

**MARCOS DOUGLAS SILVA**

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE  
UM CALORÍMETRO PARA O  
PROCESSO DE FURAÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
2015

**MARCOS DOUGLAS SILVA**

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM CALORÍMETRO  
PARA O PROCESSO DE FURAÇÃO**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Uberlândia - MG

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S586d  
2015      Silva, Marcos Douglas, 1978-  
Desenvolvimento e construção de um calorímetro para o processo de  
furação / Marcos Douglas Silva. - 2015.  
108 f. : il.

Orientador: Marcio Bacci da Silva.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Usinagem - Teses. 3.  
Dinamômetro - Teses. 4. Calorimetria - Teses. I. Silva, Marcio Bacci da,  
1964- II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

---

CDU: 621

*"Toda nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil, ainda sim é o bem mais precioso que nós temos"*

Albert Einstein

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela existência e possibilidade de concluir mais uma etapa da minha carreira profissional;

Aos meus pais Donizete e Juçara, aos meus irmãos Adriano e Júlio, pela oportunidade de ter estudado, que sempre se mostraram zelosos e prontos a me ajudar. Pelo amor e entusiasmo que me abastecem, serei eternamente grato;

À minha esposa Irisnei pelo apoio, compreensão e pelo companheirismo inabalável;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Bacci, pela paciência, pela amizade, pois sempre esteve presente, orientando e acompanhando o desenvolvimento do meu trabalho, por compreender claramente as dificuldades com que me deparava, pois foram muito importantes para não me deixar abater;

Aos Profs. Drs. Álisson, Rosemar, Éder e Wisley pela colaboração nesse trabalho;

Aos colegas de grupo que contribuíram para enriquecer meu conhecimento, pela amizade e pelo companheirismo que sempre demonstraram;

À UFU pela disponibilidade da infra estrutura, a todos os professores e funcionários do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - LEPU, que sempre foram prestativos e atenciosos;

Às agências CAPES, FAPEMIG e CNpq, pelos recursos para aquisição de equipamentos de informática;

DOUGLAS, M. S., **Construção de um calorímetro para o processo de furação**. 2015. 97f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

O presente trabalho busca medir e analisar a variação de temperatura e os esforços de corte em um processo de furação e, estabelecer a relação entre a energia envolvida em todo processo e calor gerado. Para isso, a presente pesquisa projetou e construiu um calorímetro, feito de PVC e Technyl, para viabilizar o estudo em questão. Após a construção do calorímetro, foram usados termopares convencionais do tipo K, acoplados ao equipamento Agilent, que se encarregaram de fazer a aquisição da variação da temperatura no momento da furação. Para a medição dos esforços de corte, foi utilizado um dinamômetro rotacional Kistler. Foram utilizados corpos de prova de ferro fundido cinzento e broca de aço rápido, com diâmetro de 10,0 mm ( $\phi = 10,0 \text{ mm}$ ). A variação do calor gerado bem como a variação do torque observados no momento da furação foram apresentados em gráficos e discutidos conforme os cálculos matemáticos propostos.

---

*Palavras Chave: Temperatura, Esforços de corte, Processo de furação, Calorímetro, Termopares, Dinamômetro, Broca, Torque.*

DOUGLAS, M. S., **Construction of a calorimeter for the drilling process.** 2015. 97f. Masters dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## **ABSTRACT**

This study aims to measure and analyze the variation of temperature and cutting forces in a drilling process, establish the relationship between the energy involved in the whole process and heat generated. For this, the present study has designed and built a calorimeter, made of PVC and Technyl, to facilitate the study. After construction of the calorimeter, thermocouples were used conventional K-type, coupled to the equipment Agilent, which is instructed to make acquisition of the temperature variation at the time of drilling. For measurement of the shear stress, it used a rotational Kistler dynamometer. It used specimens cast gray iron and high-speed steel drill, with a diameter of 10.0 mm ( $\phi = 10.0$  mm). The variation of heat generated as well as the variation of torque observed at the time of drilling were presented in graphs and discussed as the proposed mathematical calculations.

---

*Keywords: Temperature, Cutting efforts, Drilling process, Calorimeter, Thermocouples, Dynamometer, Drill, Torque.*

## Lista de Figuras

1.1	Broca e seus ângulos (Stemmer, 2005) . . . . .	2
1.2	Broca e suas aplicações em relação aos ângulos (Braga, 1999) . . . . .	3
2.1	Dinamômetro kistler fixado no mandril da máquina CNC . . . . .	7
2.2	Principais mecanismos de desgaste no processo de usinagem, König e Klocke (1997) . . . . .	8
2.3	Cavaco de ferro fundido cinzento. . . . .	10
2.4	Interface cavaco/ferramenta/peça durante a usinagem: (a) geração de calor; (b) distribuição de temperatura (Souza, 2011) . . . . .	11
2.5	Distribuição de calor durante a formação do cavaco, Bagheri e Mottaghizadeh (2012) . . . . .	13
2.6	a) grafita lamelar (fofo cinzento), b) grafita nodular (fofo nodular) e c) grafita vermicular (fofo vermicular) (Andrade, 2005) . . . . .	15
3.1	Fórmula estrutural do PVC . . . . .	17
3.2	Fórmula estrutural do Technyl . . . . .	19
3.3	Imagem ampliada das resinas de troca iônica (Eymard, 2001) . . . . .	20
3.4	modelo de termopar convencional . . . . .	23
3.5	modelo de termopar de isolamento mineral . . . . .	23
4.1	Esboço do calorímetro de gelo de Lavoisier e Laplace, Chagas (1992) e Alexandre et al (2010) . . . . .	34
5.1	Representação de um tarugo de PVC . . . . .	35



5.2	Representação de um tarugo de PVC com fresa no centro, primeira imagem representa o desenho em 3D e a segunda imagem representa uma vista superior . . . . .	36
5.3	Representação do tarugo de PVC com cavidade cilíndrica no centro para encaixe da peça de ferro fundido cinzento, primeira imagem, representação com vista superior, segunda imagem, vista 3D . . . . .	36
5.4	Representação do tarugo de PVC com furos na face superior, primeira imagem, representação com vista 3D, segunda imagem, vista superiorl . . . . .	37
5.5	Representação do tarugo de PVC com furos passante para condução dos termopares, ambas imagens com vista 3D . . . . .	37
5.6	Representação da tampa do calorímetro com furo passante no centro . . . . .	38
5.7	Representação do calorímetro pronto . . . . .	38
5.8	Representação da peça de ferro fundido cinzento . . . . .	39
5.9	Termopares soldados na peça de ferro fundido cinzento . . . . .	40
6.1	Variação de temperatura . . . . .	42
6.2	Posição dos Termopares . . . . .	42
6.3	Gráfico da variação de temperatura na água. . . . .	43
6.4	Gráfico do sinal de torque durante a furação. . . . .	44
6.5	Gráfico da variação do torque para o experimento 2. . . . .	48
6.6	Gráfico da variação da temperatura na água, observado no segundo experimento. . . . .	48
6.7	Gráfico da variação de temperatura na peça de ferro fundido cinzento. . . . .	49
6.8	Gráfico da variação da temperatura na água, observado no terceiro experimento. . . . .	52
6.9	Gráfico da variação de temperatura na peça de ferro fundido cinzento. . . . .	53
6.10	Gráfico da variação do torque no terceiro experimento. . . . .	53
6.11	Desenho com dimensões de cortes na cuba 1 [mm]. . . . .	56
6.12	Desenho 3D da cuba 1. . . . .	56
6.13	Desenho da cuba de PVC com dimensões [mm]. . . . .	57
6.14	Desenho 3D da cuba de PVC. . . . .	57
6.15	Desenho 3D do conjunto cubas encaixadas e tampa. . . . .	58

6.16 Foto do calorímetro com as cubas encaixadas e a peça de ferro fundido cinzento fixada pronta para a furação. . . . .	59
6.17 Foto do calorímetro montado preenchido com isopor e a tampa com termopares inseridos. . . . .	59
6.18 Foto do calorímetro pronto, montado e com os termopares inseridos. . . . .	60
6.19 Foto da broca HSS parada no momento em que se termina o furo. . . . .	61
6.20 Gráfico com a variação do torque para o primeiro experimento. . . . .	62
6.21 Gráfico com a variação de temperatura no primeiro experimento. . . . .	64
6.22 Gráfico com a variação de torque no segundo experimento. . . . .	65
6.23 Gráfico com a variação de temperatura no segundo experimento. . . . .	67
6.24 Gráfico com a variação de torque no terceiro experimento. . . . .	68
6.25 Gráfico com a variação de temperatura no terceiro experimento. . . . .	70
6.26 Gráfico com a variação de torque no quarto experimento. . . . .	71
6.27 Gráfico com a variação de temperatura no quarto experimento. . . . .	72
6.28 Gráfico com a variação de torque no quinto experimento. . . . .	74
6.29 Gráfico com a variação de torque no sexto experimento. . . . .	74
6.30 Gráfico com a variação de torque no sétimo experimento. . . . .	75
6.31 Gráfico com a variação de temperatura no quinto experimento. . . . .	75
6.32 Gráfico com a variação de temperatura no sexto experimento. . . . .	76
6.33 Gráfico com a variação de temperatura no sétimo experimento. . . . .	76
6.34 Gráfico com a variação de temperatura no primeiro experimento. . . . .	79
6.35 Gráfico com a variação de temperatura no segundo experimento. . . . .	80
6.36 Gráfico com a variação de temperatura no terceiro experimento. . . . .	81
6.37 Gráfico com a variação de temperatura no quarto experimento. . . . .	82
6.38 Gráfico com a variação de temperatura no quinto experimento. . . . .	83
6.39 Gráfico com a variação de temperatura no sexto experimento. . . . .	84
6.40 Gráfico com a variação de temperatura no sétimo experimento. . . . .	85

## **Lista de Tabelas**

2.1	Propriedades mecânicas dos diferentes tipos de ferro fundido . . . . .	16
5.1	Condições de corte para a realização do primeiro ensaio experimental. . . . .	40
6.1	Condições de corte para a realização dos ensaios utilizando o primeiro calorímetro e também para o segundo calorímetro. . . . .	61
6.2	Resultados dos ensaios experimentais usando o segundo calorímetro . . . . .	77
6.3	Resultados obtido na segunda bateria de experimentais usando o segundo calorímetro	86

## Lista de Símbolos

$ap.$	- Profundidade de corte em milímetros
$c$	- Calor específico $cal/g^{\circ}C$
$C$	- Elemento químico Carbono
$cal$	- Calorias, unidade de medida de calor
$cm^3$	- Centímetros cúbicos
$CNC$	- Comando Numérico computadorizado
$g$	- Unidade de massa em gramas
$d$	- Distância, deslocamento
$D$	- Diâmetro da broca em milímetros
$F$	- Força em Newtons
$m$	- Unidade de comprimento em metro
$mm$	- Unidade de comprimento em milímetro
$m_{H_2O}$	- Massa de água em gramas
$m_{fofo}$	- Massa do ferro fundido cinzento
$fofo$	- Ferro fundido
$d\omega$	- Taxa de variação do trabalho
$dT$	- Taxa de variação de tempo
$F_c$	- Força de corte
$Fe$	- Ferro
$Fe_3C$	- Cementita
$F.E.M$	- Força eletromotriz
$ft.lb$	- Unidade Internacional de pé-libra
$Gpa$	- Unidade de Giga Pascal
$h$	- Altura, em milímetros
$HSS$	- Aço rápido, material da broca
$H^+$	- Íons de hidrogênio
$HO^-$	- Íons de hidroxila
$rpm$	- Rotações por minuto
$P$	- Potência em Watts
$T$	- Temperatura em segundos
$TiN$	- Nitreto de Titânio, revestimento da broca

$MEF$	-	Método de elementos finitos
$K$	-	Unidade de temperatura em Kelvin
$Kg$	-	Quilograma
$KW$	-	Quilowatt
$mL$	-	Mililitro
$MPa$	-	Megapascal
$mV$	-	Unidade de tensão elétrica em milivolt
$Mt$	-	Momento torsor
$PVC$	-	Policloreto de Vinil
$Q$	-	Quantidade de calor
$\alpha$	-	Ângulo de incidência
$\beta$	-	Ângulo de cunha
$\gamma$	-	Ângulo de saída
$\sigma$	-	Ângulo de ponta
$\psi$	-	Ângulo do gume transversal
$\epsilon$	-	Ângulo de quina
$r\epsilon$	-	Raio de quina
$\eta$	-	Rotação da máquina
$\phi$	-	Diâmetro
$\theta T$	-	Variação da temperatura de corte
$\delta T$	-	Variação do tempo de corte
$\omega$	-	Trabalho
$\tau$	-	Torque

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo geral . . . . .	3
1.2	Objetivos específicos . . . . .	4
1.3	Composição do trabalho . . . . .	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	A importância do processo de furação . . . . .	5
2.2	Força e torque em brocas helicoidais . . . . .	6
2.3	O desgaste nas ferramentas de usinagem . . . . .	7
2.4	A formação do cavaco . . . . .	10
2.5	A distribuição de calor no momento da usinagem . . . . .	10
2.6	Métodos de quantificação da temperatura de usinagem . . . . .	11
2.7	Ferro fundido cinzento . . . . .	13
<b>3</b>	<b>MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DO CALORÍMETRO E NO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>17</b>
3.1	O Policloreto de Polivinila - PVC . . . . .	17
3.2	Technyl . . . . .	18
3.3	Água deionizada . . . . .	19
3.4	Sistema de aquisição de temperatura . . . . .	20
3.4.1	Efeito Seebeck . . . . .	20
3.4.2	Lei do circuito homogêneo . . . . .	21
3.4.3	Lei dos metais intermediários . . . . .	21
3.4.4	Lei das temperaturas intermediárias . . . . .	21

	1
3.4.5 Conversão de tensão em temperatura . . . . .	22
3.4.6 Tipos de termopares . . . . .	22
3.4.7 Critérios para a seleção de termopares . . . . .	24
3.4.8 Aquisição do sinal de temperatura . . . . .	24
<b>4 FUNDAMENTOS BÁSICOS DE CALORIMETRIA</b>	<b>26</b>
4.1 Energia . . . . .	26
4.2 Trabalho . . . . .	27
4.3 Potência . . . . .	28
4.4 Calor . . . . .	31
4.5 Quantificação do calor . . . . .	31
4.6 Equação fundamental da calorimetria . . . . .	32
4.7 O calorímetro de Lavoisier e Laplace . . . . .	33
<b>5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>35</b>
5.1 Metodologia . . . . .	35
5.1.1 Construção do primeiro calorímetro . . . . .	35
5.1.2 Resultados obtidos usando o primeiro calorímetro . . . . .	39
<b>6 RESULTADOS PRELIMINARES</b>	<b>42</b>
6.1 Construção do segundo calorímetro . . . . .	55
6.2 Resultados obtidos utilizando o segundo calorímetro . . . . .	62
<b>7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>87</b>
7.1 Conclusões . . . . .	87
7.2 Trabalhos Futuros . . . . .	87
<b>8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>89</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A usinagem é um termo empregado em todo processo que virá conferir a peça o 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, 1969) .

A usinagem começou como uma atividade manual e hoje evoluiu de tal forma que já se usam máquinas controladas por comando numérico computadorizado, conhecidas como CNC. São máquinas de ultra precisão que possibilitam atender o mercado automotivo, naval, aeroespacial, mercado de eletrodomésticos, eletrônicos e etc.

Existem vários exemplos de processos de usinagem, os quais podem ser citados o seramento, o aplainamento, torneamento, fresamento, brochamento, eletroerosão, a furação, que será nosso objeto de estudo, dentre outros.

Dentre os diversos processos de usinagem, a furação possui o objetivo de gerar furos, em sua maioria cilíndricos, em uma peça qualquer, onde se utiliza uma broca para executar tal tarefa através do movimento relativo de rotação entre a peça e a ferramenta.

O processo de furação representa um dos processos de usinagem mais complexos. A principal característica que a distingue dos demais processos é o fato de ocorrer extrusão no centro da broca, juntamente com usinagem.

A ferramenta mais comumente utilizada durante o processo de furação é a broca helicoidal, que por sua vez foi desenvolvida na década de 1820. O tipo de afiação original, conhecido



como afiação cônica, é até hoje utilizado em operações simples (Stemmer, 2005).

A geometria da broca esolhida para realizar o furo exerce influência, juntamente com outros fatores, na usinagem. É necessário portanto definir a ferramenta através dos ângulos da cunha cortante.

A ponta da broca é a extremidade cortante que recebe a afiação, forma um ângulo  $\sigma$  que varia de acordo com o material a ser cortado. A broca possui duas arestas cortantes que trabalham simultaneamente como um sistema de duas ferramentas, assim permite formar 2 cavacos simétricos, figura 1.1.

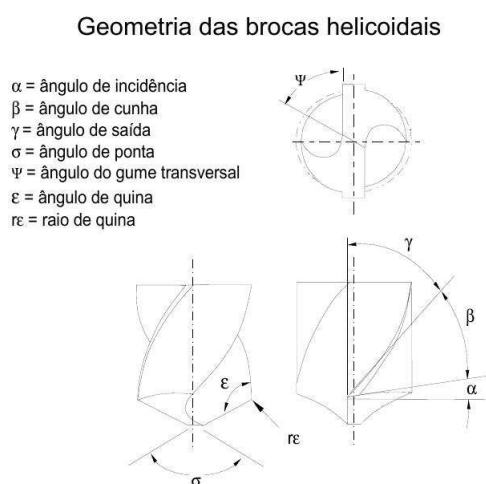


Figura 1.1 – Broca e seus ângulos (Stemmer, 2005)

A broca apresenta dois canais helicoidais que permitem a saída dos cavacos e também a entrada de líquido de refrigeração e lubrificação na zona de corte.

O ângulo de hélice  $\gamma$ , auxilia no desprendimento do cavaco e no controle do acabamento e profundidade do furo. Em furos de materiais mais duros usa-se  $\gamma$  mais fechado e para usinar materiais mais macios, usa-se  $\gamma$  mais aberto, Stemmer (2005). O ângulo de hélice é o ângulo de saída da broca medido no diâmetro externo. A figura 1.2 relaciona os ângulos da broca e suas aplicações.

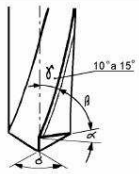
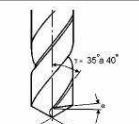
Ângulo da broca	Classificação quanto ao ângulo de hélice	Ângulo da ponta ( $\sigma$ )	Aplicação
	Tipo H - para materiais duros, tenazes e/ou que produzem cavaco curto (descontínuo).	80° 118° 140°	Materiais prensados, ebonite, náilon, PVC, mármore, granito. Ferro fundido duro, latão, bronze, celeron, baquelite. Aço de alta liga.
	Tipo N - para materiais de tenacidade e dureza normais.	130° 118°	Aço alto carbono. Aço macio, ferro fundido, latão e níquel.
	Tipo W - para materiais macios e/ou que produzem cavaco longo.	130°	Alumínio, zinco, cobre, madeira, plástico.

Figura 1.2 – Broca e suas aplicações em relação aos ângulos (Braga, 1999)

Segundo Ferraresi (1977), cerca de 87 à 90% do trabalho num processo de usinagem se transforma em calor. Esta estimativa é baseada em experimentos utilizando o método do calorímetro, no qual se mede a temperatura da água que envolve a peça em usinagem, ferramenta e cavaco (Machado et al, 2009). Tal método é descrito na literatura (Ferraresi, 1977) como forma de obtenção da temperatura do cavaco e verificação da influência da velocidade de corte e ângulo de saída da ferramenta.

Todos esses métodos descritos anteriormente bem como o presente plano de trabalho, que propõe uma medição da variação da temperatura de corte, possuem grande relevância sobretudo no que diz respeito ao monitoramento do processo de corte, a garantia da qualidade dos trabalhos de usinagem face a conservação das propriedades mecânicas, e testes de novos revestimentos, resistentes ao calor, para ferramentas de corte, (Brandão e Coelho, 2009).

## 1.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver e construir um calorímetro para o processo de furação que permita determinar a quantidade de calor gerado durante a furação e relacionar com a energia envolvida em todo o processo.

