durante a simulação usando uma malha mais fina ao usar pequenas alimentações ou profundidades de corte para capturar as finas características (Komanduri & Rav, 2001).

Ao analisar o MEF, eles podem ser divididos em três grupos: Lagrangeano (Shih, 1995; Strenkowski e Carroll, 1985), Eulerian (Strenkowski e Carroll, 1986) e métodos Lagrangeanos-Eulerianos arbitrários (Movahhedy, Gadala, & Altintas, 2000; Olovsson,

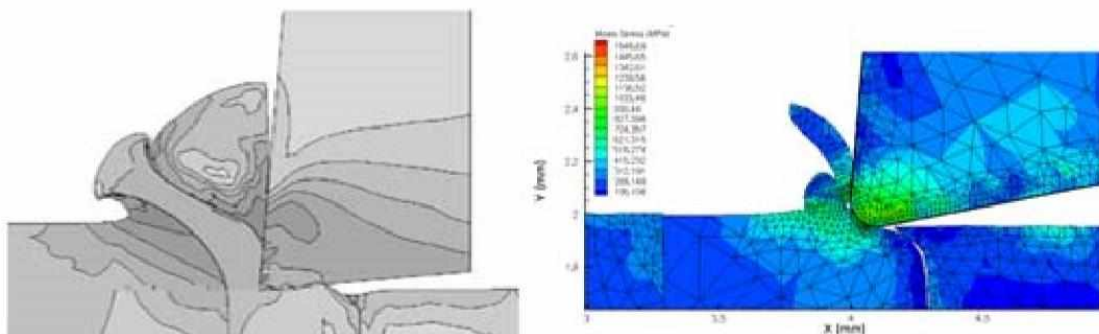
Nilsson e Simonsson, 1999; Rakotomalala, Joyot e Touratier, 1993). O MEF Lagrangiano é baseado na noção de que a malha é presa à peça e se move com o material. Devido ao fato de que os elementos mudam de forma, muitas vezes é necessário usar a correção para restaurar elementos distorcidos e o processamento adaptativo é frequentemente usado. Eulerian MEF envolve um material de peça que flui através da malha pré-definida fixada no espaço. Não há distorção de elemento neste método, entretanto, a formação de cavacos não pode ser modelada e somente problemas de estado estacionário podem ser analisados. Devido às vantagens e desvantagens de ambos os métodos, uma combinação das duas abordagens chamada Lagrangiana-Euleriana é mais freqüentemente usada (Trent & Wright, 2000).

O *AdvantEdgeTM* é um programa computacional especializado na simulação de processos de usinagem, apto para modelagem de processos de usinagem, tanto em modelagem bidimensional quanto tridimensional. O código do *AdvantEdgeTM* utiliza a abordagem lagrangiana explícita associada ao remalhamento adaptativo para contornar os problemas de convergência e distorção da malha. O método consiste em introduzir uma variável nova (variável de Lagrange) que permite encontrar o máximo e o mínimo do estudo realizado.

A fim de avaliar a veracidade e validação do método, vários estudos experimentais e com outros *softwares* foram realizados para serem comparados com os resultados do programa deste trabalho.

A comparação dos resultados obtidos em um estudo publicado (Simoneau, et al., 2006) e os resultados obtidos pela configuração do *Third Wave AdvantEdgeTM* foram analisados (Jackson & Novakov, 2010) e comparados com a simulação no *software* ABAQUS como mostrado na Figura 17. A simulação baseada no material compósito usando o *software AdvantEdgeTM* da *Third Wave* (Simoneau, et al., 2006) está de acordo com os resultados experimentais e os resultados obtidos com o outro utilitário.

Figura 17 - Comparação de resultados entre os *softwares* ABAQUS e *AdvantEdgeTM*

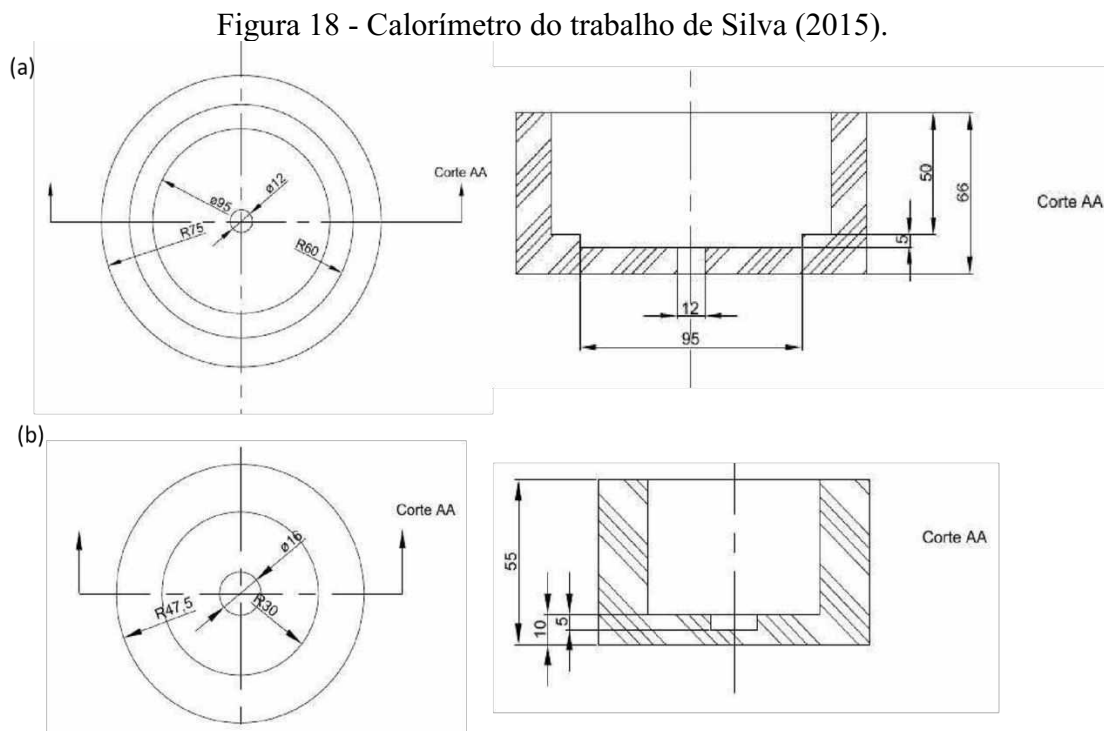


Fonte: Jackson e Novakov (2010)

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS UTILIZADOS

Os experimentos foram realizados utilizando o calorímetro projetado por Silva, M. D. em 2015. O calorímetro é composto por uma cuba interna de PVC e uma cuba externa de *technyl* com as medidas demonstradas conforme a Fig. 17.



Fonte: Silva, M. D. (2015).

Outros equipamentos utilizados no trabalho incluem:

- Centro de usinagem CNC, modelo *Discovery 760*, fabricante ROMI, potência de 11 kW, rotação máxima de 10.000 rpm;
- Dinamômetro rotativo piezoelétrico *Kistler* modelo 9265B (para fazer a apuração das forças e o momento de torção);
- *AGILENT* 34970A (para fazer a aquisição de dados da temperatura);
- Termopares do tipo “T”;
- Água deionizada;

- Broca helicoidal maciça e com duas arestas cortantes, de aço rápido/cobalto, tipo M42 (8% Co), revestida com de TiNAl;
- Amostras de ferro fundido cinzento (dimensões: 16 mm de diâmetro X 30 mm de altura) com roscas nas bases para fixação no calorímetro por parafusos M6 com 10 mm de profundidade;

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Para as amostras de ferro fundido cinzento foram realizados ensaios de tração e dureza, a fim de obter suas propriedades.