## 1.2 Objetivos específicos

- Mensurar o esforço de corte durante a furação;
- Monitorar a quantidade de calor gerada no momento do corte;
- Estabelecer a relação entre o calor gerado e a energia do sistema através de recursos matemáticos.

## 1.3 Composição do trabalho

Este trabalho está apresentado em uma estrutura que compreende oito capítulos, em que o texto introdutório é visto no capítulo I.

No Capítulo II está contida a revisão bibliográfica sobre o tema proposto, onde são abordados os seguintes assuntos: a importância do processo de furação, força e torque em brocas helicoidais, o desgaste nas ferramentas de usinagem, a formação do cavaco, a distribuição de calor no momento da usinagem, métodos de quantificação da temperatura de usinagem, ferro fundido cinzento.

No Capítulo III está apresentado os materiais utilizados na construção do calorímetro e no procedimento experimental. São abordados os seguintes temas: o policloreto de polivinila, technyl, água deionizada, sistema de aquisição de temperatura.

No Capítulo IV está contido fundamentos básicos de calorimetria, foram abordados conceitos de energia, trabalho, potência, calor, medição de calor, equação fundamental da calorimetria e o calorímetro de Lavoisier e Laplace.

No Capítulo V é apresentado o procedimento experimental, em que se aborda de forma detalhada a metodologia experimental.

No Capítulo VI estão presentes os resultados preliminares utilizando os calorímetros construídos.

No Capítulo VII são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo VIII estão as referências bibliográficas que subsidiaram o presente trabalho.

# CAPÍTULO II

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A importância do processo de furação

O processo de furação é considerado um dos mais importantes mecanismos industriais de fabricação, pois a maioria das peças fabricadas nas indústrias metalúrgicas possuem ao menos um furo e apenas uma pequena parte dessas peças já vem com um furo do processo de obtenção da peça bruta (Diniz, Marcondes e Coppini 2006).

O furo em qualquer componente mecânico, possui sua importância vinculada a função e aplicação, podendo este furo ter a finalidade de guiar um componente específico, acoplar um parafuso ou uma outra peça, função de lubrificação, dentre outras.

No processo de furação, o estudo do calor gerado na interface entre a ferramenta e a peça se torna importante quando deseja-se aumentar a vida útil da ferramenta, diminuir o tempo de trabalho ou mesmo, quando é preciso usinar peças com diferentes composições químicas, que interferem na dureza, principalmente. As grandezas físicas que participam dessa dinâmica e que estão diretamente relacionadas com a geração de calor na interface entre o cavaco e a ferramenta, são:

- $V_c$  - corresponde a Velocidade de corte;
- $V_e$  - corresponde a Velocidade efetiva de corte;

- $V_f$  - corresponde a Velocidade de avanço.

A seguir são apresentados alguns tópicos relacionados ao processo de furação ou ao processo de usinagem em geral, como forças de usinagem, desgaste e temperatura por exemplo.

## 2.2 Força e torque em brocas helicoidais

Durante os esforços no momento do corte, a força de avanço e o momento torsor são os principais empenhos encontrados nas brocas helicoidais. São complementados por outros fatores, tais como a resistência devido ao corte do material nas duas arestas principais de corte, resistência devido ao corte e esmagamento do material na aresta transversal, bem como o atrito nas guias e o atrito entre a superfície de saída da broca e o cavaco (Bordin, Nabinger e Zeilmann 2011).

Para Souza (2011), durante o esforço de corte, a broca desempenha um movimento contínuo em que atuam as duas arestas principais de corte onde cada aresta desenvolve metade do movimento de avanço, e essa ação gera a força no interior do furo. O movimento efetivo de corte faz com que o ângulo efetivo de corte seja menor que o ângulo de folga. Para que o flanco da broca helicoidal não esmague o material da peça, é preciso que o ângulo efetivo de corte seja o maior possível. Por outro lado, quanto maior for o ângulo efetivo de corte, menor será a resistência da cunha e maiores serão as vibrações.

Segundo Bagci e Ozcelik (2007), o diâmetro usinado por uma broca não guiada pode sofrer alteração de tamanho, tornando-se maior, em decorrência de desvios da trajetória de corte. Esse fenômeno acontece quando o ângulo de ponta da broca é muito grande. Em contrapartida quando se trabalha com uma broca que possui um ângulo de ponta muito pequeno o direcionamento da broca no centro geométrico será mais preciso, contudo haverá um aumento significativo da força passiva e, conseqüentemente, do atrito.

A aquisição da Força de Corte acontece de acordo com uma sequência de obtenção e conversão de sinais elétricos, fornecidos pelo dinamômetro, através do acumulador de sinais que por sua vez os envia até a placa de aquisição que fará a conversão do sinal elétrico em digital para a possível leitura no computador.

O Dinamômetro é um dispositivo constituído de materiais piezelétricos, usados para monitorar a aplicação de força em determinadas situações, com o intuito de quantificar e identificar as forças atuantes em um processo qualquer.

A piezeletricidade representa a capacidade de alguns materiais em transformar energia mecânica em sinal elétrico e também de responder mecanicamente a um determinado estímulo elétrico (Araujo, 1999).

O material piezelétrico mais utilizado nesses dispositivos de aquisição de força é o quartzo, em função a sua alta rigidez mecânica, estabilidade química e elétrica (Cunha, José e Vasconcelos 2008).

Para a obtenção das forças envolvidas no processo de furação de ferro fundido cinzento, foi utilizado o Dinamômetro por telemetria Kistler modelo 9123 C1211, juntamente com um condicionador de sinais multicanal Kistler modelo 5223131. O dinamômetro foi acoplado no mandril da máquina Discovery CNC 760, conforme a figura 2.1, onde fez a leitura dos sinais de força e torque para posterior análise.



Figura 2.1 – Dinamômetro kistler fixado no mandril da máquina CNC

### 2.3 O desgaste nas ferramentas de usinagem

De acordo com a definição de König e Klocke (1997), o desgaste nas ferramentas de corte pode ser entendido como uma perda gradual do material do corpo através da ação física de contato da peça com o próprio cavaco em um meio seco ou úmido, em que outros fenômenos poderão exercer influência no desgaste da ferramenta.

Dentre os principais causadores de desgaste na ferramenta de corte, destacam-se a abrasão mecânica, a adesão, a difusão e a formação de óxidos. Estes agentes estão diretamente relacionados com a temperatura de usinagem, conforme ilustra a figura 2.2.

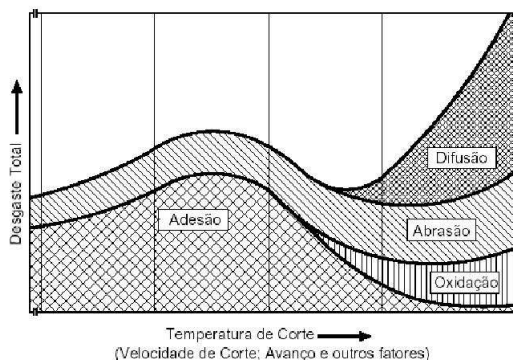


Figura 2.2 – Principais mecanismos de desgaste no processo de usinagem, König e Klocke (1997) .

Uma das principais causas de desgaste da ferramenta, seja desgaste frontal ou mesmo de cratera, é a abrasão mecânica. Esse desgaste pode ser amplificado devido a presença de partículas duras no material da peça bem como a influência da temperatura gerada no momento da usinagem, uma vez que a temperatura de corte pode diminuir a dureza da ferramenta, de tal maneira que quanto maior for a resistência da ferramenta em relação a altas temperaturas, maior será a resistência ao material abrasivo. Pode-se identificar também o desgaste abrasivo em regiões adjacentes da ferramenta, causado por partículas duras arrancadas de outras regiões da ferramenta, seja por aderência ou por abrasão, e arrastada pelo movimento da peça (Diniz et al, 2006).

O desgaste por adesão ocorre principalmente em condições que permitam a formação de aresta postiça de corte, ou seja em baixas velocidades e temperaturas de corte. Alguns fatores no momento do corte podem favorecer o prendimento do cavaco na superfície da ferramenta, tais como: o corte interrompido, a profundidade de usinagem irregular ou mesmo a falta de rigidez da máquina que facilitará o fluxo irregular do cavaco. Esse material aderido na superfície de contato da ferramenta devido a solicitação intermitente exigida pelo trabalho, sofrerá fadiga levando consigo parte do material da ferramenta (Trent e Wright, 2000).

A difusão representa um tipo de desgaste que envolve a transferência de átomos de

um material para outro. Esse mecanismo causa variações nas propriedades da camada superficial da ferramenta, ou seja essas reações produzem compostos químicos menos resistentes à abrasão. Para que ocorra a difusão é preciso um combinado de três fatores, sendo esses a temperatura elevada na superfície de contato, a afinidade química entre os materiais envolvidos e tempo de contato (König e Klocke, 1997).

Para Diniz et al, (2006), o desgaste de cratera ocorre devido a ação da difusão na superfície de saída da ferramenta, local onde se tem a ação de temperatura elevada, face a alta velocidade de corte e a zona de aderência, e também um tempo ideal de contato entre a ferramenta e o cavaco.

O fenômeno de desgaste por oxidação ocorre sobretudo nos metais em altas temperaturas quando em contato com a água e o oxigênio. O desgaste ocorrerá na zona de escorregamento e formará pequenas bolhas de óxido. Nota-se a formação de óxido de tungstênio, cobalto e ferro no metal duro, que levam ao lascamento da aresta de corte. Uma forma de minimizar a oxidação do metal duro é a adição de carbonetos de titânio, tântalo e vanádio (Trent e Wright 2000).

Para D'errico (1998), existe uma necessidade contínua de se aumentar a velocidade de corte em processos de usinagem e esta necessidade impulsiona novas pesquisas no sentido de apresentar materiais resistentes a altas temperaturas. No entendimento de Costa (2004), o aumento da temperatura promove um mecanismo de desgaste de origem térmica na ferramenta.

Este mecanismo de desgaste devido ao aumento da temperatura está relacionado com a energia gerada no momento da furação, que por sua vez é transformada em calor nas proximidades da ponta da ferramenta, e muito dos problemas técnicos e econômicos estão ligados a esse detalhe, já que os custos do processo de usinagem estão diretamente relacionados a taxa de remoção de material e ao passo em que aumenta a taxa de remoção de material é possível reduzir os custos, contudo aumenta-se também a temperatura na interface entre a ferramenta e a peça (Trent e Wright 2000).



## 2.4 A formação do cavaco

A formação do cavaco acontece em altíssimas velocidades de deformação, seguida pela ruptura do material da peça. Todo esse processo é dividido em quatro etapas; recalque inicial; deformação e ruptura; deslizamento das lamelas e saída do cavaco, (Machado, Silva e Coelho, 2009).

Na usinagem de ferro fundido, uma característica importante é a produção de cavacos do tipo descontínuo (Figura 2.3 ), que contribui para causar vibrações na ferramenta e consequentemente provocar pequenos lascamentos na ferramenta, caso essa seja constituída de material frágil. Esses cavacos quebradiços também apresentam uma outra característica muito interessante, ou seja, a geração de calor na interface entre a peça e a ferramenta é menor quando se comparada com a furação de materiais que produzem cavacos contínuos, já que os cavacos descontínuos escoam com menor atrito nos canais da broca, e assim se torna possível trabalhar com ferramentas que possuem menor resistência a temperaturas mais elevadas, como é o caso das ferramentas de aço rápido, Schröeter e Wingertner (2001).



Figura 2.3 – Cavaco de ferro fundido cinzento.

## 2.5 A distribuição de calor no momento da usinagem

A Figura 2.4 (Souza, 2011) apresenta as quantidades, em porcentagem, de calor absorvidas pela peça, pelo cavaco e pela ferramenta. Observa-se que a parcela maior de calor é transportada pelo cavaco. O calor nas diversas regiões de transformação de energia é dissipado por condução, irradiação e convecção para o ambiente, consequentemente os campos de temperatura se modificam no intuito de equilibrar a quantidade de calor gerada e a transmitida para fora.

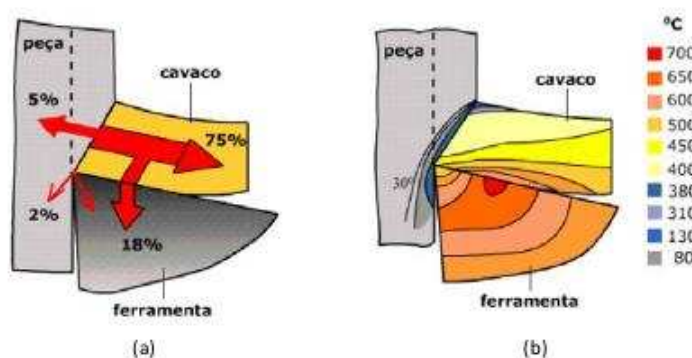


Figura 2.4 – Interface cavaco/ferramenta/peça durante a usinagem: (a) geração de calor; (b) distribuição de temperatura (Souza, 2011)

No entendimento de Machado, Silva e Coelho (2009), a energia consumida no corte essencialmente converte-se em calor. Desse calor, aproximadamente de 80% a 90% é transferido ao cavaco, de 5% a 10% é transferido à peça e aproximadamente de 5% a 10% transferido à ferramenta.

O presente trabalho sugere um método experimental utilizando-se de termopares do tipo k inserido no calorímetro para que se possa fazer a leitura da temperatura no momento da furação. Posteriormente almeja-se a continuidade do projeto em parceria com o Laboratório de Ensino e Pesquisa LTCM, Laboratório de Transferência de Calor e Massa, utilizando-se de método de simulação por elementos finitos (MEF) no sentido de complementar o experimento.

## 2.6 Métodos de quantificação da temperatura de usinagem

Loewen e Shaw (1954), desenvolveram um modelo de quantificação da temperatura de corte no momento da usinagem, e chegaram a conclusão de que a temperatura de corte está condicionada a velocidade de corte ( $V_c$ ) e a velocidade de avanço ( $V_f$ ), visto na equação 2.1.

$$\theta T = V^{0,5} \times t^{0,3} \quad (2.1)$$

Em que:

- $\theta T$  representa a variação da temperatura de corte;
- $V$  representa a velocidade de corte;
- $t$  representa o avanço, ou a taxa de cavaco não deformado.

Usando um método analítico para estimar a temperatura de corte através da técnica de elementos finitos, Loewen e Shaw (1954), chegaram aos coeficientes 0,5 para velocidade de corte e 0,3 para temperatura.

Outros trabalhos foram realizados buscando precisar essa distribuição de calor no momento da usinagem, sobretudo o aquecimento gerado no momento da formação do cavaco, Chao e Trigger (1951); Tay e Stevenson (1974); Boothroyd (1975). De acordo com a literatura os métodos usados para analisar a temperatura de corte em usinagem que se destacam são: os métodos experimentais, com termopares inseridos e método de radiação térmica; métodos analíticos em que se trabalha com equações diferenciais para gerenciar o modelo de distribuição de calor; métodos numéricos em que se usam técnicas de solução numérica de equações diferenciais, (Nascimento, Luchesi e Coelho, 2010).

A distribuição de temperatura na peça bem como no cavaco em formação é mostrada de acordo com a Figura 2.5. Segundo o trabalho de Bagheri e Mottaghizadeh (2012), em que se utiliza de uma técnica com termopares inseridos na ferramenta de corte e câmera de infravermelho, pode-se afirmar que o ponto X faz um deslocamento em direção a zona primária de deformação, aumentando sua temperatura, até que deixa esta zona já na forma de cavaco. O ponto Y passa por ambas zonas de deformação, é aquecido durante o processo até deixar a zona secundária de deformação. Ao passar por essa zona de deformação, uma parte do calor gerado é transmitido ao cavaco por condução, e ao final do processo, todo o cavaco atinge uma temperatura homogênea.

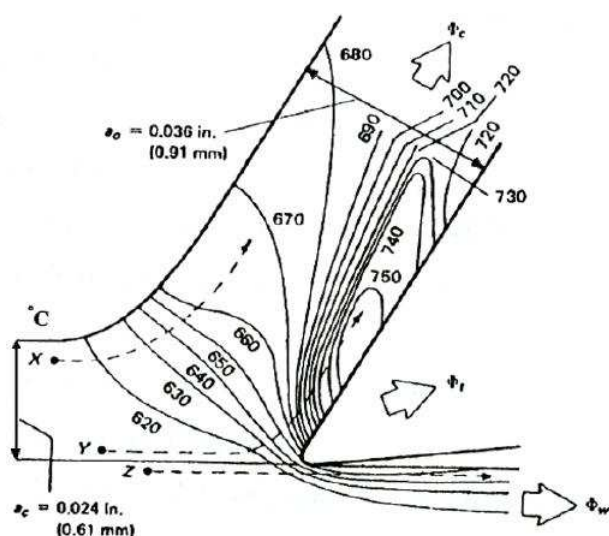


Figura 2.5 – Distribuição de calor durante a formação do cavaco, Bagheri e Mottaghizadeh (2012)

Essa distribuição da temperatura dependerá do calor, da condutividade térmica e da capacidade de calor específico da ferramenta bem como da peça de trabalho, e, também a quantidade de perda de calor baseada sobre a radiação e convecção. Na interface entre o cavaco e a ferramenta é que a temperatura irá atingir seu valor máximo. Esse calor, após ser distribuído entre o cavaco, a peça, a ferramenta e o ambiente irá influenciar o processo de corte de maneira a tornar a ação mais fácil, ou seja, tornando o material a ser usinado mais dúctil. Contudo, esse calor poderá também fluir para a ponta da ferramenta, agindo de forma negativa, diminuindo a vida provocando desgaste térmico, Muller-Hummed e Lahr's (1996), Fata e Razfar (2007), Abhang e Hameedullah (2010).

## 2.7 Ferro fundido cinzento

O ferro fundido se divide em diferentes classes de acordo com os seguintes fatores:

- variação da quantidade de carbono total, normalmente numa faixa de 1,5% a 4,5%;
- quantidade em que as duas formas de carbono aparecem no ferro fundido, grafite (forma de carbono livre) e cementita ou  $Fe_3C$  (carbono combinado com ferro);
- teor de silício, enxofre, fósforo e manganês.

A usinabilidade do ferro fundido sofrerá influência de acordo com a variação na estrutura, apresentando material de fácil usinagem, ferro fundido cinzento, até o de difícil usinagem, ferro fundido branco. A dureza e a resistência do ferro fundido podem ser aumentadas através da adição de níquel. Contudo, o níquel proporciona um efeito grafitizante que gera uma estrutura de usinabilidade mais fácil. Por outro lado a adição de cromo promove a formação de carbeto duros e quebradiços, criando uma estrutura resistente ao desgaste mas que piora a usinabilidade. Se fizer a adição de níquel e cromo simultaneamente pode-se criar uma estrutura mais dura e mais resistente, em termos de usinabilidade, porém a adição de um componente neutraliza o efeito do outro (Ferraresi, 1969).

O efeito da adição de silício na estrutura de ferro fundido é a redução de carvão de ferro duro e o aumento da quantidade de grafite que é encontrada na forma de lâmina. Assim, o ferro fundido cinzento pode conter uma taxa de no máximo 3% de silício, o que resulta uma estrutura de relativamente boa usinagem, quando se comparada às demais estruturas de ferro fundido.

O ferro fundido branco possui uma pequena taxa de silício, alta taxa de carvão de ferro e pouco grafite livre, perfazendo assim uma estrutura muito dura, resistente, quebradiça e de difícil usinagem ou baixa usinabilidade. Apresenta dureza de aproximadamente 300 Brinell, justificando a dificuldade de usinagem.

O ferro fundido branco, quando submetido ao tratamento térmico de recozimento, se transforma em ferro fundido maleável. Após esse tratamento acontece uma redução na quantidade de grafite laminar, e uma quantidade considerável de carvão de ferro duro na forma de carvão de ferro dútil, mole e grafite esferoidal. Essa estrutura resultante possui ductilidade e tenacidade medianas, contudo apresenta boa usinabilidade.

O ferro fundido nodular, também conhecido por ferro fundido dútil é preparado através da adição de uma pequena quantidade de magnésio ou de cério no ferro fundido de alto carbono em estado líquido. Após o resfriamento dessa solução tem-se uma estrutura com carvão de ferro e grafite esferoidal (nodular), uma combinação muito resistente e com comportamento elástico semelhante ao aço fundido. O tratamento térmico revenimento e a normalização o torna um material de resistência elevada, porém quebradiço. Sua ductilidade é aumentada através do recozimento. Apesar de ser mais resistente em relação ao ferro fundido cinzento, o ferro fundido

nodular possui usinabilidade tão boa quanto (Ferraresi, 1969).

O ferro fundido vermicular contém a grafita em forma de "vermes" inseridas numa matriz perlítica ou ferrítico/perlítica. A perlítica apresenta em sua composição lamelas alternadas de ferrita e cementita,  $Fe_3C$ . A participação dessas lamelas deixam a matriz reforçada, tornando-a mais dura e resistente (Andrade, 2005).

Os ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular se diferenciam sobretudo pela forma da grafita. No caso do ferro fundido cinzento, a grafita se apresenta sob a forma de lamelas numa distribuição randômica. A figura 2.6 (itens a, b e c) indica que no ferro fundido nodular a grafita se apresenta de forma esférica e individual, e, no ferro fundido vermicular de forma alongada e de extremidades arredondadas. Quando observadas no microscópio eletrônico, observa-se a forma de vermes da grafita no ferro fundido vermicular.

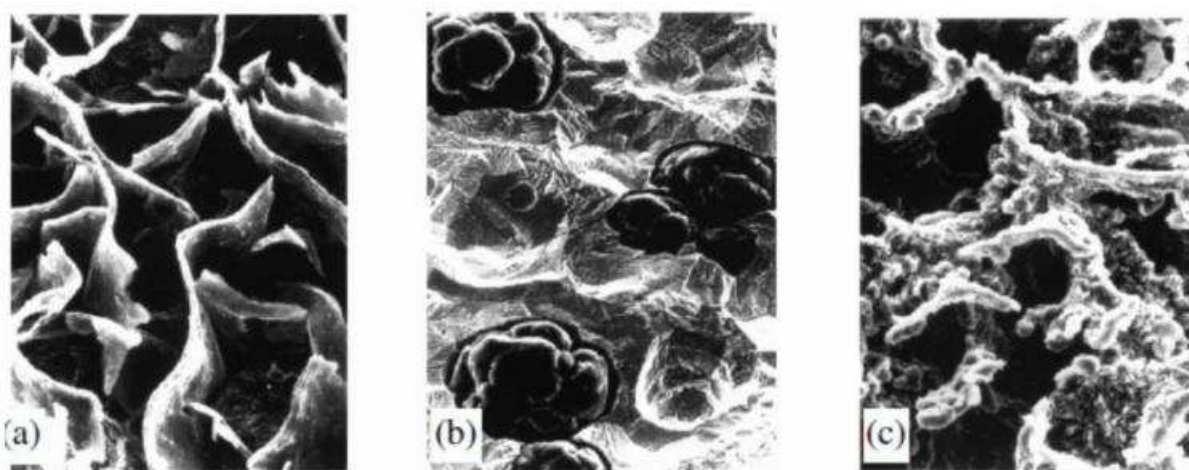


Figura 2.6 – a) grafita lamelar (fofo cinzento), b) grafita nodular (fofo nodular) e c) grafita vermicular (fofo vermicular) (Andrade, 2005)

Na tabela 2.1 observa-se as diferentes propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento, o nodular e o vermicular. Percebe-se, de um modo geral, que os valores das propriedades do fofo vermicular estão entre os valores do fofo cinzento e o nodular, o que também ocorre com a usinabilidade.

<i>Propriedades</i>	<i>Fe – cinzento</i>	<i>Fe – vermicular</i>	<i>Fe – nodular</i>
Resistência à tração [MPa]	250	450	750
Módulo de elasticidade [GPa]	105	145	160
Resistência à fadiga [MPa]	110	200	250
Condutividade térmica [ $W/m^2K$ ]	47	37	28

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas dos diferentes tipos de ferro fundido

## CAPÍTULO III

### MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DO CALORÍMETRO E NO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 O Policloreto de Polivinila - PVC

O policloreto de polivinila (também conhecido como cloreto de vinila ou policloreto de vinil; nome IUPAC policloroeteno) mais conhecido pela sigla PVC (da sua designação em inglês Polyvinyl chloride) é um plástico não 100% originário do petróleo. A figura 3.1 apresenta a fórmula estrutural do PVC.

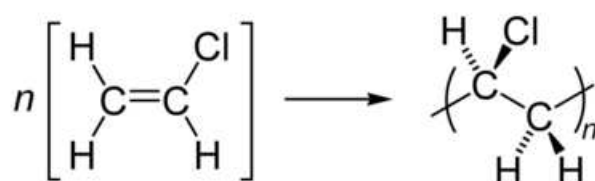


Figura 3.1 – Fórmula estrutural do PVC

A presença de cloro na cadeia do polímero torna o PVC um dos termoplásticos mais versáteis conhecidos. Em sua estrutura molecular tem-se uma ligação entre o carbono e o cloro de caráter instável que torna o PVC sensível a temperaturas superiores a 700°C (Rodolfo, Nunes e Ormanji, 2006), porém para o experimento em questão esse detalhe não se torna preocupante, visto que a estimativa de temperatura não ultrapassa 150°C.

Segue uma lista de características do PVC que o faz ser importante para esse trabalho:



- Leve ( $1,4 \text{ g/cm}^3$ ), facilita o manuseio e aplicação;
- resistente à ação de fungos, bactérias, insetos etc;
- resistente à maioria dos reagentes químicos;
- bom isolante térmico, elétrico e acústico;
- sólido e resistente a choques;
- impermeável a gases e líquidos;
- resistente às intempéries;
- não propaga chamas, é auto-extinguível;
- reciclável;
- fabricado com baixo consumo de energia.

### 3.2 Technyl

O Technyl é um tipo de polímero obtido através da copoliamida modificada, fabricada com uma resina exclusiva, o que o torna um produto registrado da Rhodia. Durante o processo de fabricação, o Technyl passa por um tratamento térmico que lhe confere uma estrutura cristalina uniforme, livre de tensões internas, dando condições de substituir diferentes materiais como o bronze, o latão, o alumínio, o duralumínio, o ferro fundido e o aço.

Trata-se de um produto com boas qualidades mecânicas, elétricas, químicas e físicas.

O Technyl possui características semelhantes ao PVC, que justificam sua participação no trabalho:

- Baixo peso específico, (densidade  $1,14 \text{ g/cm}^3$ );
- alta resistência ao desgaste e a abrasão;
- ponto de fusão elevado, aproximadamente  $245^\circ\text{C}$ ;
- bom isolante térmico, elétrico e acústico;

- boa resistência a agentes químicos;
- impermeável a gases e líquidos;
- resistente às intempéries;
- não propaga chamas, é auto-extinguível;
- boa tenacidade;
- facilidade de usinagem.

A figura 3.2 mostra a fórmula estrutural do Technyl.

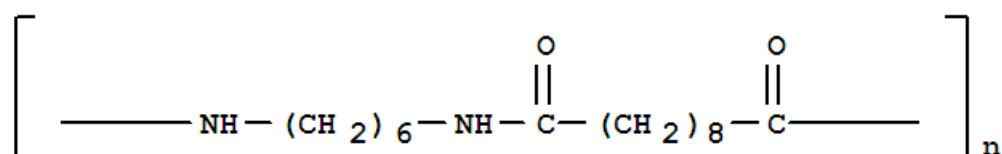


Figura 3.2 – Fórmula estrutural do Technyl

### 3.3 Água deionizada

Com o avanço da ciência e da tecnologia, é possível listar uma gama de processos de purificação de água, sendo eles a destilação, osmose reversa, filtração, adsorção em carvão ativado, ultrafiltração, oxidação com radiação ultravioleta, adsorção orgânica, a deionização, que é nosso objeto de estudo e etc. Esses processos podem ser combinados ou aplicados isoladamente no tratamento da água. O que vai definir qual processo deverá ser usado é a qualidade da água bruta e o fim para qual se destina (Eymard, 2001).

O processo de deionização é um tratamento feito através de um mecanismo de troca iônica, onde se utilizam resinas catiônicas e aniônicas, permitindo assim a adsorção das impurezas presentes na água.

As resinas catiônicas promovem a troca de seus íons de hidrogênio ( $H^+$ ) por estruturas catiônicas presentes no meio, que podem ser cálcio, magnésio, ferro, alumínio, manganês, cobre, zinco, cromo, níquel e outros metais e cátions diversos.

As resinas aniônicas por sua vez trocam seus íons hidroxila ( $OH^-$ ) pelos contaminantes aniônicos: sulfato, sulfito, sulfeto, clorato, clorito, cloreto, nitrato, nitrito, fosfato, sílica e outros (Eymard, 2001).

Essas resinas de troca iônica são compostos constituídos de polímeros orgânicos, geralmente sulfonados e derivados do estireno ( $C_6H_5CHCH_2$ ) e do divinilbenzeno ( $C_{10}H_{10}$ ). Possuem formas de pequenas partículas, geralmente esférica conforme a figura 3.3. Os principais fabricantes são a Bayer, Rhom e Hass, Dow Química e Resintech dentre outros.



Figura 3.3 – Imagem ampliada das resinas de troca iônica (Eymard, 2001)

O processo de purificação da água através da deionização acontece com a passagem da água sobre um leito com a resina, em que os íons  $H^+$  e  $OH^-$  presentes na resina são substituídos por cátions e ânions presentes na água, até que a resina fique saturada, ou seja, não tenha mais íons a serem substituídos. Neste momento a resina tem que passar por um tratamento químico para que possa resgatar sua capacidade de troca iônica (Eymard, 2001).

### 3.4 Sistema de aquisição de temperatura

#### 3.4.1 Efeito Seebeck

Em 1821, Thomas Johann Seebeck propôs uma teoria de que a diferença de temperatura gera uma determinada tensão (potencial elétrico) que era capaz de conduzir corrente elétrica em um circuito fechado.

O físico Seebeck partiu de um experimento que envolvia metais diferentes com junções em temperaturas também diferentes, onde observou que o imã de uma bússola teve seu curso influenciado. Num primeiro momento o cientista acreditou que a diferença de temperatura ge-

rava uma força magnética, no entanto logo percebeu que a diferença de temperatura propiciava a indução de uma corrente elétrica, seguindo a Lei de Ampère, capaz de desviar o ímã. Hoje esse efeito é conhecido como efeito Peltier-Seebeck.

Entre as duas junções é produzida uma tensão que será proporcional a diferença de temperatura entre elas. Essa tensão é independente da distribuição de temperatura ao longo dos metais entre as junções (Alexandre, 1997). Esse efeito representa a base física para explicar o funcionamento do termopar, usado para proceder a aquisição de temperatura.

#### 3.4.2 *Lei do circuito homogêneo*

O termopar dentro de um circuito homogêneo gera uma força eletromotriz, F.E.M., que depende exclusivamente da composição química dos metais e das temperaturas entre as junções. Dessa forma, a tensão gerada não terá dependência do gradiente de temperatura ao longo dos fios, assim a F.E.M. resultante não é alterada pelas temperaturas intermediárias (Taylor, 2009).

#### 3.4.3 *Lei dos metais intermediários*

De acordo com a lei dos metais intermediários, a F.E.M., gerada num par termoelétrico, não se altera quando é inserido um metal qualquer, diferente dos que compõe o sistema, desde que as junções permaneçam com as mesmas temperaturas. Assim o instrumento de medição pode ser acoplado em qualquer ponto do circuito sem que se tenha prejuízos na obtenção F.E.M. original (Potter, 1996).

#### 3.4.4 *Lei das temperaturas intermediárias*

Segundo a lei das temperaturas intermediárias, um circuito termoelétrico com junções em temperaturas  $t_1$  e  $t_3$  respectivamente, gera uma F.E.M. que corresponde à soma algébrica da F.E.M. gerada com junções em temperaturas  $t_1$  e  $t_2$ , juntamente com a F.E.M. do mesmo circuito com junções em temperaturas  $t_2$  e  $t_3$ .

Como consequência da lei das temperaturas intermediárias é possível utilizar os cabos compensados, que possuindo as mesmas características do termopar, pode ser adaptado ao sistema sem alterar o sinal produzido.

#### 3.4.5 *Conversão de tensão em temperatura*

No primeiro momento, o instrumento utilizado para indicar a temperatura deverá linearizar o sinal apresentado pelo sensor, uma vez que a relação F.E.M. x temperatura do termopar não é linear. Os instrumentos digitais trazem em sua memória a equação matemática que descreve a curva do sensor. Trata-se de um polinômio, que poderá atingir uma ordem de até 9º grau, dependendo da precisão requerida.

Cada fabricante de termopar fornece uma tabela que serve para facilitar a conversão do sinal de tensão lido em um milivoltímetro.

#### 3.4.6 *Tipos de termopares*

Para atender as diversas faixas de medição de temperatura, foram desenvolvidos diferentes tipos de pares termoelétricos com composições de ligas puras de metais ou de composição homogênea de outros metais. Para cada uma dessas ligas adotou-se uma denominação específica, independentemente do fabricante.

As principais características apresentadas pelos termopares são:

- a sensibilidade, também conhecida como potência termoelétrica ( $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ );
- a homogeneidade dos fios;
- a resistência à corrosão;
- linearidade entre temperatura e tensão.

A classificação dos termopares é feita de acordo com as características construtivas e o seu tipo. O tipo está relacionado ao material que constitui o termopar.

Em relação às características construtivas temos:

- Termopar convencional;
- Termopar de isolamento mineral.

**Termopar convencional** Possuem em sua constituição fios de diferentes materiais, instalados sob uma proteção tubular, necessitando de isoladores, miçangas, conforme ilustra a figura 3.4.

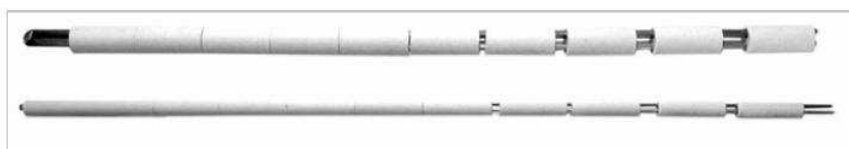


Figura 3.4 – modelo de termopar convencional

**Termopar de isolamento mineral** Esses termopares foram desenvolvidos para aplicações específicas, em que os condutores não possuem contato com o ambiente externo, conforme mostra a figura 3.5 e, dessa maneira, tem aumentadas sua resistência mecânica, sua estabilidade e também a durabilidade.

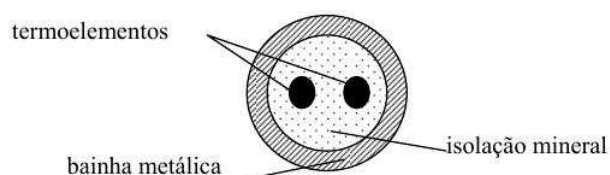


Figura 3.5 – modelo de termopar de isolamento mineral

Os termopares recebem uma denominação específica de acordo com a composição dos materiais metálicos que o formam. A polaridade é diferente para cada termoelemento, sendo indispensável a observação desse detalhe no momento de montar o dispositivo.

Os tipos de termopares utilizados industrialmente mais comuns são:

- Básico - termopares de uso predominantemente industrial. Possuem um custo relativamente pequeno. Por outro lado a margem de erro é alta;

- Nobres - são termopares produzidos com ligas de platina. Possuem o custo elevado e com alta precisão. Em contrapartida possuem baixa potência termoelétrica (sensibilidade);
- Novos - termopares projetados e fabricados para uso específico em que os demais termopares não atendem. Geralmente são produzidos com Tungstênio, Rhênio, Irídio e etc.

#### 3.4.7 *CrITÉRIOS para a seleção de termopares*

Para que se possa adquirir uma boa precisão bem como estabilidade e durabilidade ao fazer uso de termopares, é preciso ficar atento quanto as características, listadas a seguir, que deverão ser consideradas (Stein, 1992):

- a faixa de temperatura em que vai ser trabalhado, que determinará o tipo de termopar a ser utilizado, ou as diferentes possibilidades de escolha;
- observar a atividade a ser desenvolvida para escolher o termopar que possa apresentar uma melhor exatidão;
- outro ponto importante a ser observado é o custo, que poderá variar de acordo com o tipo e a precisão do termopar;
- deve-se considerar também a repetitividade e a estabilidade, itens que promoverão uma vida maior do sensor e também maior confiabilidade;
- ao utilizar termopares de pequena potência elétrica, deve-se utilizar um instrumento de alta sensibilidade;
- observar as condições do processo/equipamento, ou seja, o ambiente somado à faixa de temperatura de trabalho são essenciais na seleção do tipo de termopar bem como dos acessórios a serem utilizados.

#### 3.4.8 *Aquisição do sinal de temperatura*

No processamento dos sinais elétricos, o ruído é entendido como um sinal indesejado, falso, um distúrbio no sinal original que altera o resultado original, oferecendo informações diferentes das esperadas, contribuindo para a imprecisão das medidas, tornando o sistema instável e

com menor confiabilidade (National Instruments, 1993).

Os ruídos na aquisição dos sinais elétricos são divididos em:

- **Eletrostáticos:** acontece em decorrência da existência de campos elétricos instalados nas proximidades do sistema de medição, oriundos de linhas de força próximas ao sensor. Para evitar esse tipo de ruído, usa-se uma blindagem magnética, aterramento do cabo e um cuidado com a distância com as linhas de força;
- **De modo comum:** esse tipo de ruído aparece quando o aterramento é ineficiente;
- **Ruídos magnéticos:** a circulação de corrente elétrica nos circuitos gera campos magnéticos que por sua vez produzem ruídos. Para atenuar esse efeito recomenda-se a torção dos fios de extensão para cancelar o efeito da indução causada. Para que se possa obter uma melhor proteção, os fios de extensão ou compensação deverão ser torcidos e blindados (Taylor, 2009).



## **CAPÍTULO IV**

### **FUNDAMENTOS BÁSICOS DE CALORIMETRIA**

A termodinâmica é um ramo da física que tem como objeto de estudo as relações que envolvem o trabalho, calor e as transformações de energia em trabalho. De uma maneira superficial pode-se afirmar que o calor representa energia em trânsito e dinâmica está relacionada ao movimento (Atkins e Jones, 2006).

Em termos de termodinâmica, o universo é constituído por um sistema e sua vizinhança. Entende-se que um sistema trata-se de um ambiente preparado para estudar as interações envolvendo energia e matéria. A vizinhança é tudo aquilo que esteja externo ao sistema. A fronteira separa o sistema da vizinhança. Em se tratando de um sistema fechado acontece apenas a troca de energia. Por último, em um sistema isolado não pode haver nenhuma troca (Atkins e Jones, 2006).

#### **4.1 Energia**

A energia pode ser definida como um número associado a um sistema de um ou mais objetos. Quando um desses objetos sofre uma alteração, iniciando um movimento, devido a uma determinada força aplicada, o número que representa a energia do sistema sofrerá uma mudança, assim é possível afirmar que a energia representa a capacidade de um objeto em realizar trabalho. Após vários estudos viu-se a importância da correta manipulação dos números de energia, uma

vez que com este domínio se torna possível a construção de máquinas que podem facilitar a vida do seres vivos. Tudo isso porque o universo é regido por uma propriedade muito interessante, de que a energia pode ser transformada de uma forma para outra e transferida de um objeto para outro, desde que a quantidade total se conserve a mesma, respeitando a *lei de conservação da energia* (Halliday, Resnick e Walker, 2008).

## 4.2 Trabalho

O trabalho,  $\omega$ , pode ser entendido como a energia para um objeto ou de um objeto através de uma força que age sobre ele. Quando essa energia é direcionada ao objeto, entende-se que o trabalho é positivo e quando a energia é oriunda do objeto, o trabalho é considerado negativo (Halliday, Resnick e Walker, 2008).