Para medição de dureza foi utilizado o método *Rockwell-B* normal por meio de durômetro universal *Wolpert*®. O penetrador utilizado foi uma esfera de aço temperado de 1/16” de diâmetro (1,588 mm). A carga utilizada nos ensaios foi de 100 kgf e o tempo de indentação foi de 30 s, segundo Norma DIN 50103. A dureza do material foi determinada na superfície transversal da barra fundida. O procedimento de lixamento foi realizado com lixas d’água de granulometria 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh, 600 mesh e 1000 mesh. A dureza *Rockwell* média obtida a partir de 15 medições foi de $(67,07 \pm 2,77)$ HRB, com intervalo de confiança de 99,70 %.

Para medição das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de tração em máquina universal de ensaios *Shimadzu*® modelo *Autograph AG-X* com capacidade máxima de 300 kN. A carga utilizada nos ensaios foi 300 kN. Foram tracionados dois corpos de prova de ferro fundido cinzento, extraídos do núcleo das barras, cujas dimensões estão listadas nas normas ASTM E8/E8M, onde foi escolhido o primeiro modelo. Os resultados de força, tensão e deformação foram adquiridos por meio do programa computacional *Trapezium X*. Os resultados das propriedades mecânicas medidas estão apresentadas na Tab. 3. O ferro fundido é caracterizado por ser um material frágil, sendo assim, terá uma fratura frágil, como mostrado na Fig. 18.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de tração.

Propriedades Mecânicas	Média	Desvio Padrão
Tensão Máxima (MPa)	238,53	0,72
Deformação na Tensão Máxima (%)	6,49	0,26

Figura 19 - Fratura frágil de amostra de ferro fundido cinzento, ensaio de tração.



Para os testes computacionais, foi utilizado um computador disponibilizado pelo Laboratório de Pesquisa e Ensino em Usinagem, onde foi instalado dois *softwares* em que foram realizados os experimentos, sendo eles o *AdvantEdgeTM* e o *Tecplot 360 EX 2018 R2*.

O *AdvantEdgeTM* é a principal ferramenta de análise e utiliza o método de elementos finitos para entender o processo de corte de metal. Esse *software* apresenta um conjunto completo para análise, incluindo formações de cavacos, temperaturas, tensões e forças na ferramenta e na peça de trabalho. O *software* possui um processo de validação e modelos de materiais embutidos no programa especificamente para corte de metal.

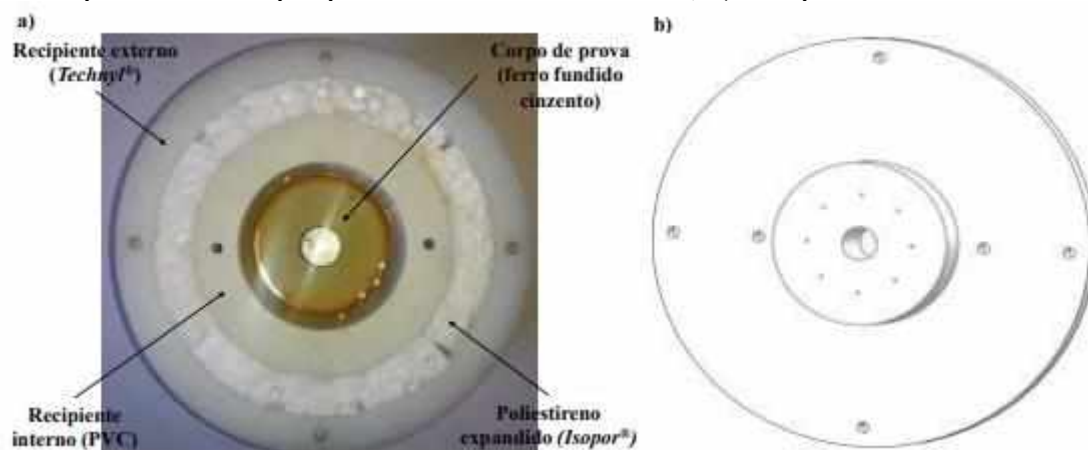
O *software Tecplot* foi utilizado no pós-processamento dos dados obtidos pelas simulações realizadas. Esse *software* permite visualizar e analisar os resultados da maneira que o usuário desejar, sendo possível acessar uma gama muito grande de informações relevantes para os processos de usinagem.

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGIA

Após devida caracterização dos materiais, foi possível realizar os testes experimentais, que se iniciaram com a montagem do calorímetro, semelhante ao mostrado na Figura 19.

Figura 20 - a) Calorímetro de água com recipientes cilíndricos coaxiais encaixados. O corpo de prova é fixado por parafuso Allen M6 x 10 mm; b) Tampa do calorímetro de água.



Com o calorímetro pronto e as amostras de ferro fundido cinzento preparadas, fixaram-se os corpos de prova no calorímetro através de um parafuso M6, que passa por baixo do calorímetro e rosqueia no corpo de prova, fixando-a conforme mostrado na imagem. Por conseguinte, prendeu-se o próprio calorímetro na mesa da máquina Discovery CNC 760.

Os termopares foram colocados nos furos na tampa do calorímetro, de technyl como demonstrado na Fig. 20, garantindo que eles fiquem submersos na água. Alguns dos termopares foram soldados nas amostras para obtenção da sua variação de temperatura. Assim, o calorímetro foi fechado com a tampa devidamente fixada com os parafusos para poder dar início ao processo de furação.

Figura 21 - Foto do equipamento pronto, no momento do começo da usinagem



Os parâmetros para furação foram os seguintes: velocidade de corte (V_c) de 30,0 m/min, rotações (η) a 955 rpm, profundidade do furo (a_p) de 15,0 mm, avanço (f) de 0,1 mm/rotação e tempo de corte de 7,25 s. Após o término da furação, em alguns cortes a broca ficava inerte na profundidade do furo, em outros não, onde a própria broca, a peça e o cavaco ficam submersos pela água, transferindo calor para esta última. Por fim, os termopares conseguiram coletar os dados da temperatura da água e manda-los para o Agilent modelo 34970A, o qual, conectado a um computador, registrava os dados de temperatura.

O torque foi monitorado pelo dinamômetro rotativo piezoelétrico Kistler, modelo 9265B. Tanto os dados do torque quanto os dados de temperatura foram registrados e disponibilizados em gráficos de torque por tempo de corte e variação de temperatura por tempo.

Com os testes experimentais realizados e seus respectivos os dados obtidos, partiu-se para a realização dos testes computacionais: a simulação numérica utilizando o *AdvantEdgeTM* teve o intuito de condicionar a distribuição de temperatura e forças na usinagem do fofu cinzento. Além disso, os resultados computacionais podem ser confrontados com os experimentais. Neste programa, a simulação pode ser dividida em três passos: pré-processamento, simulação e pós processamento.