Para que se possa mover um objeto de um ponto até outro, contra uma força que se opõe, é preciso um determinado trabalho, que por sua vez pode ser calculado conforme a seguinte equação:

$$\omega = F \cdot d \quad (4.1)$$

Em que:

- $\omega$  representa o trabalho,
- $F$  representa a força,
- $d$  representa a distância que pretende mover o objeto.

A unidade de trabalho e também de energia que se usa é o joule, J, sendo:

$$1J = 1kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \quad (4.2)$$

A capacidade interna, de uma sistema qualquer, de realizar trabalho, ou seja, sua quantidade total de energia, é conhecida por **energia interna**,  $U$  (Atkins e Jones, 2006).

Pode-se entender que o trabalho representa a transferência de energia para um determinado sistema. A energia interna de um sistema pode sofrer alteração de acordo com a realização de trabalho (Atkins e Jones, 2006):

$$U = \omega \quad (4.3)$$

### 4.3 Potência

De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2008), a potência média pode ser definida como a razão entre o trabalho,  $\omega$  e a variação do tempo,  $\delta T$ . Assim quando uma força,  $F$ , realiza um determinado trabalho,  $\omega$ , em um intervalo de tempo,  $\delta T$ , a **potência média** pode ser representada por:

$$P_{med} = \frac{\omega}{\delta T} \quad (4.4)$$

Utilizando a taxa de variação instantânea com a qual o trabalho é realizado podemos obter a **potência instantânea**:

$$P = \frac{d\omega}{dT} \quad (4.5)$$

A unidade de potência usada no SI é o joule por segundo. Após o uso comum e frequente essa unidade recebeu um nome especial em homenagem a James Watt, que teve fundamental importância no trabalho de aumento de potência das máquinas a vapor, sendo conhecida por **watt**,  $W$ . Nos países do Reino Unido é comum surgir a unidade de pé-libra por segundo, assim

como o cavalo de potência, *horsepower*, comumente usado também como unidade de potência.

Segue a relação entre essas unidades com o SI:

$$1\text{ watt} = 1W = 1J/s = 0,738\text{ ft} \cdot \text{lb}/s \quad (4.6)$$

$$1\text{ horsepower} = 1hp = 550\text{ ft} \cdot \text{lb}/s = 746W \quad (4.7)$$

Na prática, é muito usada a unidade de quilowatt-hora, uma expressão de trabalho em relação a potência e tempo. Essa relação pode ser apresentada da seguinte maneira:

$$1\text{ quilowatt} - \text{hora} = 1kW \cdot h = (10^3W) \cdot (3600s) = 3,60 \times 10^6 J = 3,60MJ \quad (4.8)$$

É possível expressar também a potência em termos da força e velocidade de uma partícula qualquer, ou seja, em uma situação em que essa partícula se move ao longo de um eixo  $x$ , sob a ação de uma força,  $\vec{F}$ , que faz um ângulo,  $\phi$ , na direção do movimento da partícula, a relação pode ser apresentada da seguinte maneira:

$$P = \frac{dW}{dT} = \frac{F \cos \phi dx}{dT} = F \cos \phi \left( \frac{dx}{dT} \right), P = Fv \cos \phi \quad (4.9)$$

Reescrevendo a equação como produto escalar  $\vec{F} \cdot \vec{v}$ , temos:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (4.10)$$

Essa equação representa a potência instantânea, e assim podemos afirmar que a potência é a taxa com a qual a força aplicada realiza trabalho (Halliday, Resnick e Walker, 2008).

Outra forma de calcular a potência de corte em processos de furação, é usando a equação que relaciona o Momento Torsor,  $M_t$ , e a Força de corte,  $F_c$ , da seguinte maneira:

$$M_t = F_c \frac{D}{2000} \quad (4.11)$$

Em que:

- $M_t$  representa o momento torsor, [N.mm]
- $F_c$  representa a força de corte, [N]
- $D$  representa o diâmetro da broca, [mm]

Seguindo esse raciocínio e relacionando o momento torsor com a rotação da máquina,  $\eta$ , teremos a potência de corte:

$$P_c = \frac{M_t \eta}{9,549} \quad (4.12)$$

Em que:

- $P_c$  representa a potência de corte, [W]
- $\eta$  representa a rotação da máquina, [rpm]

#### 4.4 Calor

Calor é uma expressão termodinâmica usada para indicar a quantidade de troca de energia de um sistema com sua vizinhança devido a uma diferença de temperatura. Dessa maneira, a energia é transferida na forma de calor de uma região cuja temperatura é mais alta para uma região de temperatura mais baixa.

Durante o processo de furação a ferramenta transfere uma determinada quantidade de energia para a peça que está sendo usinada. Essa energia transferida é percebida na forma de calor e pode ser representada por  $Q$ . Assim, quando existe uma alteração na energia interna de um sistema em consequência de transferência de energia na forma de calor, tem-se:

$$\delta U = {}_1Q_2 \quad (4.13)$$

Essa energia em forma de calor pode ser medida, em joules, J. Entretanto, é comum usar também a unidade de **caloria**, cal, para expressar a energia. De acordo com a definição, 1 cal corresponde à energia necessária para aumentar em 1°C a temperatura de 1 g de água (Atkins e Jones, 2006). Assim tem-se:

$$1cal = 4,184J \quad (4.14)$$

#### 4.5 Quantificação do calor

A energia transferida entre diferentes objetos em um sistema na forma de calor pode ser quantificada quando se conhece a **capacidade calorífica** do sistema,  $C$ , que representa a razão entre o calor fornecido e o aumento da temperatura que ele provocou.

$$C = \frac{Q}{\delta T} \quad (4.15)$$

Essa mesma equação pode ser modelada para calcular o calor fornecido ao sistema:

$$Q = C\delta T \quad (4.16)$$

A capacidade calorífica varia de acordo com o tamanho da amostra, ou seja, é uma propriedade extensiva, assim quanto maior for a amostra, maior será a quantidade de calor necessário para aumentar sua temperatura. Nesse sentido usa-se também o termo **capacidade calorífica específica**, ou simplesmente **calor específico**,  $c$ , que expressa a capacidade calorífica dividida pela massa da amostra:

$$c = \frac{C}{m} \quad (4.17)$$

O calor sensível é o calor que o corpo ganha ou perde, e que acarretará mudança em sua temperatura, contudo, não sofrerá alteração na forma de ligação de suas moléculas, ou seja, o estado físico permanecerá o mesmo, seja ele sólido, líquido ou gasoso ?.

#### 4.6 Equação fundamental da calorimetria

A expressão usada para definir a capacidade térmica,  $C = \frac{Q}{\delta T}$ , associada a expressão que define o calor específico,  $c = \frac{C}{m}$ , resulta a seguinte relação:

$$c = \frac{\frac{Q}{\theta T}}{m} = \frac{Q}{m \cdot \theta T}$$

Portanto:

$$Q = m \cdot c \cdot \theta T \quad (4.18)$$

Essa fórmula representa a equação fundamental da calorimetria, que por sua vez relaciona a quantidade de calor sensível,  $Q$ , trocada por um corpo de massa  $m$ , constituído por uma substância de calor específico  $c$ , quando acontece uma variação de sua temperatura,  $\theta T$  (Herskowitz, Penteado e Scolfaro, 1991).

#### 4.7 O calorímetro de Lavoisier e Laplace

Em 1780, Lavoisier em parceria com Laplace apresentou um trabalho muito importante que descreve seus experimentos sobre termodinâmica, conhecido por *Mémoire sur la chaleur* (Memórias sobre o calor).

No intuito de determinar os calores específicos das substâncias, os pesquisadores montaram um aparato experimental (os cientistas não utilizaram o termo calorímetro) o qual teve o princípio descrito por Lavoisier da seguinte forma: "consideremos um fenômeno ocorrendo dentro de uma esfera de gelo, a zero grau. O calor desenvolvido irá forçosamente derreter o gelo e não poderá se dissipar. Medindo-se a quantidade de água formada, ter-se-á uma medida do calor desprendido no processo". Assim era construído o primeiro calorímetro de gelo, Chagas (1992) e Alexandre et al (2010).

A figura 4.1 apresenta um esboço do primeiro calorímetro de gelo.



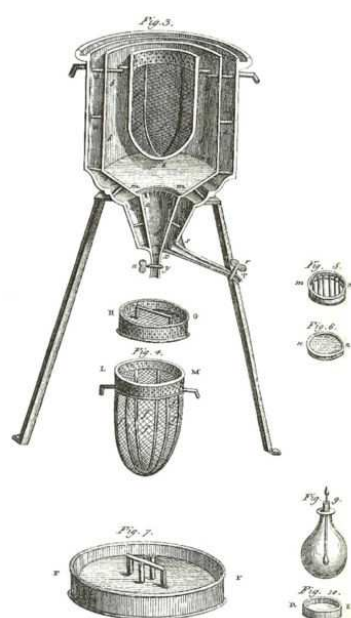


Figura 4.1 – Esboço do calorímetro de gelo de Lavoisier e Laplace, Chagas (1992) e Alexandre et al (2010)

# CAPÍTULO V

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 5.1 Metodologia

#### 5.1.1 Construção do primeiro calorímetro

Após a fase de treinamento nos equipamentos do laboratório, iniciou-se a etapa de projeto e construção do primeiro calorímetro, que por sua vez obedeceu a sequência que será apresentada.

A construção do calorímetro em questão partiu da usinagem de um tarugo de PVC de diâmetro,  $\phi = 80,0$  mm e altura,  $h = 30,0$  mm, conforme mostra a figura 5.1.

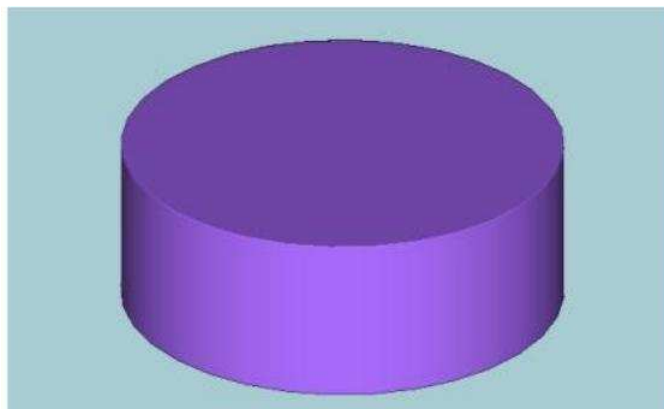


Figura 5.1 – Representação de um tarugo de PVC

Uma cavidade de diâmetro 60,0 mm e profundidade de 22,0 mm foi usinada no tarugo,

conforme ilustra a figura 5.2.

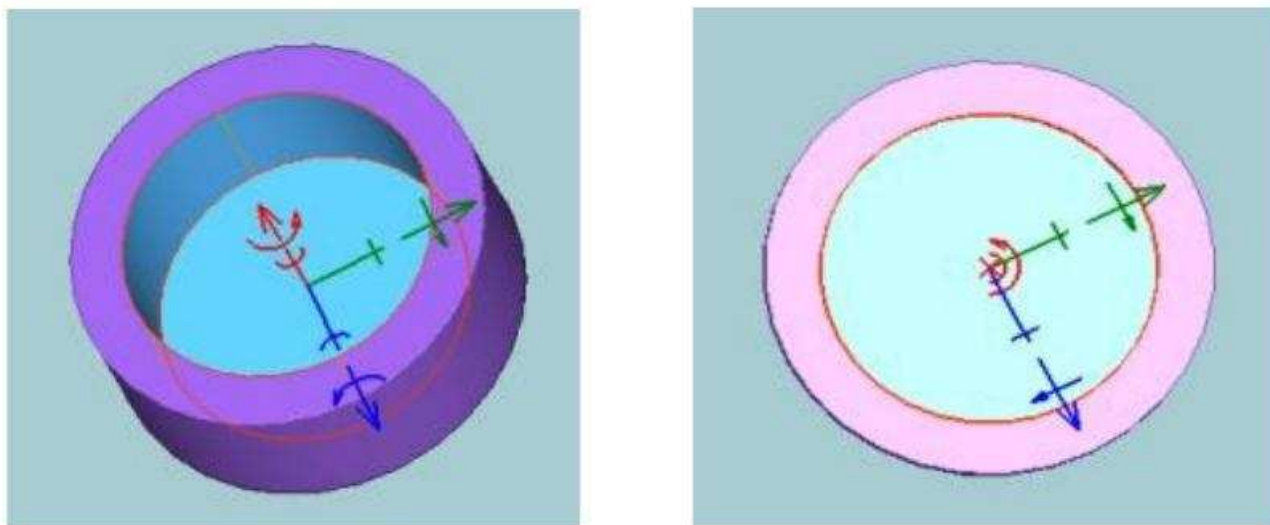


Figura 5.2 – Representação de um tarugo de PVC com fresa no centro, primeira imagem representa o desenho em 3D e a segunda imagem representa uma vista superior

Em seguida foi usinado um pequeno rebaixo, com dimensões  $\phi = 16,0$  mm e  $ap = 3,0$  mm, visto na figura 5.3. Este rebaixo possui a função de fixar um corpo de prova de ferro fundido cinzento para os ensaios experimentais.

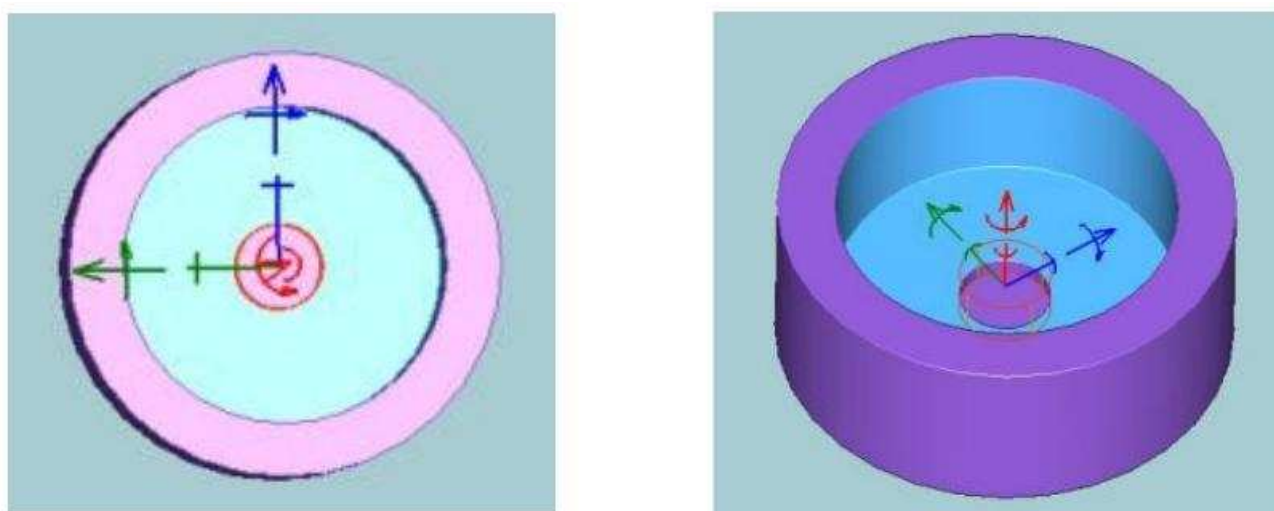


Figura 5.3 – Representação do tarugo de PVC com cavidade cilíndrica no centro para encaixe da peça de ferro fundido cinzento, primeira imagem, representação com vista superior, segunda imagem, vista 3D

Na próxima etapa o calorímetro, ainda em construção, sofreu dois furos em sua face

superior, com  $\phi = 5,0$  mm e  $ap = 10,0$  mm, conforme a figura 5.4. Esses furos são rosqueados, preparados para receber os parafusos que servirão para fixar a tampa do calorímetro.

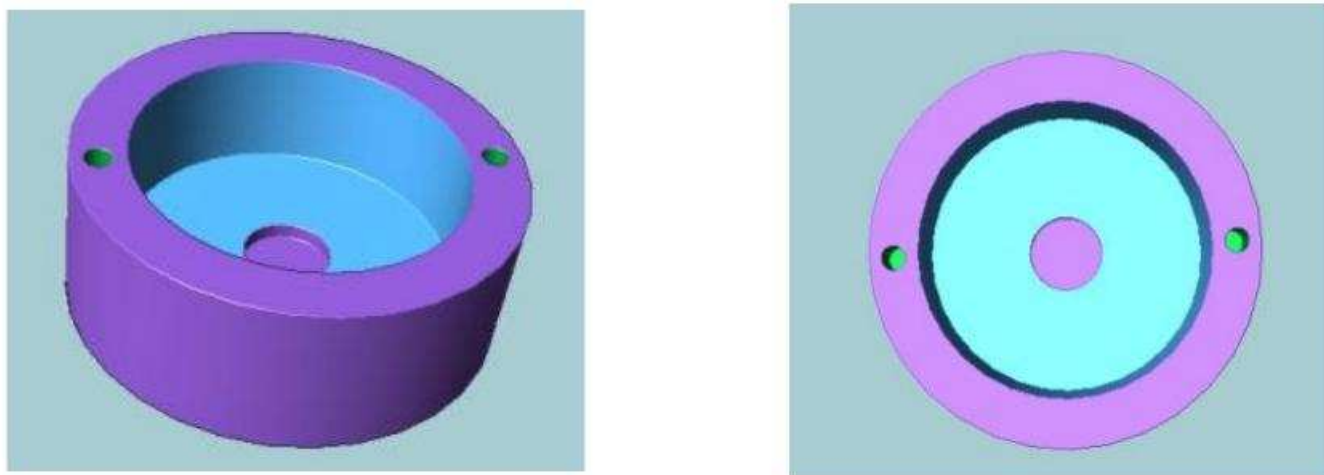


Figura 5.4 – Representação do tarugo de PVC com furos na face superior, primeira imagem, representação com vista 3D, segunda imagem, vista superior

Foram usinados também dois furos passantes na lateral do calorímetro, sendo um do lado oposto ao outro, conforme a figura 5.5. Esses furos, de  $\phi = 5,0$  mm, e distância de 5,0 mm da face superior, para possibilitarem a passagem dos termopares para a medição da temperatura da água durante a furação.

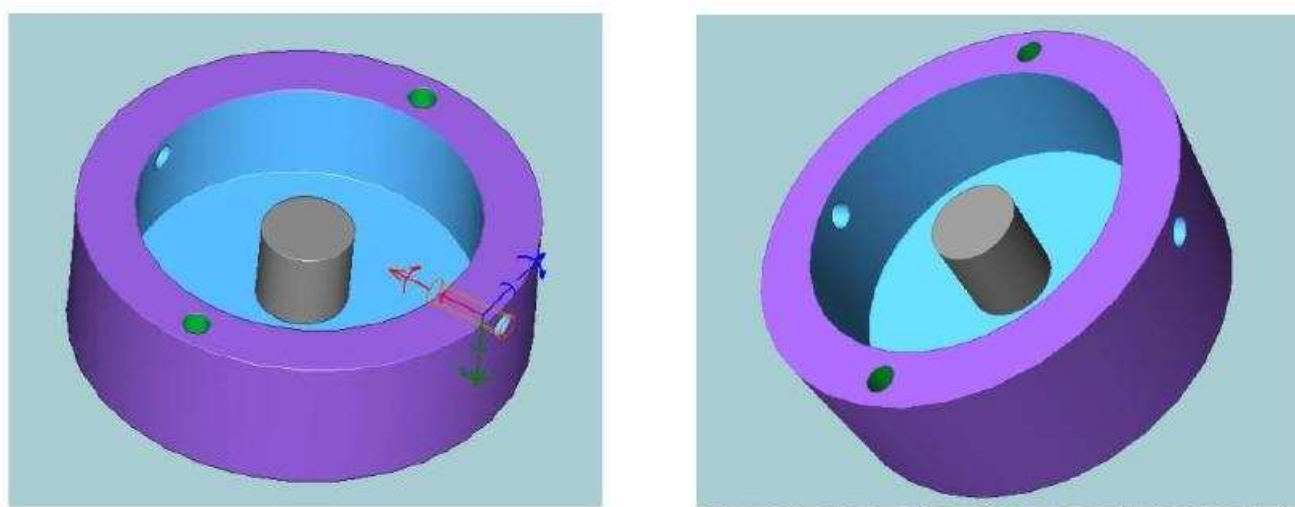


Figura 5.5 – Representação do tarugo de PVC com furos passante para condução dos termopares, ambas imagens com vista 3D

O próximo passo foi a construção da tampa do calorímetro. Usinou-se um tarugo de

PVC com  $\phi = 80,0$  mm e  $h = 10,0$  mm. Foi feito um furo passante no centro de  $\phi = 12,0$  mm, conforme a figura 5.6 com o objetivo de permitir a passagem da broca no ensaio experimental.