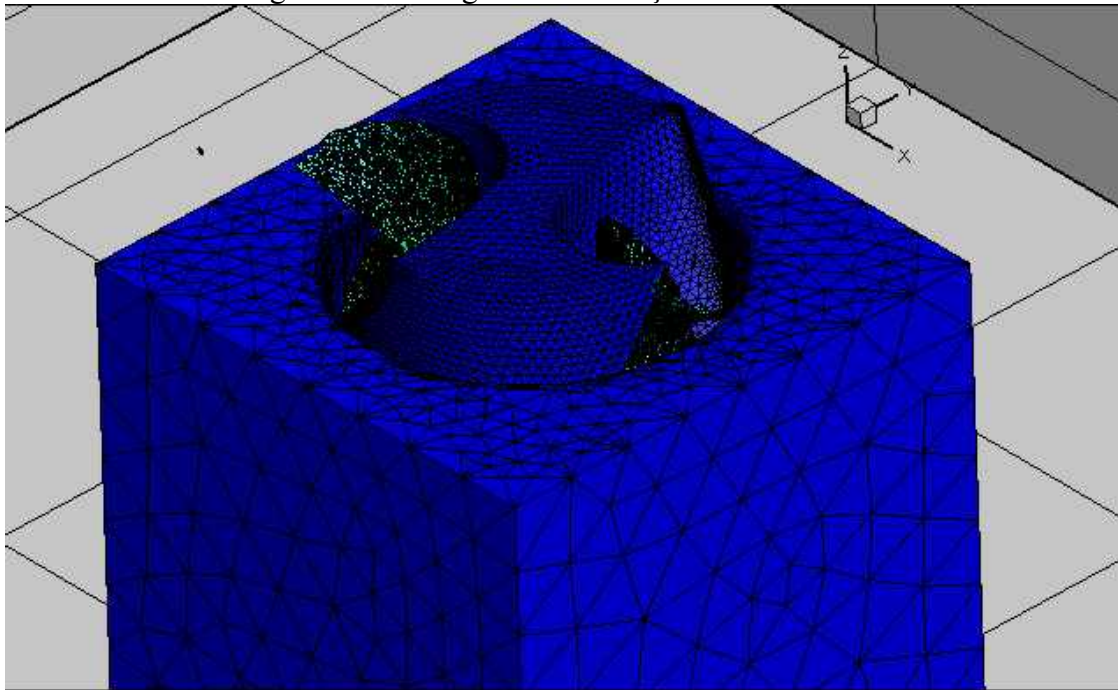
No pré-processamento, foi onde escolheu-se os dados para que a simulação pudesse ser realizada. Como foram três testes, alguns parâmetros foram iguais para todas as simulações, enquanto outros mudaram. O material da peça foi o mesmo para todos os processos, o Ferro Fundido Cinzento ASTM A48 Classe 30. Para dimensões e elementos de malha temos a Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros da Peça de Trabalho

Parâmetros da Peça	
Material	Ferro Fundido Cinzento ASTM A48 Classe 30
Largura x Altura x Comprimento (teste 1 e 2 TiNAl)	15,00 mm x 18,00 mm x 15,00 mm
Largura x Altura x Comprimento (teste 3 TiN)	15,00 mm x 15,00 mm x 15,00 mm
Menor Elemento da Malha (teste 1 e 2 TiNAl)	0,10 mm
Maior Elemento da Malha (teste 1 e 2 TiNAl)	2,00 mm
Menor Elemento da Malha (teste 3 TiN)	0,05 mm
Maior Elemento da Malha (teste 3 TiN)	1,5 mm

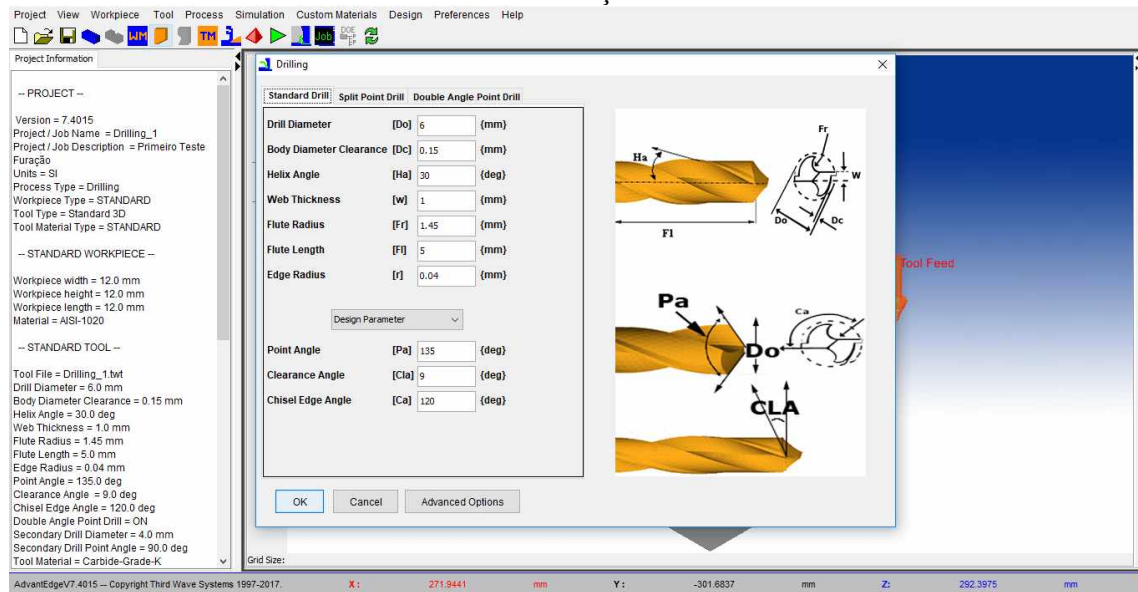
Para a ferramenta, foram modelados três tipos de brocas, uma para cada furação. As primeiras foram de aço rápido, uma com revestimento de TiNAl e outra sem, e a última foi de metal duro com revestimento de TiN. Na Figura 21 é demonstrada uma visão da malha da broca dentro da peça no momento da furação.

Figura 22 - - Imagem da simulação com a broca no furo



A Tabela 5 mostra os parâmetros das 3 brocas mencionadas anteriormente, conforme a Figura 22.

Figura 23 - Interface do *AdvantEdge*TM e alguns dos parâmetros necessários para simulação de furação



Fonte: *AdvantEdge* (2018).

Tabela 5 - Parâmetros da Broca

Modelos	Broca 1	Broca 2	Broca 2
Material	Aço Rápido	Aço Rápido	Metal Duro
Revestimento	Sem Rev.	TiNAl	TiN
Do	10,0 mm	10,0 mm	10,0 mm
Dc	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm
Há	30 deg	30 deg	30 deg
W	1,8 mm	1,8 mm	1,7 mm
Fr	1,0 mm	1,0 mm	1,2 mm
Fl	10,0 mm	10,0 mm	15,0 mm
R	0,04 mm	0,04 mm	0,04 mm
Pa	130 deg	130 deg	142 deg
Cla	10 deg	10 deg	8 deg
Ca	137 deg	137 deg	137 deg
Maior Elemento da Malha	0,8 mm	0,8 mm	0,3 mm
Menor Elemento a Malha	0,03 mm	0,03 mm	0,03 mm

Após a definição dos parâmetros para a ferramenta de corte e a peça, partiu-se para a escolha dos parâmetros do processo de usinagem. Nos dois testes com a broca de aço rápido, a velocidade de corte foi de 3000 RPM, avanço (f) de 0,1 mm/volta e o furo deu-se início na

profundidade de 12,0 mm da peça, indo até 12,5 mm. Já no teste com a broca de metal duro, a velocidade de corte foi 955,41 RPM, 0,1 mm de avanço e o furo andou 0,5 mm a partir da profundidade de 14 mm.

Após o fim da parte do pré-processamento, foi dado início a segunda etapa do processo de simulação, que é a própria simulação, que é feita pelo *software AdvantEdgeTM*, representada pela Fig. 21.

As simulações com a broca de aço rápido sem revestimento e de metal duro com revestimento de TiN foram realizadas com tempo médio de 14 h \pm 30 min. A última, de aço rápido com revestimento de TiNAl, teve duração de 330 h.

Com o segundo passo encerrado, passou-se para a parte de pós processamento. O *software Tecplot* foi utilizado nessa etapa, pois ele oferece mais ferramentas para se analisar os resultados obtidos. A principal propriedade medida nesse trabalho foi a temperatura, porém o *software* nos dá várias outras, como forças, torque, deformações etc.

CAPÍTULO V

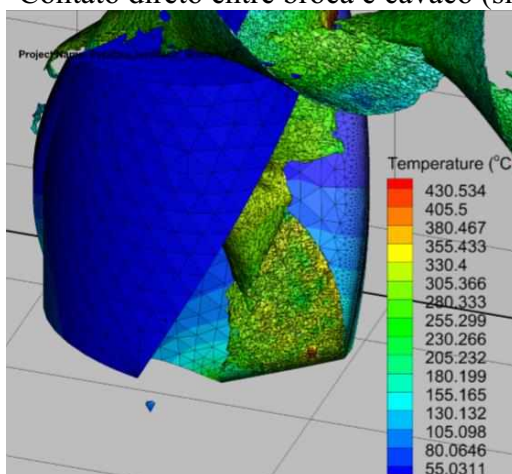
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes à medição da temperatura de usinagem durante a simulação da furação do Ferro Fundido Cinzento ASTM A48 Classe 30 utilizando o *software AdvantEdge™* para que o processo pudesse ser realizado. Os dados serão analisados conforme a temperatura e suas mudanças de revestimento de cada broca. Por fim, os resultados de temperatura obtidos por meio experimental serão apresentados e seus valores correlacionados aos resultados obtidos numericamente.

5.1. SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DE FURAÇÃO

A Figura 23 exemplifica a furação no *software*, onde o cavaco e a broca são mostrados no momento do processo, dentro do furo, sem o corpo de prova, para uma melhor visualização da remoção de material e de como ela ocorre. Como tal figura é um pente de cores do mais frio para o mais quente, em um certo tempo da simulação, é notável a diferença de temperatura da broca e do cavaco, sendo que, no contato entre os dois, a temperatura alcança seus picos.

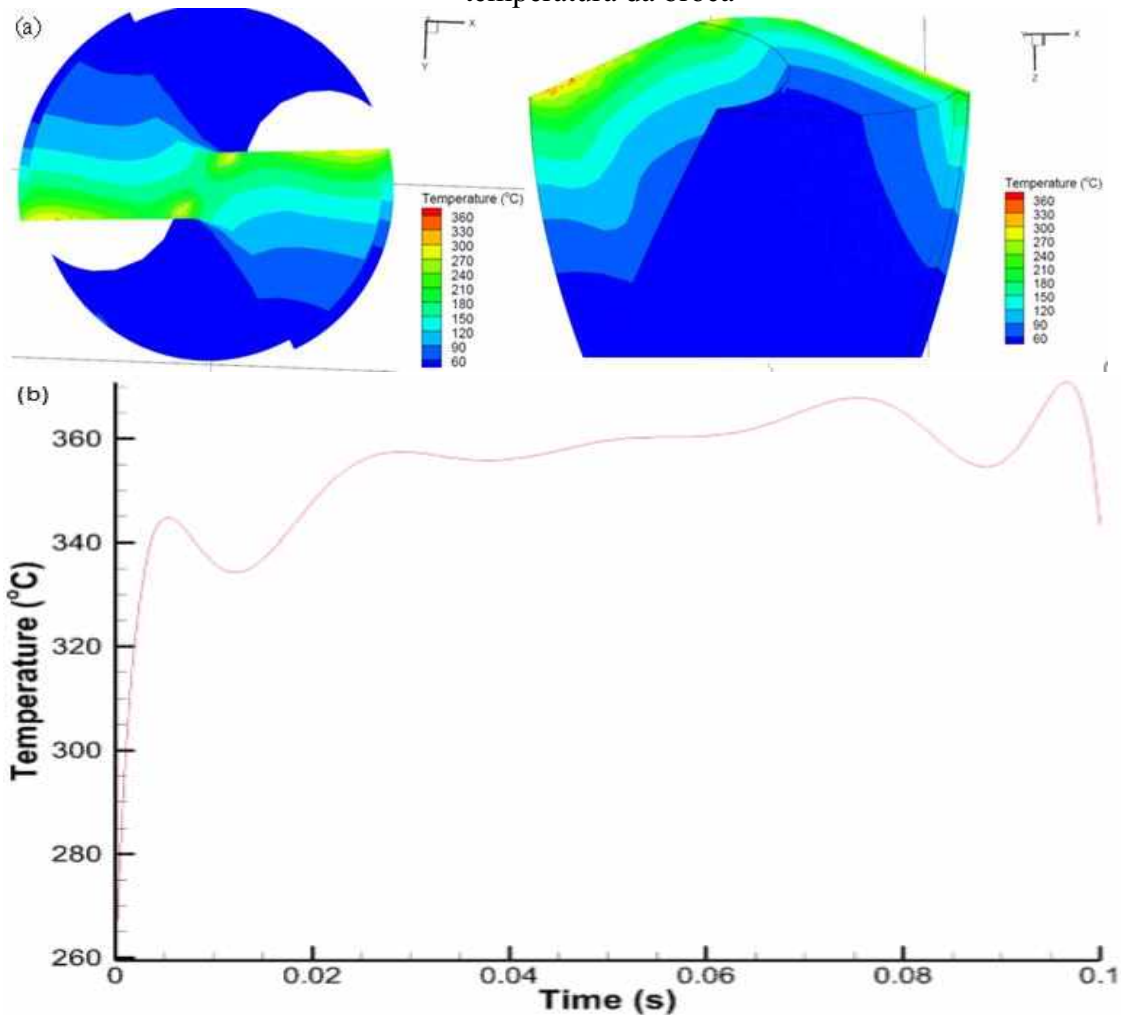
Figura 24 - Contato direto entre broca e cavaco (simulação 1)



Passando para uma análise de cada elemento em atividade, tendo uma comparação melhor entre as simulações feitas, pegou-se os resultados de temperatura para as brocas, conforme as sequencias de figuras a seguir.

A Figura 23 a) mostra a broca da primeira simulação, de aço rápido (vc = 3000 RPM, f = 0,1 mm/volta e início do furo a 12 mm), enquanto a peça é de Ferro Fundido Cinzento ASTM A48 Classe 30. Através da imagem é possível ser observado que a temperatura máxima chegou à aproximadamente 360 °C. O gráfico de temperaturas é representado por um esquema de cores, representando as regiões mais quentes e mais frias na ferramenta. Com o seu avanço no furo, a tendência é que as regiões que já estão mais avermelhadas (mais quentes) se intensifiquem na cunha de corte. A Figura 24 b) mostra a temperatura máxima da ferramenta com o passar do tempo. Essa curva foi aproximada com um polinômio de décimo grau.