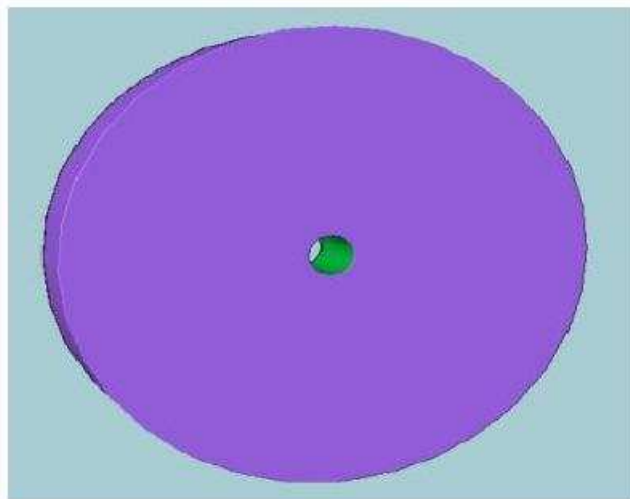


Figura 5.6 – Representação da tampa do calorímetro com furo passante no centro

A tampa também recebeu dois furos passantes de  $\phi = 5,0$  mm para fixação no calorímetro. Após essa etapa o calorímetro estava pronto para o ensaio experimental, figura 5.7.

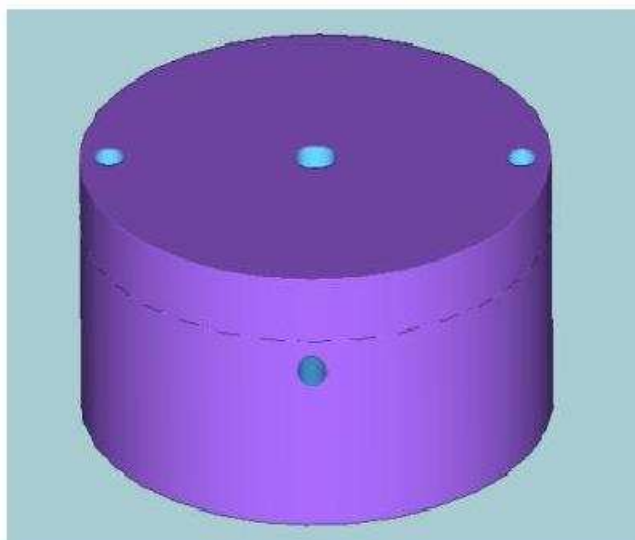


Figura 5.7 – Representação do calorímetro pronto

Após a construção do calorímetro, partiu-se para a usinagem dos corpos de prova, peças de ferro fundido cinzento com dimensões,  $\phi = 16,0$  mm e comprimento  $l = 20,0$  mm,

conforme a figura 5.8.

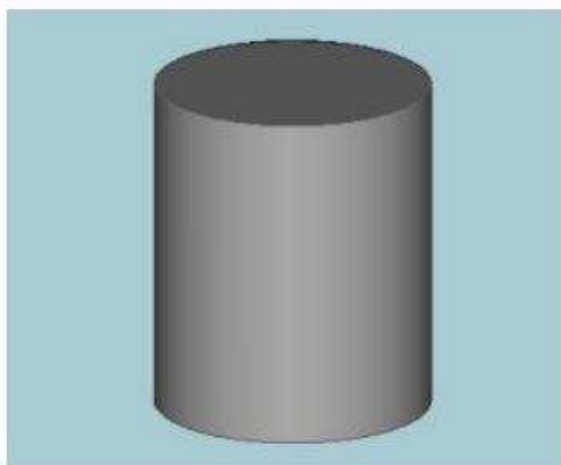


Figura 5.8 – Representação da peça de ferro fundido cinzento

#### *5.1.2 Resultados obtidos usando o primeiro calorímetro*

Depois de usar o primeiro calorímetro e as peças de ferro fundido cinzento, foram realizados ensaios de furação na máquina Discovery CNC 760.

O corpo de prova foi fixado no rebaixo localizado ao centro do calorímetro. A fixação foi feita com uma cola própria para metais e com a pressão da tampa do calorímetro sobre o corpo de prova.

Com o intuito de adquirir temperaturas na superfície da peça para trabalhos futuros, foram soldados três termopares tipo K no corpo de prova, alinhados e distantes 5,0 mm um do outro e também 5,0 mm das faces do corpo de prova. A figura 5.9 mostra uma foto do corpo de prova com os termopares.



Figura 5.9 – Termopares soldados na peça de ferro fundido cinzento

Após a fixação do corpo de prova no calorímetro, a cuba foi preenchida com água deionizada (40,0 mL). Quatro termopares tipo K foram utilizados para monitorar a temperatura da água durante os ensaios experimentais.

Durante a usinagem as temperaturas foram monitoradas e registradas através do sistema de aquisição Agilent modelo 34970A, conectado a um computador. Dessa forma, para cada ensaio seria possível calcular a energia necessária para realizar a furação (através do torque) e a quantidade de calor necessário para aquecer o volume de água do calorímetro.

A tabela 5.1 mostra as condições em que foram realizados os testes de usinagem.

Broca	Aço Rápido (HSS)
Revestimento	Nitreto de Titânio (TiN)
Diâmetro da broca, $\phi_{broca}$	10,0 mm
Velocidade de corte, $V_c$	21,98 m/min
Rotações, $\eta$	700 rpm
Velocidade de avanço, $V_f$	91,0 mm/min
Profundidade do furo, $a_p$	10,0 mm
Avanço, $f$	0,13 mm/rotação
Tempo de corte, $T_c$	6,593 s
Densidade do ferro fundido cinzento	7,25 g/cm <sup>3</sup>
Calor específico do fofo, $c_{fofo}$	0,119 cal/g
Massa da peça de fofo, $m$	28,633 g
Calor específico da água, $c_{H_2O}$	1,0 cal/g
Volume de água no calorímetro	40,0 mL

Tabela 5.1 – Condições de corte para a realização do primeiro ensaio experimental.

O torque gerado no momento da furação foi superior a força de fixação da cola, e

também superior a pressão exercida pela tampa, de tal maneira que a peça girou dentro do calorímetro, arrancou os termopares e impossibilitou que a usinagem ocorresse como deveria. Assim não foi possível colher os sinais de temperatura e força nesse procedimento experimental.

O aparato foi remontado com alterações visando a melhor fixação do corpo de prova no calorímetro. Além da cola para metais, a peça foi parafusada no fundo do calorímetro com um parafuso M3, 2,5 mm. Além do parafuso, foi inserida uma arruela lisa de  $\phi = 12,0$  mm entre a tampa do calorímetro e a face superior da peça de fofo para aumentar a pressão e garantir a inércia da peça. As condições de corte continuaram inalteradas, conforme a tabela 5.1.

Depois de reajustar o aparato experimental foi possível executar o furo na peça de ferro fundido cinzento e colher os sinais de temperatura e força.

A temperatura foi capturada em um tempo de aproximadamente um minuto e meio (1min30s), sendo feita a leitura a cada 2 segundos.

Para cada experimento realizado a água da cuba foi trocada para não haver nenhum tipo de influência em virtude de qualquer resíduo que possa ter ficado na água.



## CAPÍTULO VI

### RESULTADOS PRELIMINARES

A figura 6.1 apresenta um gráfico com a variação da temperatura medida na peça, nas três posições.

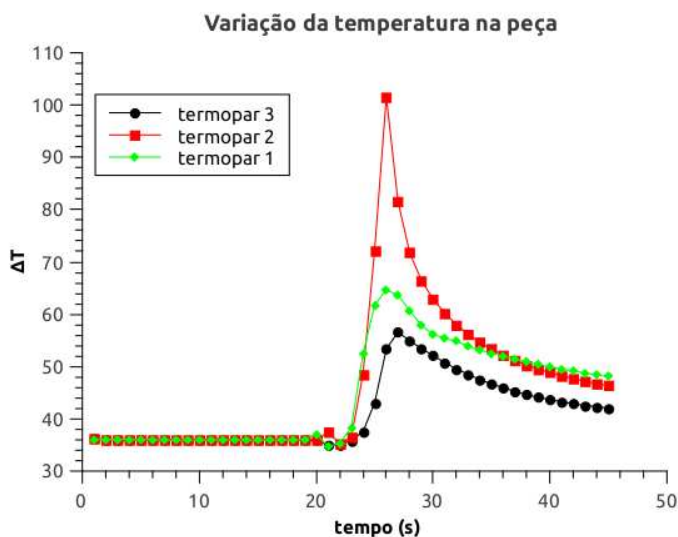


Figura 6.1 – Variação de temperatura

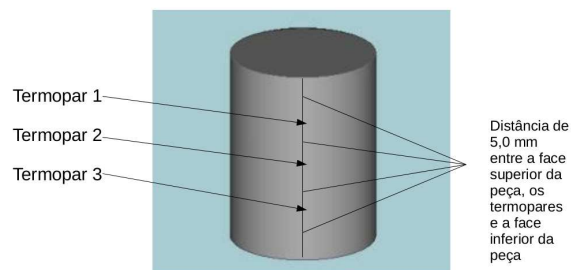


Figura 6.2 – Posição dos Termopares

Nota-se que a curva que representa o termopar 1 foi fixado na parte de cima da peça, mais próximo a face superior do corpo de prova, ou seja, onde a broca toca a peça para iniciar a furação. A segunda curva, representa o termopar 2 e foi colocada no meio da peça, entre os termopares 1 e 3. A terceira curva, termopar 3, foi inserida na face inferior da peça, próximo ao entalhe do calorímetro que permite o encaixe do corpo de prova.

Os resultados mostram uma variação de temperatura máxima de 65°C, registrada na posição 2. As demais posições registraram variação de aproximadamente 26°C e 20°C para as posições 1 e 3 respectivamente. A princípio, estes resultados não serão utilizados neste trabalho mas poderão ser úteis em trabalhos futuros, onde a metodologia utilizada por Sousa, (2009), poderia também ser utilizada em uma simulação numérica. No entanto, estes resultados mostram que existe uma diferença considerável na taxa de transferência de calor em função da posição, isto pode influenciar a estabilidade da temperatura da água.

A figura 6.3 mostra a variação das temperaturas registradas pelos termopares inseridos na água.

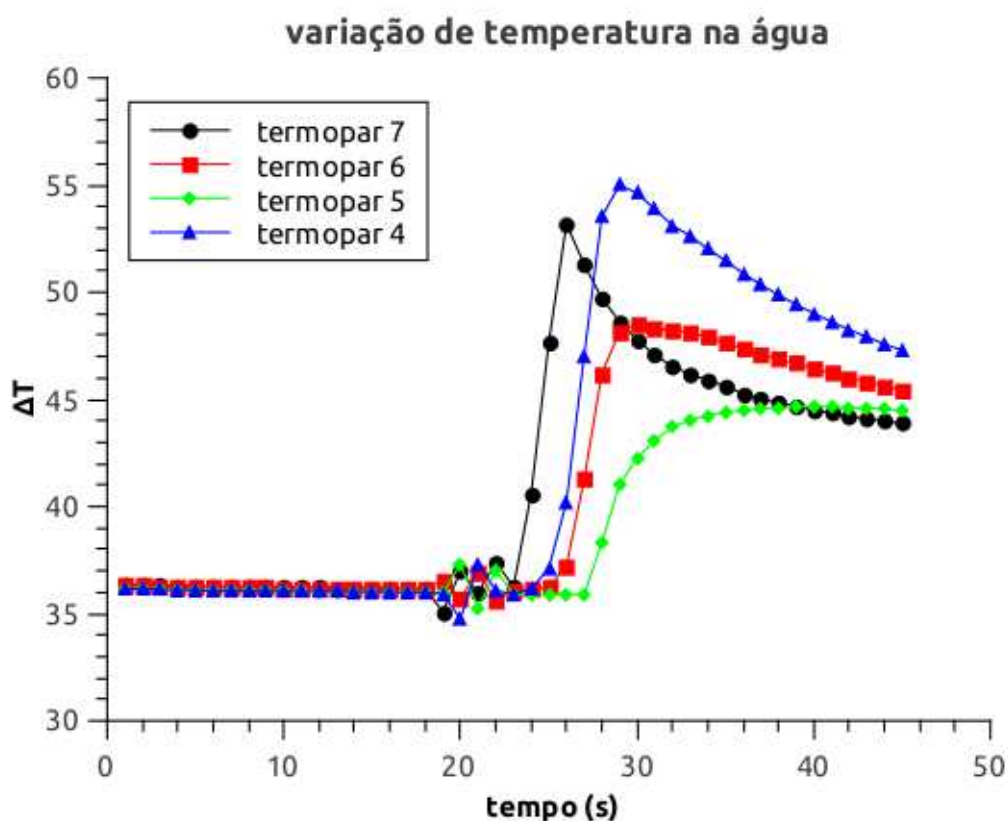


Figura 6.3 – Gráfico da variação de temperatura na água.

Percebe-se que cada ponto em que foi colocado um termopar a água sofreu uma diferente variação em sua temperatura. O principal fator que contribuiu para esse fenômeno foi a inércia da água, que durante todo o tempo de usinagem não foi agitada.

No regime transiente, a temperatura máxima registrada foi de 55°C, aumento de aproximadamente 18°C.

Em regime permanente, a temperatura varia entre os termopares, entre 42°C e 47°C.

Para os cálculos da quantidade de calor neste trabalho, foi adotado o valor de 45,26°C. Assim a variação de temperatura da água foi de 9,02°C, valor utilizado nos cálculos a seguir.

A figura 6.4 apresenta o gráfico da captura do sinal de torque durante o processo de furação.

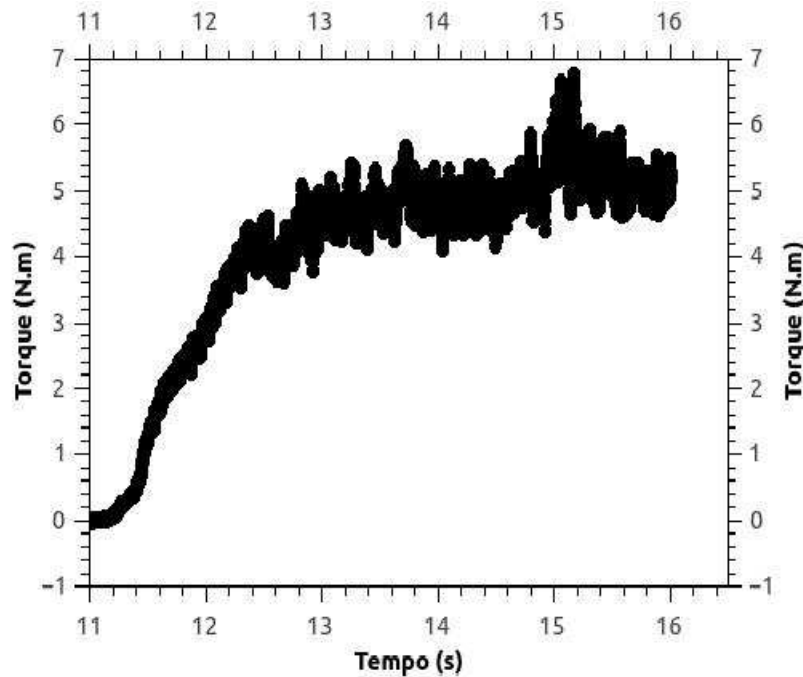


Figura 6.4 – Gráfico do sinal de torque durante a furação.

Usando a equação 2.2, pode-se inserir o valor do raio da broca ( $r$ ) no lugar da distância ( $d$ ) e multiplicar o valor do torque por 2, tendo em vista a dinâmica da ferramenta, assim tem-se:

$$\tau = F \cdot r \times 2 \quad (6.1)$$

De acordo com o gráfico, o valor máximo de torque capturado foi de 6,7766 Nm, substituindo na equação 2.2 temos:

$$\begin{aligned} 6,7766 \text{ Nm} &= F \cdot 0,005 \text{ m} \cdot 2 \\ F &= 677,66 \text{ N} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Para se fazer o cálculo da Potência média do sistema  $P_{med}$ , usa-se a equação 2.12, da

seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 P &= \vec{F} \cdot \vec{v} \\
 P &= 677,66 \text{ N} \cdot 21,98 \text{ m} / \text{min} \\
 P &= 14.894,97 \text{ Nm} / \text{min} \\
 1 \text{ Nm} / \text{min} &= 0,0166 \text{ Watts} \\
 P &= 247,26 \text{ Watts}
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Para o cálculo do trabalho  $\omega$ , que por sua vez representa a energia do sistema, usa-se a equação 2.6, conforme o seguinte:

$$\begin{aligned}
 P_{med} &= \frac{\omega}{\delta t} \\
 247,26 \text{ W} &= \frac{\omega}{6,593 \text{ s}} \\
 \omega &= 1.630,16 \text{ J} \\
 \omega &= 1,63 \text{ kJ}
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Para que se possa verificar a variação de temperatura na água, usa-se o valor de temperatura em que se inicia o experimento,  $T_1 = 36,24^\circ\text{C}$  e o valor médio de temperatura quando as curvas retornam ao equilíbrio,  $T_2 = 45,26^\circ\text{C}$ , assim teremos um  $\theta T = 9,02^\circ\text{C}$ .

Neste momento usa-se a equação fundamental da calorimetria, (2.18) para que se possa quantificar o calor adquirido pela água.

$$\begin{aligned}
 Q &= m \cdot c \cdot \theta T \\
 m_{H_2O} &= 40,0 \text{ g} \\
 c_{H_2O} &= 1,0 \text{ cal} / \text{g } ^\circ\text{C} \\
 Q &= 40,0 \text{ g} \cdot 1,0 \text{ cal} / \text{g } ^\circ\text{C} \cdot 9,02 ^\circ\text{C} \\
 Q &= 360,8 \text{ cal}
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

Pela relação apresentada na equação 2.14, tem-se que:

$$1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$$

Dessa maneira, tem-se que a quantidade de calor absorvida pela água, em Joules  $J$  é de:

$$\begin{aligned} Q &= 1.509,6 \text{ J} \\ Q &= 1,51 \text{ KJ} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Comparando-se o calor calculado para aquecer a água com a energia necessária para realizar o furo, conclui-se que o calor é aproximadamente 93% da energia. Esta estimativa é próxima a encontrada na literatura ??, em que 98% da energia envolvida no processo se transforma em calor. No entanto, os valores estimados aqui são o resultado de apenas um teste e não despreza as perdas de calor (broca, calorímetro e meio ambiente). Além disso, os resultados das temperaturas sugerem um erro de medição muito influente. Repetições foram realizadas e os resultados são apresentados a seguir. Antes porém cabem alguns comentários a respeito das temperaturas medidas na peça. Não é a intenção deste trabalho de utilizar aquela temperatura para estimar a partição de calor. Para isto, são necessários outros testes específicos em uma análise numérica.

A literatura mostra que a distribuição de calor no momento da usinagem segue uma divisão de aproximadamente 5% na peça, 75% no cavaco, 2% que se perde no ambiente e 18% fica na ferramenta, conforme a figura 2.4.

A água que está dentro do calorímetro recebe o calor do cavaco e também da peça, pois estão em contato durante a furação. Dessa maneira, a água deveria absorver um máximo de 82% de calor gerado durante a furação, no entanto a taxa absorvida de 93% indica que a água absorveu também uma pequena parcela de calor que deveria ficar na broca, já que não era previsto um contato da ferramenta com a água.

Para calcular a quantidade de calor absorvida pela peça de ferro fundido cinzento no momento da furação, foi usado o mesmo raciocínio.

A variação da temperatura na peça foi calculada tomando uma média entre as temperaturas finais apresentadas pelas três curvas, ( $45,82^{\circ}\text{C}$ ) subtraindo-se a média entre as temperaturas iniciais apresentadas pelas curvas ( $36,097^{\circ}\text{C}$ ). Esse mesmo raciocínio é usado para os cálculos seguintes.

$$\theta T = 45,82^{\circ}\text{C} - 36,097^{\circ}\text{C}$$

$$\theta T = 9,723^{\circ}\text{C}$$

$$m_{fofo} = 28,633\text{ g}$$

$$c_{fofo} = 0,119\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$$

$$Q = m \cdot c \cdot \theta T$$

$$Q = 28,633\text{ g} \cdot 0,119\text{ cal/g}^{\circ}\text{C} \cdot 9,723^{\circ}\text{C}$$

$$Q = 33,13\text{ cal}(\times 4,184)$$

$$Q = 138,61\text{ J} \quad (6.7)$$

Essa quantidade de calor absorvida pela peça corresponde a 8,5% da energia total gerada pelo sistema.

Na peça também se obteve uma parcela de calor absorvida maior do que a esperada, uma explicação pode ser o fato de estar em contato com a água, que por sua vez recebe o cavaco usinado, somando-se as temperaturas.

Foi feito um novo ensaio, respeitando as mesmas condições de corte representadas na tabela 5.1. O torque foi monitorado e apresentado em forma de gráfico, conforme a figura 6.5.

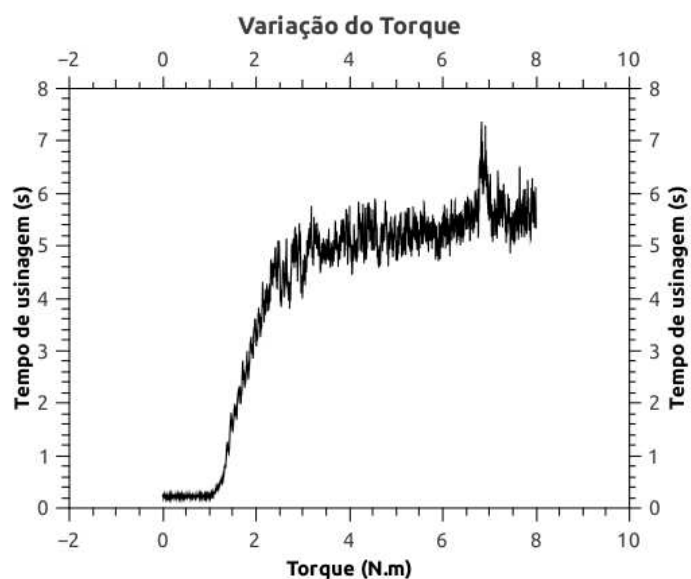


Figura 6.5 – Gráfico da variação do torque para o experimento 2.

Após a aquisição dos valores de temperatura, obteve-se o gráfico de variação da temperatura na água, conforme a figura 6.6.

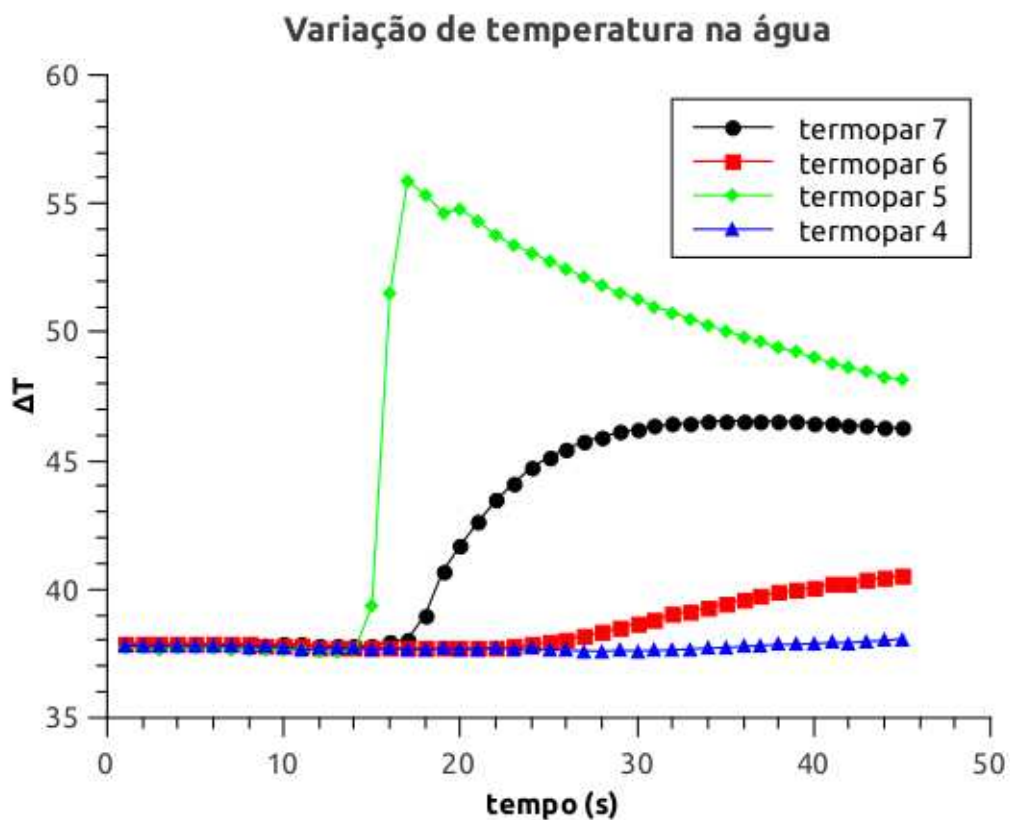


Figura 6.6 – Gráfico da variação da temperatura na água, observado no segundo experimento.

A figura 6.7 apresenta o gráfico com a variação de temperatura adquirida na peça.

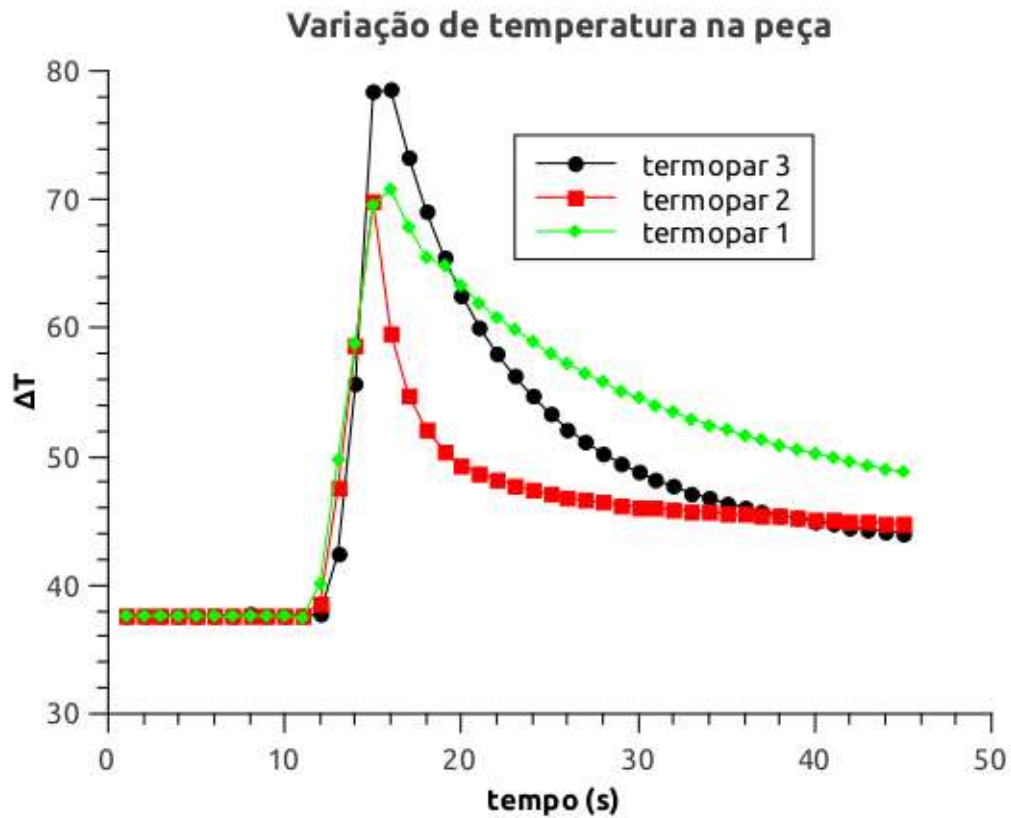


Figura 6.7 – Gráfico da variação de temperatura na peça de ferro fundido cinzento.

Observando o comportamento dos gráficos, foram realizados os cálculos que seguiram o mesmo raciocínio anterior.

Usando a equação 2.2, seguindo o raciocínio anterior, pode-se inserir o valor do raio da broca ( $r$ ) no lugar da distância ( $d$ ) e multiplicar o valor do torque por 2, tendo em vista a dinâmica da ferramenta, assim tem-se:

$$\tau = F \cdot r \times 2 \quad (6.8)$$

De acordo com o gráfico da variação do valor de torque, o valor máximo capturado foi de 7,218 Nm, e, substituindo na equação 2.2 é possível calcular a força de corte no processo de furação:



$$\begin{aligned}
 7,218 \text{ Nm} &= F \cdot 0,005 \text{ m} \cdot 2 \\
 F &= 721,8 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{6.9}$$

Para calcular a Potência média do sistema  $P_{med}$ , usa-se a equação 2.12, da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 P &= \vec{F} \cdot \vec{v} \\
 P &= 721,8 \text{ N} \cdot 21,98 \text{ m} / \text{min} \\
 P &= 15.865,16 \text{ Nm} / \text{min} \\
 1 \text{ Nm} / \text{min} &= 0,0166 \text{ Watts} \\
 P &= 263,36 \text{ Watts}
 \end{aligned}
 \tag{6.10}$$

Para o cálculo do trabalho  $\omega$ , que por sua vez representa a energia do sistema, usa-se a equação 2.6, conforme o seguinte:

$$\begin{aligned}
 P_{med} &= \frac{\omega}{\delta t} \\
 263,36 \text{ W} &= \frac{\omega}{6,593 \text{ s}} \\
 \omega &= 1.736,34 \text{ J} \\
 \omega &= 1,74 \text{ kJ}
 \end{aligned}
 \tag{6.11}$$

Para que se possa verificar a variação de temperatura na água, foi usado o valor de temperatura em que se inicia o experimento,  $T_1 = 37,823^\circ\text{C}$  e o valor médio de temperatura quando as curvas retornam ao equilíbrio,  $T_2 = 42,31^\circ\text{C}$ , assim tem-se um  $\theta \text{ T} = 4,49^\circ\text{C}$ .

Neste momento usa-se a equação fundamental da calorimetria, (2.18) para que se possa quantificar calcular a quantidade de calor adquirida pela água.

$$\begin{aligned}
Q &= m \cdot c \cdot \theta T \\
m_{H_2O} &= 40,0 \text{ g} \\
c_{H_2O} &= 1,0 \text{ cal} / \text{ g } ^\circ\text{C} \\
Q &= 40,0 \text{ g} \cdot 1,0 \text{ cal} / \text{ g } ^\circ\text{C} \cdot 4,49 ^\circ\text{C} \\
Q &= 179,65 \text{ cal}
\end{aligned} \tag{6.12}$$

$$Q = 751,66 \text{ J}$$

Essa quantidade de calor representa aproximadamente 43% da energia total. A princípio, este calor é bem menor do que o esperado, o que pode indicar uma falha no sistema de conservação de energia do calorímetro, erros de medição na temperatura da água.

O torque neste ensaio é apenas 6,75% maior do que o primeiro ensaio. No entanto, a quantidade de calor calculada no primeiro ensaio foi aproximadamente 50% maior. Isto pode indicar uma deficiência na obtenção da temperatura na água.

Para calcular a quantidade de calor absorvida pela peça de ferro fundido cinzento no momento da furação, foi usado o mesmo raciocínio.

A variação da temperatura na peça foi calculada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
\theta T &= 42,91 ^\circ\text{C} - 37,661 ^\circ\text{C} \\
\theta T &= 5,25 ^\circ\text{C} \\
m_{fofo} &= 28,633 \text{ g} \\
c_{fofo} &= 0,119 \text{ cal} / \text{ g } ^\circ\text{C} \\
Q &= m \cdot c \cdot \theta T
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= 28,633 \text{ g} \cdot 0,119 \text{ cal/g}^\circ\text{C} \cdot 5,25^\circ\text{C} \\
 Q &= 17,89 \text{ cal} (\times 4,184) \\
 Q &= 74,84 \text{ J}
 \end{aligned}
 \tag{6.13}$$

Essa quantidade de calor absorvida pela peça corresponde a 4,3% da energia total gerada pelo sistema. Este resultado é próximo do estimado no primeiro ensaio.

Um terceiro ensaio foi feito respeitando as mesmas condições de corte representadas na tabela 5.1.

Após a aquisição dos valores de temperatura, obteve-se o gráfico de variação da temperatura na água, conforme a figura 6.8.

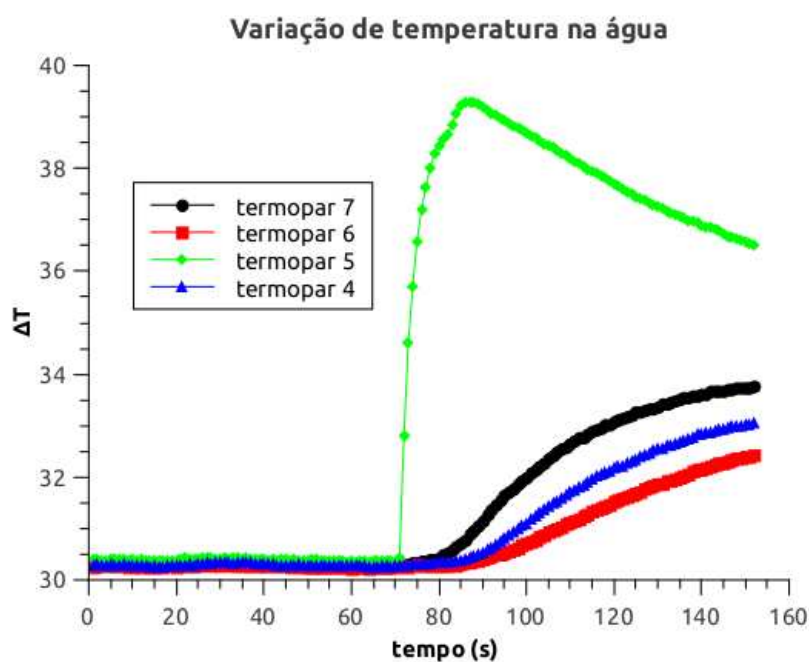


Figura 6.8 – Gráfico da variação da temperatura na água, observado no terceiro experimento.

A figura 6.9 apresenta um gráfico com a variação de temperatura na peça.

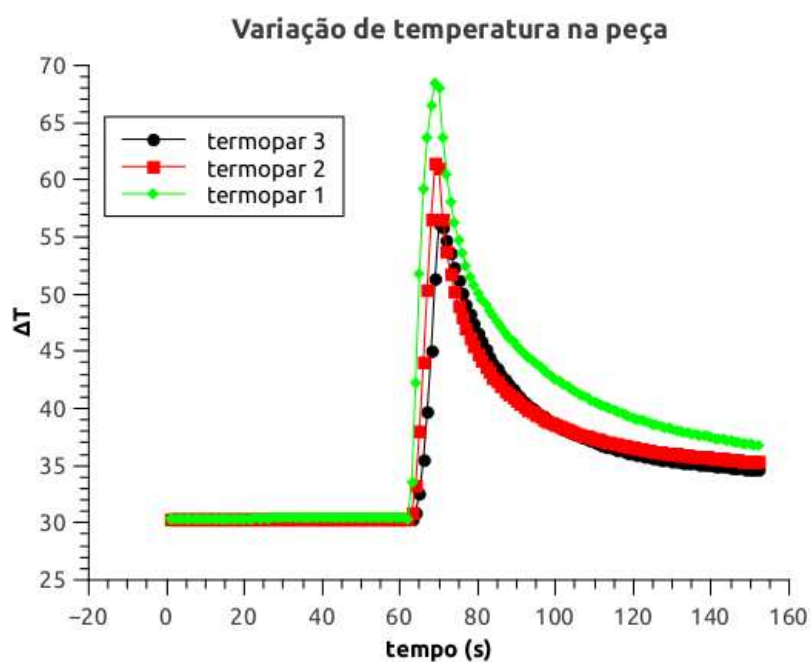


Figura 6.9 – Gráfico da variação de temperatura na peça de ferro fundido cinzento.

A figura 6.10 apresenta o gráfico com a variação do torque durante o terceiro experimento de furação.

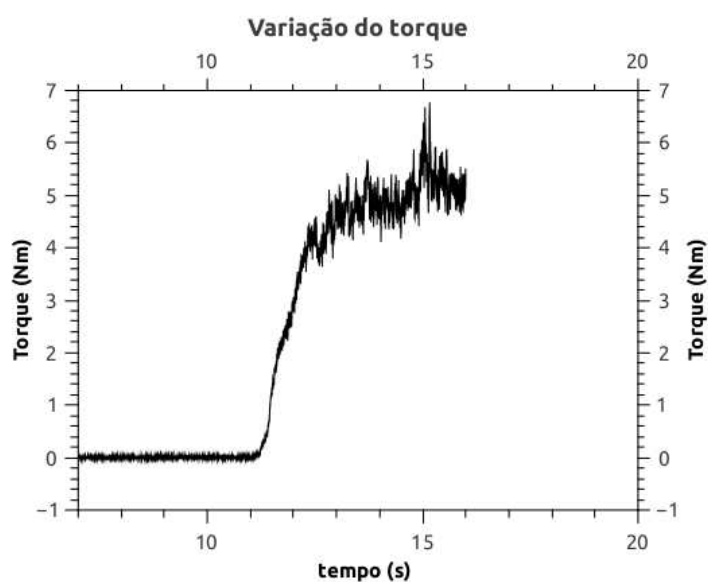


Figura 6.10 – Gráfico da variação do torque no terceiro experimento.

De acordo com o gráfico da variação do valor de torque, o valor máximo medido foi de 6,78 Nm, e, substituindo na equação 2.2 é possível calcular a força de corte no processo de furação.

Utilizando o mesmo procedimento dos testes anteriores o trabalho de furação foi de:

$$\omega = 1,63 \text{ kJ} \quad (6.14)$$

e o calor absorvido pela água do calorímetro,

$$Q = 605,84 \text{ J}$$

Essa quantidade de calor representa aproximadamente 37% da energia total.

Dessa maneira fica evidente uma perda considerável de energia para o ambiente, ou um mau funcionamento do calorímetro.

Seguindo o mesmo raciocínio, foi calculada a quantidade de calor,  $Q$ , absorvida pela peça de ferro fundido.

$$\begin{aligned} \theta T &= 35,602 \text{ }^{\circ}\text{C} - 30,34 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \theta T &= 5,26 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ m_{\text{fofo}} &= 28,633 \text{ g} \\ c_{\text{fofo}} &= 0,119 \text{ cal/g }^{\circ}\text{C} \\ Q &= m \cdot c \cdot \theta T \\ Q &= 28,633 \text{ g} \cdot 0,119 \text{ cal/g }^{\circ}\text{C} \cdot 5,26 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ Q &= 17,93 \text{ cal} (\times 4,184) \\ Q &= 75,02 \text{ J} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Essa quantidade de calor absorvida pela peça corresponde a 4,6% da energia total gerada pelo sistema.

Na peça é possível perceber uma pequena perda de calor, visto que era esperado uma quantidade de aproximadamente 5% do calor total gerado durante a furação.

Essa discrepância nos valores obtidos durante os experimentos fez com que fosse feito um novo projeto de calorímetro que apresentasse maior eficácia na conservação de energia. As-

sim iniciou-se uma nova etapa de projeto e construção do novo calorímetro e posteriormente a execução de novos experimentos.