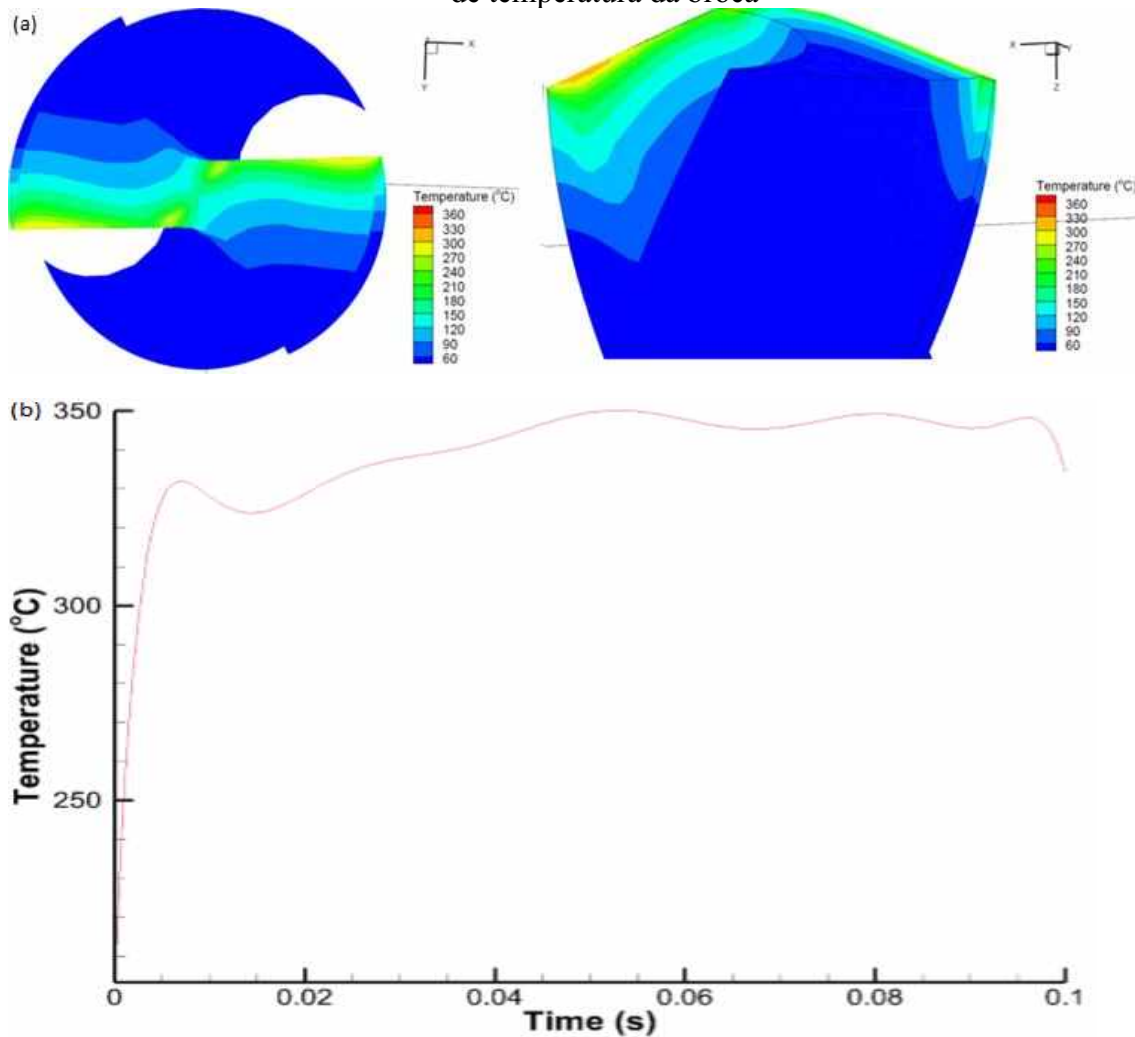
Figura 25 - Simulação 1: a) Broca de aço rápido sem revestimento. b) Polinômio de temperatura da broca



Na Figura 25 vemos a mesma broca, porém em outra simulação (com a mesma peça de trabalho) e agora revestida de TiAlN. Com os mesmos parâmetros de corte, pode-se ver que nela a temperatura foi um pouco menor, sendo que sua máxima alcançou 350 °C. Esse comportamento é explicado pelas propriedades térmicas distintas do revestimento e do substrato da ferramenta. A condutividade térmica do TiAlN é de 50 W/m.K (SANTOS *et*

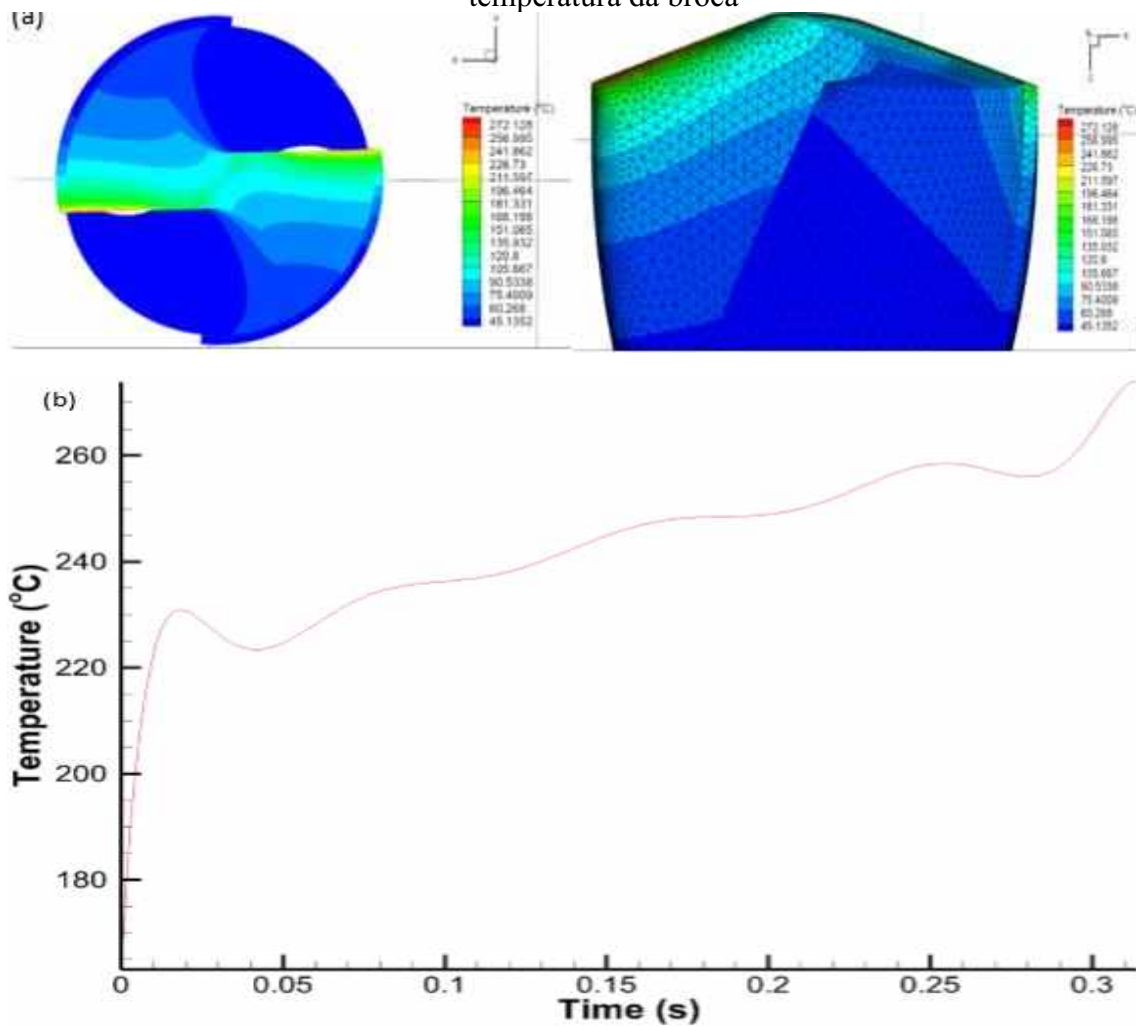
SALES, 2007), maior que a condutividade térmica do aço rápido (HSS-M2), 37 W/m.K (MACHADO *et al.*, 2015). Desta forma, o revestimento de TiAlN tem um efeito de dissipação térmica do calor transmitido à ferramenta de corte, proporcionando menores temperaturas na ferramenta de corte (GRZESIK, 2017).