## 6.1 Construção do segundo calorímetro

O projeto do novo calorímetro previu um aparato de duas cubas, sendo uma encaixada dentro da outra, de forma que se possa ter o mínimo de perda de calor para o ambiente durante a furação.

Além do sistema de duas cubas, acrescentou-se também entre as cubas, uma determinada quantidade de isopor picotado que também contribui para a conservação do calor gerado no processo experimental.

Para a construção desse novo calorímetro, partiu-se de um tarugo de technyl com diâmetro,  $\phi = 150,0$  mm e altura,  $h = 66,0$  mm, onde se usinou uma cavidade cilíndrica com diâmetro,  $\phi = 120,0$  mm e altura,  $h = 50,0$  mm. Posteriormente, dentro dessa mesma fresa, usinou-se uma nova cavidade cilíndrica com  $\phi = 95,0$  mm e  $h = 5,0$  mm, que por sua vez possui a função de proporcionar o encaixe da cuba menor. Ainda nessa peça foi usinado uma nova cavidade com  $\phi = 12,0$  mm e  $h = 11,0$  mm, no centro da peça para que pudesse encaixar o parafuso que prende a peça de ferro fundido cinzento na cuba 2, conforme a figura 6.11.

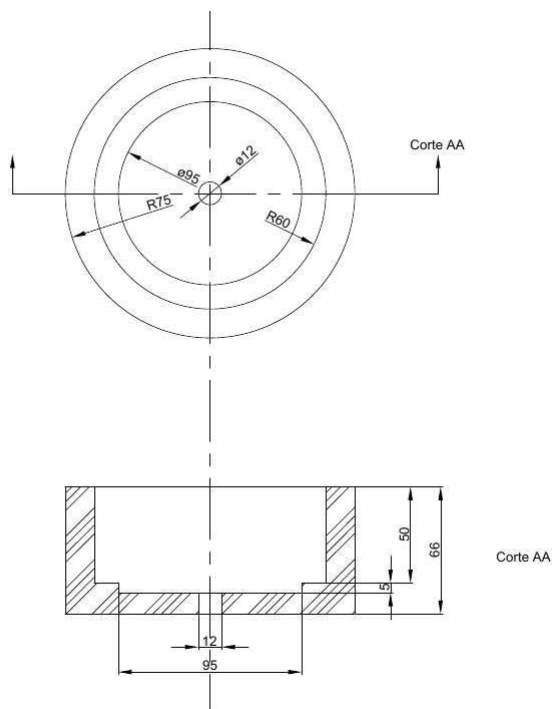


Figura 6.11 – Desenho com dimensões de cortes na cuba 1 [mm].

A cuba 1 também pode ser vista em um desenho 3D, conforme a figura 6.12.

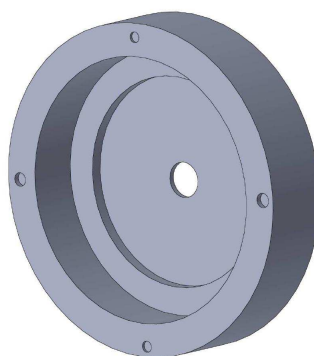


Figura 6.12 – Desenho 3D da cuba 1.

Pode-se observar 4 furos na borda do calorímetro que possui a função de receber os parafusos da tampa para propiciar a vedação do aparato.

A segunda cuba, que por sua vez ficará instalada no interior da primeira cuba, foi usinada a partir de um tarugo de PVC com dimensões de diâmetro,  $\phi = 95,0$  mm e altura,  $h = 55,0$  mm. Neste tarugo foi feito uma cavidade cilíndrica de  $\phi = 60,0$  mm e  $h = 45,0$  mm. Posteriormente fez-se outra cavidade no centro da primeira com  $\phi = 16,0$  mm e  $h = 5,0$  mm com o objetivo de permitir o encaixe da peça de ferro fundido cinzento, que por sua vez, além do

encaixe no fundo da cuba, será fixada com um parafuso do tipo Allen com cabeça M6 de 10,0 mm. Pode-se observar o desenho da cuba com as devidas dimensões na figura 6.13.

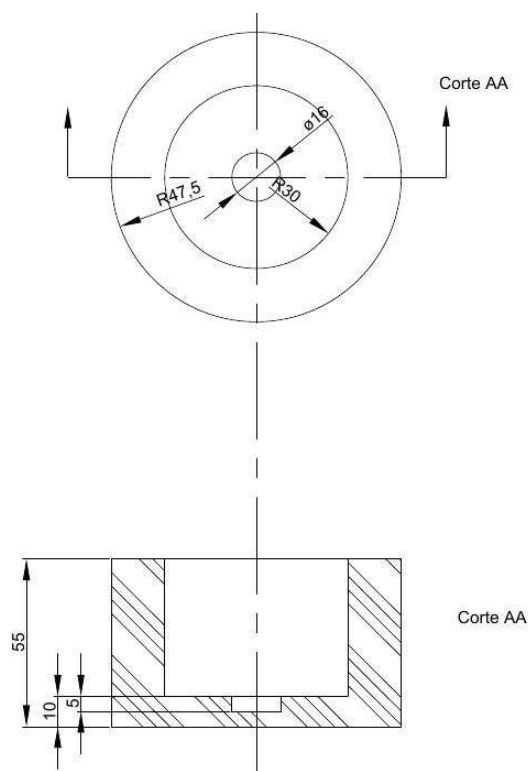


Figura 6.13 – Desenho da cuba de PVC com dimensões [mm].

Pode-se observar também o desenho da cuba em uma projeção em 3D, conforme a figura 6.14, que também mostra os furos na borda que serviram para fixar a tampa do calorímetro.

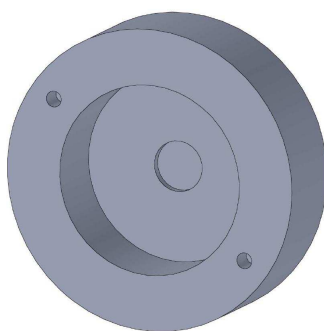


Figura 6.14 – Desenho 3D da cuba de PVC.



A próxima etapa do projeto contemplou a construção de uma tampa que englobasse as duas cubas, assim usinou-se um tarugo de dimensões,  $\phi = 150,0$  mm e  $h = 10,0$  mm. Nessa peça fez-se um rebaixo numa faixa de 45,0 mm, deixando assim um sobressalto no centro com diâmetro de 60,0 mm. No centro da tampa fez-se um furo passante com  $\phi = 12,0$  mm para passar a broca de metal duro de  $\phi = 10,0$  mm. Foi usinado também furos na extremidade para colocar parafusos no intuito de prender a tampa nas cubas. Ainda na tampa foram feitos 4 furos passantes com  $\phi = 2,0$  mm para passagem dos termopares. O desenho da tampa pode ser visto na figura 6.15 que apresenta o conjunto completo com as cubas encaixadas e a tampa.

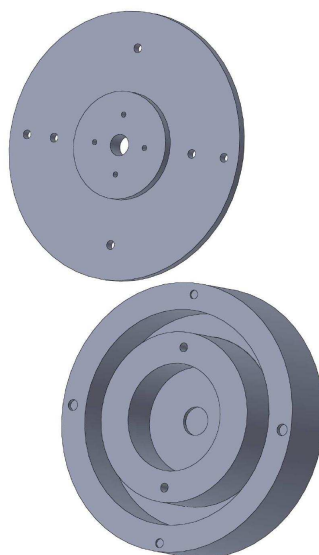


Figura 6.15 – Desenho 3D do conjunto cubas encaixadas e tampa.

A figura 6.16 mostra as cubas encaixadas e também a peça de ferro fundido cinzento fixada, pronta para o procedimento experimental.

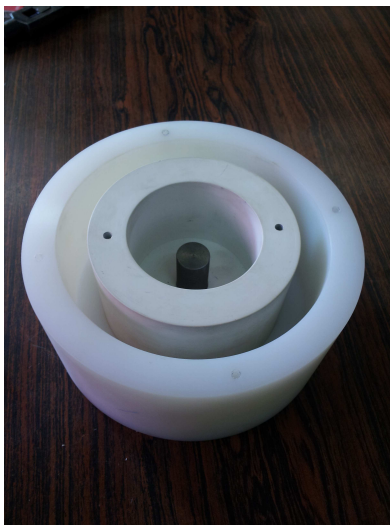


Figura 6.16 – Foto do calorímetro com as cubas encaixadas e a peça de ferro fundido cinzento fixada pronta para a furação.

Entre as duas cubas foi deixado, propositalmente, um espaço de 12,5 mm que foi preenchido com isopor picotado para intensificar a capacidade de conservação de calor, conforme pode ser observado na figura 6.17.



Figura 6.17 – Foto do calorímetro montado preenchido com isopor e a tampa com termopares inseridos.

O calorímetro pronto, montado e com os termopares inseridos, pode ser observado na figura 6.18.

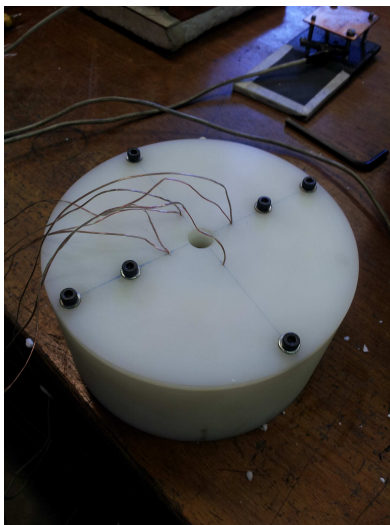


Figura 6.18 – Foto do calorímetro pronto, montado e com os termopares inseridos.

Para a execução dos ensaios experimentais utilizando o segundo calorímetro construído, foram feitas algumas mudanças na montagem do aparato experimental, no intuito de obter melhores condições de avaliação do fenômeno em questão.

A primeira mudança se deu no aumento da quantidade de termopares, foram utilizados 7 termopares para aquisição da temperatura da água.

A peça de ferro fundido cinzento sofreu mudança em relação a sua altura,  $h$ , passou de 20,0 mm para 30,0 mm e, manteve seu diâmetro,  $\phi = 16,0$  mm. Essa mudança visa uma furação mais profunda que possa gerar uma quantidade de calor maior que na ocasião anterior.

No momento da furação, a máquina, Discovery CNC, foi programada para encerrar o movimento no momento em que a broca atingisse a profundidade de 15 mm, ou seja a broca ficaria inerte após o furo para a coleta completa da temperatura. A figura 6.19, mostra a máquina parada no momento em que a broca termina de furar.



Figura 6.19 – Foto da broca HSS parada no momento em que se termina o furo.

A máquina fica parada durante a coleta do sinal de temperatura, para que se possa obter a parcela de calor que é transferida para a broca. Após passado o tempo de leitura da temperatura a broca é removida para que se possa executar o novo experimento.

Foi utilizada uma velocidade de corte de 30,0 m/min. Essa mudança permite também gerar uma taxa maior de calor.

Todas as mudanças nas condições de corte podem ser observadas na tabela 6.1:

<i>Elementos de trabalho</i>	<i>Calorímetro 1</i>	<i>Calorímetro 2</i>
Broca	Aço Rápido (HSS)	Aço Rápido (HSS)
Revestimento	Nitreto de Titânio (TiN)	Nitreto de Titânio (TiN)
Diâmetro da broca, $\phi_{broca}$	10,0 mm	10,0 mm
Velocidade de corte, $V_c$	21,98 m/min	30,0 m/min
Rotações, $\eta$	700 rpm	955 rpm
Velocidade de avanço, $V_f$	91,0 mm/min	124,15 mm/min
Profundidade do furo, $a_p$	10,0 mm	15,0 mm
Avanço, $f$	0,13 mm/rotação	0,13 mm/rotação
Tempo de corte, $T_c$	6,593 s	7,25 s
Densidade do ferro fundido cinzento	7,25 g/cm <sup>3</sup>	7,25 g/cm <sup>3</sup>
Calor específico do fofo, $c_{fofo}$	0,119 cal/g	0,119 cal/g
Massa da peça de fofo, $m$	28,633 g	40,9 g
Calor específico da água, $c_{H_2O}$	1,0 cal/g	1,0 cal/g
Volume de água no calorímetro	40,0 mL	90,0 mL

Tabela 6.1 – Condições de corte para a realização dos ensaios utilizando o primeiro calorímetro e também para o segundo calorímetro.

## 6.2 Resultados obtidos utilizando o segundo calorímetro

No primeiro teste utilizando o segundo calorímetro construído, obteve-se o seguinte gráfico, figura 6.20, que representa a variação do torque durante a furação.

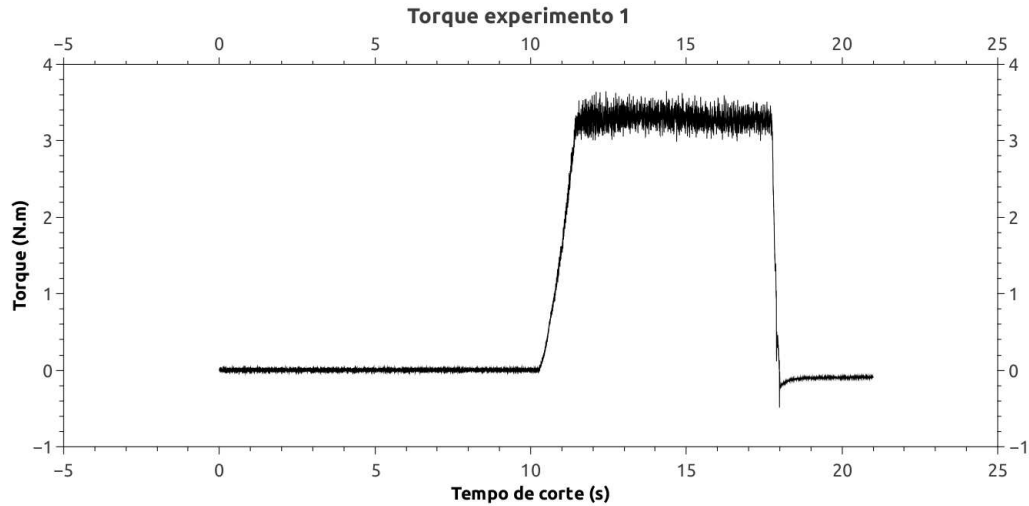


Figura 6.20 – Gráfico com a variação do torque para o primeiro experimento.

De acordo com o gráfico da variação do valor de torque, o valor médio capturado foi de 3,388 Nm e, substituindo na equação 2.2, é possível calcular a força de corte no processo de furação.

Seguindo o raciocínio anterior, pode-se inserir o valor do raio da broca, ( $r$ ), no lugar da distância ( $d$ ) e multiplicar o valor do torque por 2, tendo em vista a dinâmica da ferramenta, assim temos:

$$\begin{aligned}\tau &= F \cdot r \times 2 \\ 3,388 \text{ Nm} &= F \cdot 0,005 \text{ m} \cdot 2 \\ F &= 338,8 \text{ N}\end{aligned}\tag{6.16}$$

Para calcular a Potência média do sistema  $P_{med}$ , usa-se a equação 2.12, da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
P &= \vec{F} \cdot \vec{v} \\
P &= 338,8 \text{ N} \cdot 30,0 \text{ m} / \text{min} \\
P &= 10.164 \text{ Nm} / \text{min} \\
1 \text{ Nm} / \text{min} &= 0,0166 \text{ Watts} \\
P &= 168,72 \text{ Watts}
\end{aligned} \tag{6.17}$$

Para o cálculo do trabalho  $\omega$ , que por sua vez representa a energia do sistema, usa-se a equação 2.6, conforme o seguinte:

$$\begin{aligned}
P_{med} &= \frac{\omega}{\delta t} \\
168,72 \text{ W} &= \frac{\omega}{7,25 \text{ s}} \\
\omega &= 1.223,24 \text{ J} \\
\omega &= 1,22 \text{ kJ}
\end{aligned} \tag{6.18}$$

A figura 6.21 mostra a variação das temperaturas na água.

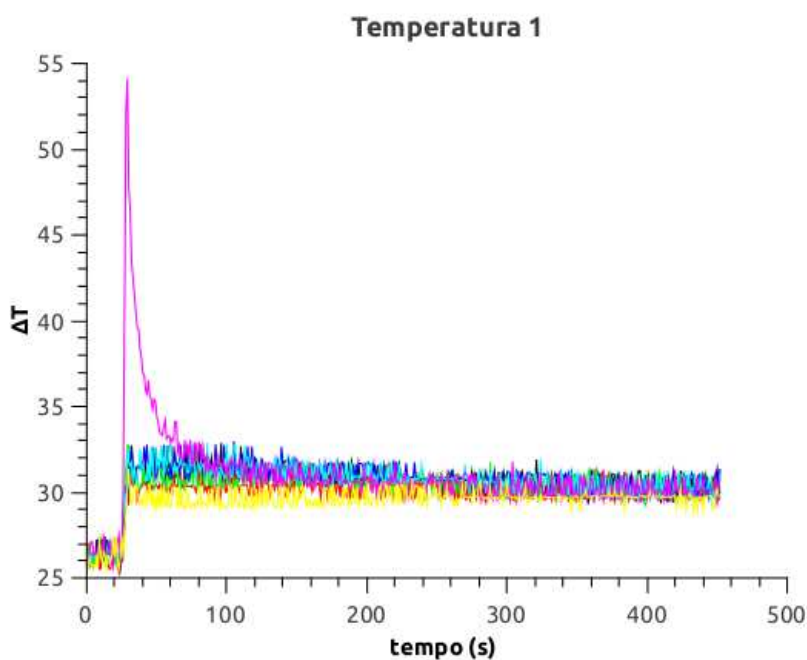


Figura 6.21 – Gráfico com a variação de temperatura no primeiro experimento.

Para que se possa verificar a variação de temperatura na água, foi usado o valor de temperatura em que se inicia o experimento,  $T_1 = 26,21^\circ\text{C}$  e o valor médio de temperatura quando as curvas retornam ao equilíbrio,  $T_2 = 30,26^\circ\text{C}$ , assim tem-se um  $\theta T = 4,05^\circ\text{C}$ , conforme o gráfico apresentado na figura 6.21.

Neste momento usa-se a equação fundamental da calorimetria, (2.18) para que se possa quantificar a quantidade de calor adquirida pela água.

$$\begin{aligned}
 Q &= m \cdot c \cdot \theta T \\
 m_{H_2O} &= 90,0 \text{ g} \\
 c_{H_2O} &= 1,0 \text{ cal} / \text{g } ^\circ\text{C} \\
 Q &= 90,0 \text{ g} \cdot 1,0 \text{ cal} / \text{g } ^\circ\text{C} \cdot 4,05 ^\circ\text{C} \\
 Q &= 364,5 \text{ cal}
 \end{aligned} \tag{6.19}$$

Dessa maneira, tem-se que a quantidade de calor absorvido pela água, em Joules  $J$  é de:

$$Q = 1.525,07 J$$

Essa quantidade de calor representa aproximadamente 125% da energia total.

De acordo com a literatura, visto na figura 2.4, era esperado uma quantidade de calor que representasse a somatória do calor absorvido pela peça, pela ferramenta e pelo cavaco, ou seja, em torno de 98%.

Feita a repetição do ensaio foram obtidos os seguintes dados, a começar pelo gráfico que representa a variação do torque no momento da furação, figura 6.22.