Figura 26 - Simulação 2: a) Broca de aço rápido com revestimento de TiAlN. b) Polinômio de temperatura da broca



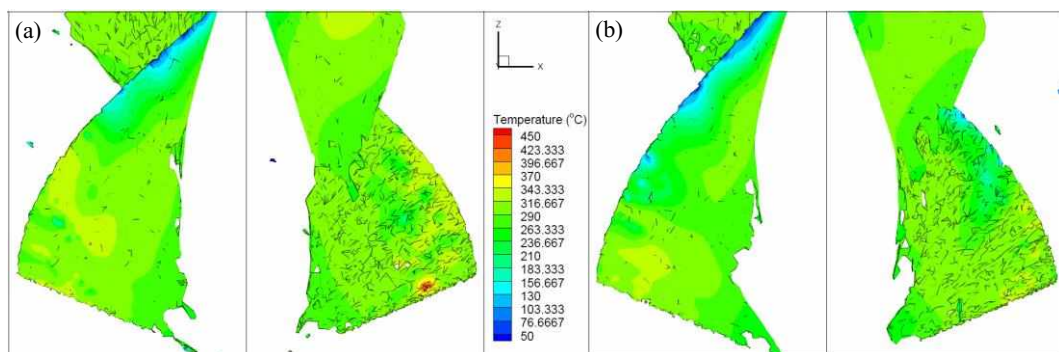
A broca, de metal duro, revestida com TiN, usinou o mesmo corpo de prova das simulações anteriores, porém, com parâmetros de cortes diferentes ($v_c = 950$ RPM, $f = 0,1$ mm/volta e início do furo a 12 mm). Essa ferramenta apresentou uma temperatura máxima de 265 °C, como pode ser observado na Figura 26-b. A temperatura em usinagem é diretamente proporcional a velocidade de corte utilizada e este último parâmetro foi três vezes menor do que nas duas simulações anteriores. Assim, é justificável a temperatura máxima da broca ser a menor encontrada até o momento, mesmo tendo um revestimento com condutividade térmica menor que a de TiAlN (condutividade térmica do TiN: 43 W/m.K). A Fig. 26-a mostra a distribuição de temperatura na broca.

Figura 27 - Simulação 3: a) Broca de metal duro com revestimento de TiN. b) Polinômio de temperatura da broca



A Figura 27 compara os cavacos das simulações 1 e 2. É no cavaco que se encontram as maiores temperaturas do processo, por isso a importância de analisa-lo.

Figura 28 - Distribuição de temperaturas dos cavacos; a) ferramenta sem revestimento; b) com revestimento de TiNAl

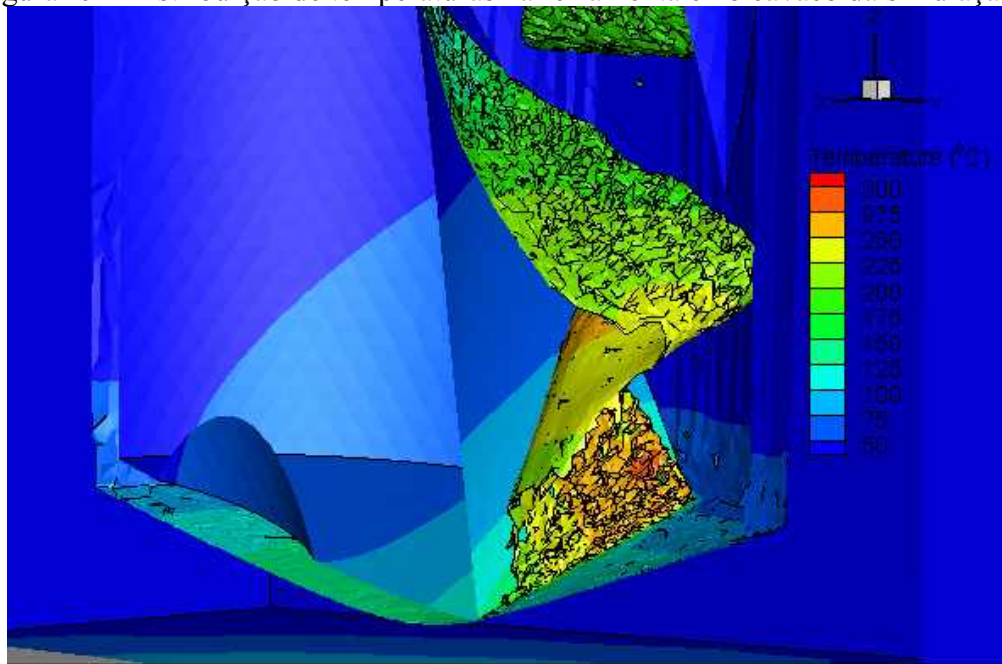


A temperatura máxima média dos cavacos para a ferramenta não revestida foi de 335 °C. Esse valor de temperatura pode ser explicado pela maior partição de calor dissipada pelo cavaco (GRZESIK, 2017). A condutividade térmica do ferro fundido cinzento, 48,5 W/m.K

(GUESSER, 2009), facilita que o calor seja conduzido através dos cavacos em detrimento à ferramenta de corte, de condutividade térmica menor. A presença do revestimento de TiNAl alterou as propriedades térmicas da ferramenta de corte. Isso se mostrou verdadeiro devido às menores temperaturas apresentadas nos cavacos gerados pela ferramenta revestida. A temperatura máxima do cavaco nesse cenário foi de 330 °C.

O cavaco da simulação 3, chegou a temperatura máxima de 274 °C, uma temperatura maior do que a broca, porém, menor do que os das simulações anteriores, devido a velocidade de corte menor (Figura 28).

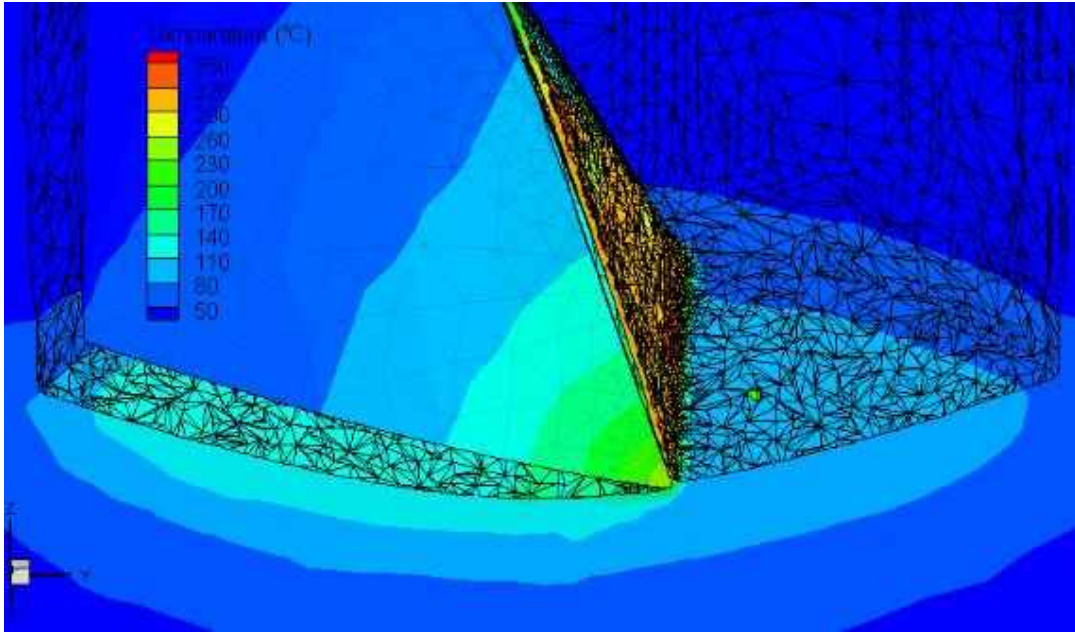
Figura 29 - Distribuição de temperaturas na ferramenta e no cavaco da simulação 3



A temperatura máxima nas brocas ocorreu todas na aresta principal de corte, região próxima ao contato ferramenta-peça, na extremidade da broca. Isso ocorre porque as velocidades de corte são maiores nas extremidades da ferramenta e quanto maior a velocidade de corte, maior a temperatura.

Finalmente, levando em consideração que uma pequena parte da temperatura gerada pelo calor vai para a peça, que possui mais massa no sistema, assim, se dissipando mais rápido, é aceitável que as temperaturas desse componente sejam as menores do processo. A Figura 29 evidencia isto, mostrando o fluxo de temperatura durante a furação, com a broca em corte dentro do furo, onde é possível observar que as maiores temperaturas na superfície usinada e logo abaixo da ferramenta.

Figura 30 - Distribuição de temperaturas na ferramenta – peça dentro do furo da simulação 1

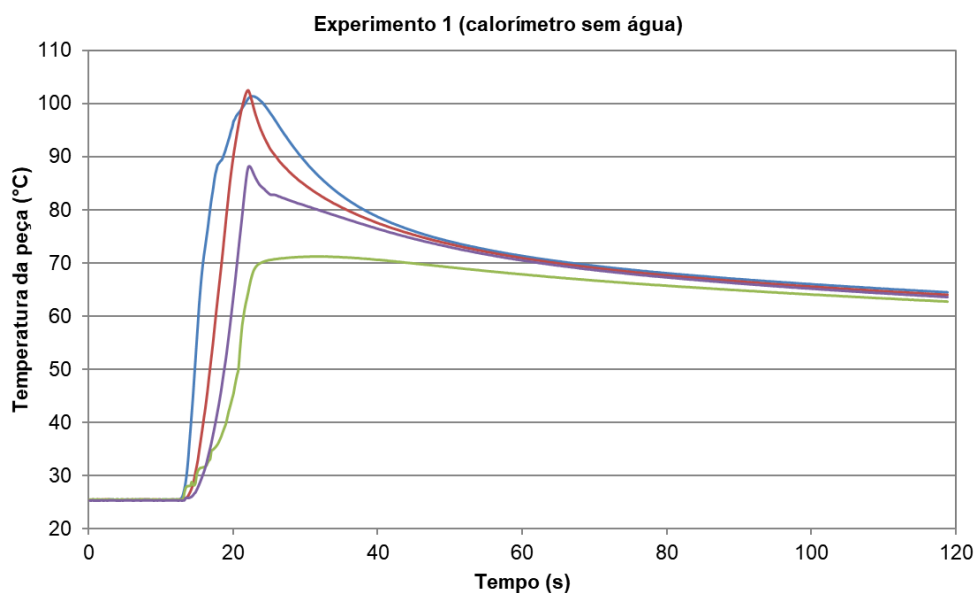


5.1.1. Resultados experimentais

A fim de complementar os resultados numéricos, foram realizados quatro testes experimentais com o calorímetro de água. O primeiro teste foi com termopares colados no exterior do corpo de prova, com os resultados plotados no gráfico da Figura 30, sendo que o segundo teste foi uma réplica do primeiro para confirmar os resultados.

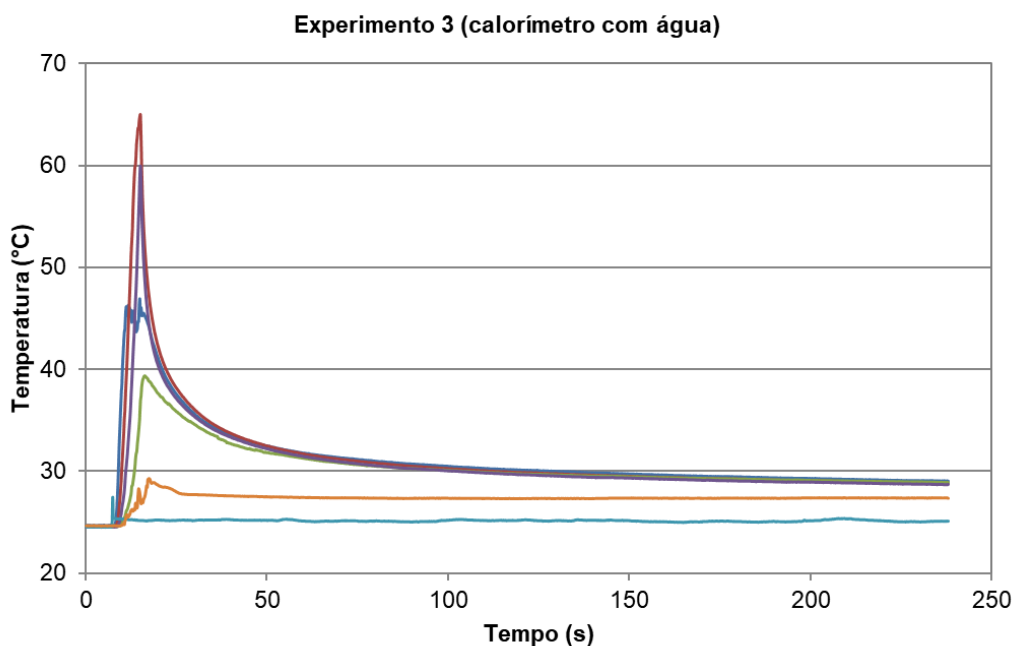
O gráfico mostra os picos de temperatura e também que os termopares colados nos corpos de prova seguiram uma sequência lógica, já que o primeiro iria ter uma temperatura menor pois estaria mais próximo da entrada da broca, com sequência o restante iria tendo um certo aumento.

Figura 31 - Variação de temperatura no corpo de prova durante o experimento 1



Nos testes 3 e 4 foram adicionados água na cuba inferior e um termopar foi colocado submerso nessa água para poder medir o comportamento da variação da temperatura.

Figura 32 - Variação de temperatura no corpo de prova durante o experimento 3



A temperatura máxima durante a usinagem, com calorímetro sem água em seu interior, foi cerca de 110 °C. Na usinagem com água no interior do calorímetro, a temperatura máxima foi de 65 °C.

O torque da máquina é teoricamente constante para todos os experimentos, assim, foi feito apenas uma medição para sua avaliação que foi obtido durante o experimento três, que

teve como média 2,323 N.m. Com o torque da máquina, podemos achar a energia total do sistema que foi gasta para que a furação ocorresse. A Equação 4.1 nos indica como achar.

$$E_{tot} = \frac{2\pi\tau.p}{f} \quad (4.1)$$

Como se tem todos as variáveis da Eq. 4.1 (torque, profundidade do furo e avanço), temos que a energia total do sistema é 2189,37 J.

Para se ter a energia mecânica convertida em energia térmica é necessário utilizar a Eq. 2.3 e Eq. 2.4. Como já se tem o calor específico da água e a massa utilizada ($c = 1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$, $m = 0,09 \text{ kg}$), e as variações de temperatura média dos termopares em água (teste 3 $\Delta\theta = 2,83 \text{ }^\circ\text{C}$ e teste 4 $\Delta\theta = 2,82 \text{ }^\circ\text{C}$), é obtido o calor de 1065,64 J. Com isso, a energia convertida em calor é 48,67 %, sendo que o resto dela pode ter sido transformada em energia sonora, potencial, entre outras perdas.

O método de medição de temperatura através do *software* utilizado mostrou-se de grande desempenho em relação a métodos experimentais, pois elas demandam tempo, recursos e muitas vezes são invasivas ou bastante limitadas, necessitando inclusive de calibração. Já, com a simulação, pode-se otimizar tudo isso, obtendo um campo de temperatura que não seria possível experimentalmente.

Baseado nos resultados obtidos experimentalmente, pode-se afirmar que o calorímetro de água apresentou uma resposta coerente e se mostrou promissor, indicando que a metodologia pode ser utilizada na avaliação do calor gerado em furação de ferro fundido cinzento.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÃO

Os resultados foram coerentes e satisfatórios, próximos da literatura existente sobre este conteúdo, podendo dizer que os objetivos deste trabalho foram cumpridos:

- As temperaturas máximas alcançadas nas brocas foram de 360 °C, 350 °C e 265 °C para os experimentos 1, 2 e 3, respectivamente.
- Os picos de temperatura ocorreram nas arestas principais de corte.
- As temperaturas máximas dos cavacos foram de 435 °C, 330 °C e 274 °C para os experimentos 1, 2 e 3, respectivamente.
- A energia da furação nos testes experimentais foi 2189,37 J.
- O calor dos testes experimentais foi de 1065,64 J.
- A energia mecânica convertida em energia térmica foi 48,67%.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FERRARESI, D.; “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, 2ª Ed., São Carlos, SP, Editora Edgard Blucher LTDA, 2012.

STEMMER, E. G.; Ferramentas de Corte II. Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Florianópolis, 3a edição, 2005.

CHEN, Y. C., LIAO, Y. S., “Study on Wear Mechanisms in Drilling of Inconel 718 Superalloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 140, pp. 269–273, 2003.

SOUZA, A. J.; Processo de Fabricação por Usinagem. Escola Politécnica da Cidade de São Paulo, SP, 2011.

SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles*. New York: Oxford University Press, 1984.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P.K. *Metal Cutting*. 4rd Edition, Butterworths, London, ISBN 0408108568, 2000, 446 p.

Costa, I.S., Borba Jr., M.B., Da Silva, M.B., 2018, “Medição de Calor e Temperatura em Usinagem por meio do Método Calorimétrico”, *Acta Mechanica et Mobilitatem*, Vol. 3, N. 6, pp. 53-59.

TAYLOR, F. T. On the art of cutting metals. *The American Society of Mechanical Engineers*. p.1856-1915, 1907

LO CASTO, S. et al. Cutting temperatures evaluation in ceramic tools: experiments tests, numerical analysis and SEM observations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v.43, p. 73-76, 1994.

TAKEUCHI, Y.; SAKAMOTO, M.; SATA, M.; Improvement in the working accuracy of an NC lathe by compensating for thermal expansion. *Precision Engineering*, n. 4, p. 19-24, 1982.

FLEISCHER, J.; PABST, R.; KELEMEN, S. Heat flow simulation for dry machining of power train castings. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, n. 56, p. 117 – 122, 2007.

PUTZ, M. et al. Consistent simulation strategy for heat sources and fluxes in milling. Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering – CIRP62. p. 239 – 244, 2017.

MACHADO, A. R. et al. Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Blucher, 2009. 384p.

DA SILVA, M. B.; WALLBANK, J. Cutting Temperature: Prediction and Measurement Methods - A Review. Journal of Materials Processing Technology 88 (1999) 195–202.

SUTTER, G; RANC, N. Temperature fields in a chip during high-speed orthogonal cutting - an experimental investigation. International Journal of machine Tools and Manufacture, v.47, p.1507-1517, Fev. 2007.

MACHADO, Á. R.; DA SILVA, M. B. Usinagem dos Metais. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Versão 8. Abril de 2004, 257 p.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Blucher, 2011, 2ª Edição, 397 p.

NAKAYAMA, K. Temperature Rise of Workpiece During Metal Cutting. Bull Faculty Engineering, Yokohama National University, March, 1956, p. 1-10.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. São Paulo, Artliber Editora, 2008, 6ª edição, 262 p.

KOMANDURI, R.; HOU, Z. B. A Review of the Experimental Techniques for the Measurement of Heat and Temperatures Generated in Some Manufacturing Processes and Tribology. Tribology International 34 (2001) 682p.

Davoodi, B., Hosseinzadeh, H. 2012. A new method for heat measurement during high speed machining. Measurement 45(8) 2140p.

BORCHARDT, I. G.; GOMES, A. F. Termometria Termoelétrica – Termopares. Ed. Sagra S/A, Porto Alegre, 1979.

ATKINS, P.W.; JONES, Loretta. Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 965 p.

DANOSO, J. P. Datas e Personagens na História da Termodinâmica. Universidade de São Paulo. Instituto de Física de São Carlos - IFSC, s. d., 40 p. Disponível em:

http://www.ifsc.usp.br/~donoso/termodinamica/Historia_Termodinamica.pdf Acessado em: 30/04/2019.

SCHMIDT A. O.; ROUBIK J. R. Distribution of Heat Generated in Drilling. Trans ASME 1949, 71:242–245. (apud KOMANDURI; HOU, 2001).

QUAN, Y.; HE, Z.; DOU, Y. Cutting Heat Dissipation in High-speed Machining of Carbon Steel Based on the Calorimetric Method. China Mechanical Engineering, 2008, 3(2): 175–179.

Matsumura T., Shoichi T., 2013. Cutting simulation of titanium alloy drilling with energy analysis and FEM, Procedia CIRP 8, 11p.

Wu, J., Han, R.D., 2009, “A New Approach to Predicting the Maximum Temperature in Dry Drilling Based on a Finite Element Model”, Journal of Manufacturing Processes, Volume 11, Issue 1, January 2009, Pages 19-30.

BAGCI, E.; OZCELIK, B.; Influence of Cutting Parameters on Drill Bit Temperature in Dry Drilling of Aisi 1040 Steel Material Using Statistical Analysis. Industrial Lubrication And Tribology, Gebze-kocaeli, Turkey, 2007, pp. 1-8.

SILVA, M. D. Desenvolvimento e Construção de um Calorímetro para o Processo de Furação. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2015, 90 p

Third Wave Systems, 2018, “Third Wave AdvantEdge™”. 20 Set 2018, <<https://www.thirdwavesys.com/advantedge/>>.