De acordo com o gráfico da variação do valor de torque, o valor médio capturado foi

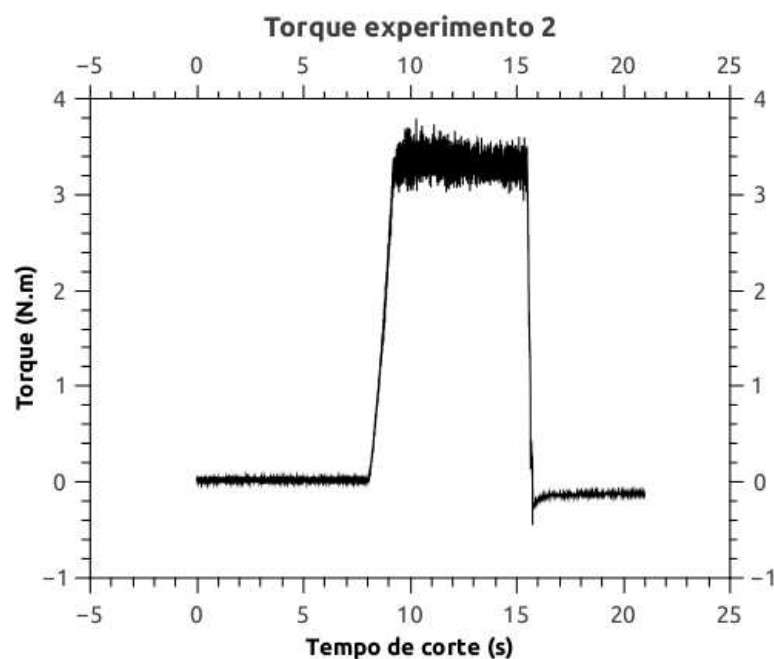


Figura 6.22 – Gráfico com a variação de torque no segundo experimento.

de 3,287 Nm e, substituindo na equação 2.2, é possível calcular a força de corte no processo de furação.

Seguindo o raciocínio anterior:

$$\tau = F \cdot r \times 2$$

$$3,287 Nm = F \cdot 0,005 m \cdot 2$$



$$F = 328,7 \text{ N} \quad (6.20)$$

Para calcular a Potência média do sistema  $P_{med}$ , usa-se a equação 2.12:

$$\begin{aligned} P &= \vec{F} \cdot \vec{v} \\ P &= 328,7 \text{ N} \cdot 30,0 \text{ m} / \text{min} \\ P &= 9.861 \text{ Nm} / \text{min} \\ 1 \text{ Nm} / \text{min} &= 0,0166 \text{ Watts} \\ P &= 163,69 \text{ Watts} \end{aligned} \quad (6.21)$$

Para o cálculo do trabalho  $\omega$ , que por sua vez representa a energia do sistema, usa-se a equação 2.6, conforme o seguinte:

$$\begin{aligned} P_{med} &= \frac{\omega}{\delta t} \\ 163,69 \text{ W} &= \frac{\omega}{7,25 \text{ s}} \\ \omega &= 1.186,77 \text{ J} \\ \omega &= 1,19 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (6.22)$$

Para que se possa verificar a variação de temperatura na água, foi usado o valor de temperatura em que se inicia o experimento,  $T_1 = 26,27^\circ\text{C}$  e o valor médio de temperatura quando as curvas retornam ao equilíbrio,  $T_2 = 30,05^\circ\text{C}$ , assim teremos um  $\theta \text{ T} = 3,78^\circ\text{C}$ , conforme o gráfico apresentado na figura 6.23.

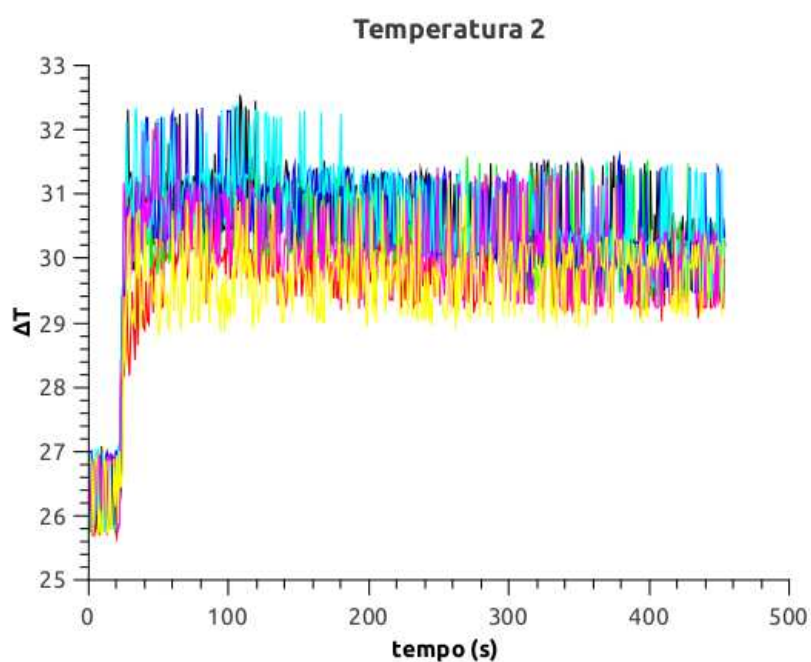


Figura 6.23 – Gráfico com a variação de temperatura no segundo experimento.

Neste momento usa-se a equação fundamental da calorimetria, (2.18) para que se possa calcular a quantidade de calor adquirida pela água.

$$Q = m \cdot c \cdot \theta T$$

$$m_{H_2O} = 90,0 \text{ g}$$

$$c_{H_2O} = 1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

$$Q = 90,0 \text{ g} \cdot 1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} \cdot 3,78 ^\circ\text{C}$$

$$Q = 340,2 \text{ cal} \quad (6.23)$$

Pela relação apresentada na equação 2.14, tem-se que:

$$1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$$

Dessa maneira, tem-se que a quantidade de calor absorvido pela água, em Joules  $J$  é de:

$$Q = 1.423,39 J$$

Essa quantidade de calor representa aproximadamente 120% da energia total.

Nesse ensaio percebe-se que houve uma geração de calor superior ao esperado, porém menor que o resultado apresentado no ensaio anterior.

No terceiro experimento, respeitando as mesmas condições de corte, os valores obtidos de torque são mostrados na figura 6.24.

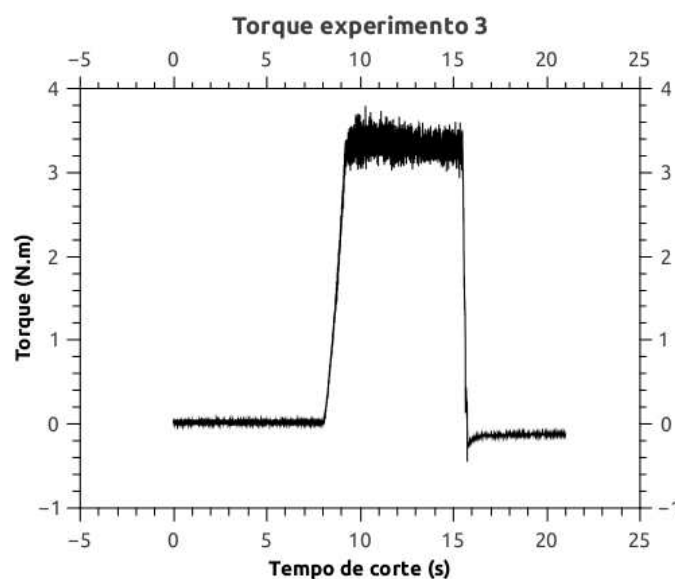


Figura 6.24 – Gráfico com a variação de torque no terceiro experimento.

De acordo com o gráfico da variação do valor de torque, o valor médio capturado foi de 3,322 Nm. Assim, pode-se obter a força de corte:

$$\tau = F \cdot r \times 2$$

$$3,322 Nm = F \cdot 0,005 m \cdot 2$$

$$F = 332,2 \text{ N} \quad (6.24)$$

Para calcular a Potência média do sistema  $P_{med}$ , utiliza-se a equação 2.12:

$$\begin{aligned} P &= \vec{F} \cdot \vec{v} \\ P &= 332,2 \text{ N} \cdot 30,0 \text{ m/min} \\ P &= 9.966 \text{ Nm/min} \\ 1 \text{ Nm/min} &= 0,0166 \text{ Watts} \\ P &= 165,436 \text{ Watts} \end{aligned} \quad (6.25)$$

Para o cálculo do trabalho  $\omega$ :

$$\begin{aligned} P_{med} &= \frac{\omega}{\delta t} \\ 165,436 \text{ W} &= \frac{\omega}{7,25 \text{ s}} \\ \omega &= 1.199,41 \text{ J} \\ \omega &= 1,20 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (6.26)$$

A figura 6.25 mostra a variação da temperatura da água.

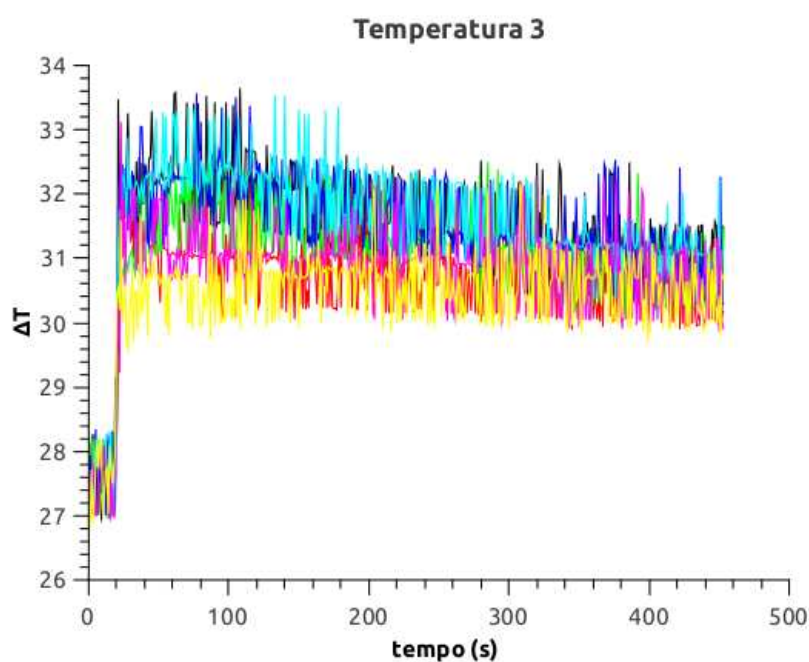


Figura 6.25 – Gráfico com a variação de temperatura no terceiro experimento.

Para verificar a variação de temperatura na água, foi usado o valor de temperatura em que se inicia o experimento,  $T_1 = 27,52^\circ\text{C}$  e o valor médio de temperatura quando as curvas retornam ao equilíbrio,  $T_2 = 30,71^\circ\text{C}$ , assim teremos um  $\theta T = 3,21^\circ\text{C}$ .

Assim:

$$Q = m \cdot c \cdot \theta T$$

$$m_{H_2O} = 90,0 \text{ g}$$

$$c_{H_2O} = 1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

$$Q = 90,0 \text{ g} \cdot 1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} \cdot 3,21 ^\circ\text{C}$$

$$Q = 288,9 \text{ cal} \quad (6.27)$$

Dessa maneira, tem-se que a quantidade de calor absorvido pela água, em Joules  $J$  é de:

$$Q = 1.208,76 \text{ J}$$

Essa quantidade de calor representa aproximadamente 101% da energia total.

Pode-se observar um comportamento muito parecido com o ensaio anterior.

A figura 6.26 mostra o torque durante a usinagem no quarto experimento.

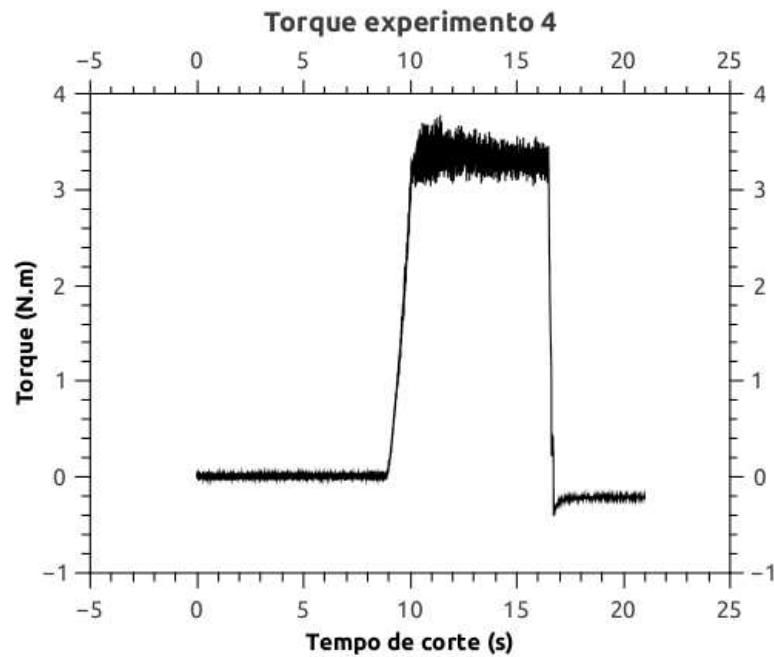


Figura 6.26 – Gráfico com a variação de torque no quarto experimento.

De acordo com o gráfico da variação do valor de torque, o valor médio capturado foi de 3,291 Nm. Assim, a força de corte pode ser calculada:

$$\begin{aligned}
 \tau &= F \cdot r \times 2 \\
 3,291 \text{ Nm} &= F \cdot 0,005 \text{ m} \cdot 2 \\
 F &= 329,1 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{6.28}$$

A potência de corte então será:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

$$\begin{aligned}
 P &= 329,1 \text{ N} \cdot 30,0 \text{ m} / \text{min} \\
 P &= 9.873 \text{ Nm} / \text{min} \\
 1 \text{ Nm} / \text{min} &= 0,0166 \text{ Watts} \\
 P &= 163,89 \text{ Watts}
 \end{aligned}
 \tag{6.29}$$

Finalmente, o trabalho realizado será:

$$\begin{aligned}
 P_{med} &= \frac{\omega}{\delta t} \\
 163,89 \text{ W} &= \frac{\omega}{7,25 \text{ s}} \\
 \omega &= 1.188,22 \text{ J} \\
 \omega &= 1,18 \text{ kJ}
 \end{aligned}
 \tag{6.30}$$

A figura 6.27 mostra a variação da temperatura da água.

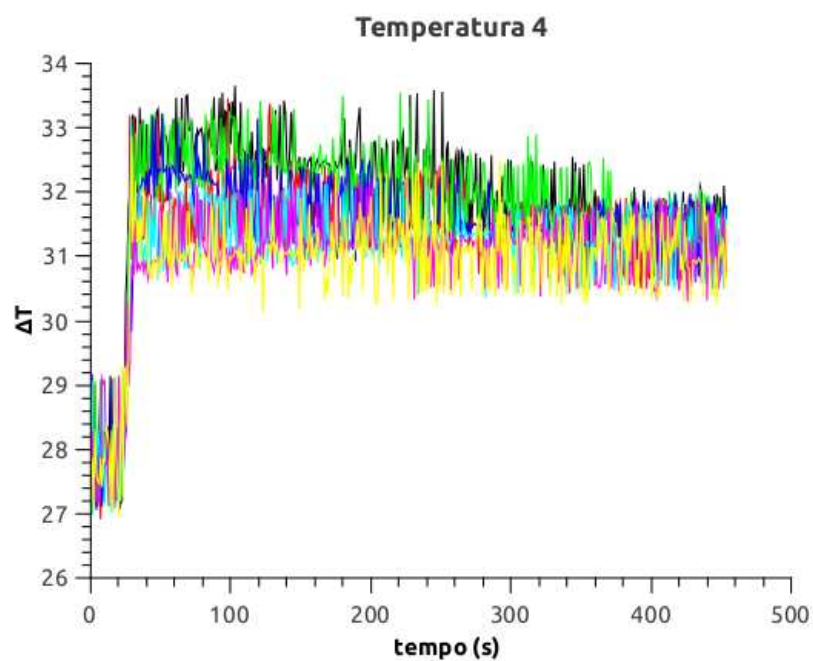


Figura 6.27 – Gráfico com a variação de temperatura no quarto experimento.

De acordo com os resultados o valor médio de temperatura final da água será de

aproximadamente  $31,34^{\circ}\text{C}$ . Considerando uma temperatura inicial de  $27,95^{\circ}\text{C}$ , a diferença de temperatura será de  $3,39^{\circ}\text{C}$ .

Calculando a quantidade de calor:

$$\begin{aligned}
 Q &= m \cdot c \cdot \theta T \\
 m_{H_2O} &= 90,0 \text{ g} \\
 c_{H_2O} &= 1,0 \text{ cal} / \text{g } ^{\circ}\text{C} \\
 Q &= 90,0 \text{ g} \cdot 1,0 \text{ cal} / \text{g } ^{\circ}\text{C} \cdot 3,39 ^{\circ}\text{C} \\
 Q &= 305,1 \text{ cal}
 \end{aligned} \tag{6.31}$$

Pela relação apresentada na equação 2.14, tem-se que:

$$1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$$

Dessa maneira, tem-se que a quantidade de calor absorvido pela água, em Joules  $J$  é de:

$$Q = 1.276,54 \text{ J}$$

Essa quantidade de calor representa aproximadamente 107% da energia total.

Repetindo o procedimento foram obtidos os gráficos de torque mostrados nas figuras 6.28, 6.29, 6.30.



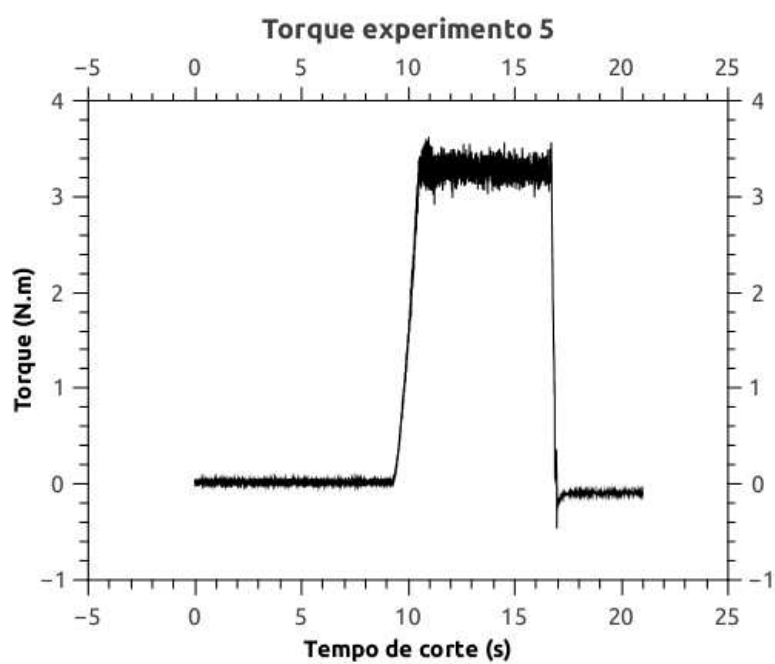


Figura 6.28 – Gráfico com a variação de torque no quinto experimento.

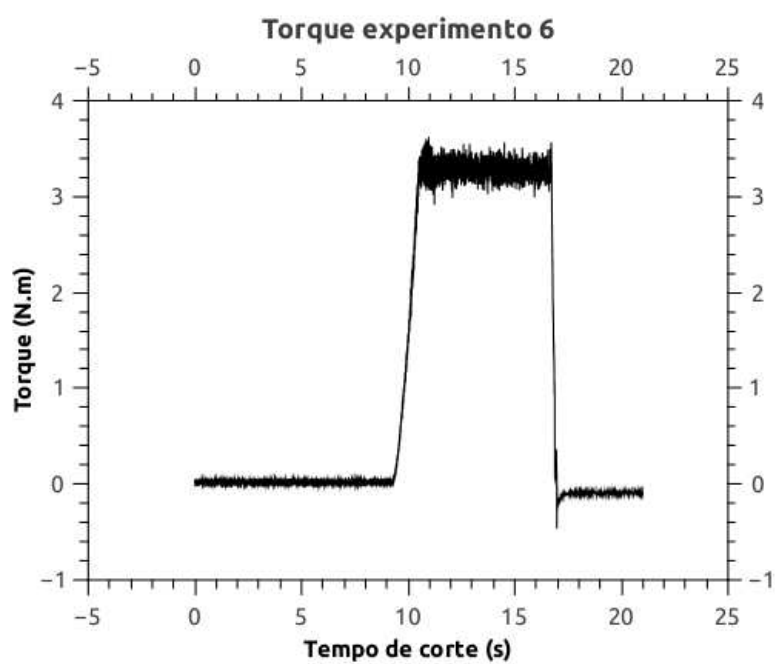


Figura 6.29 – Gráfico com a variação de torque no sexto experimento.

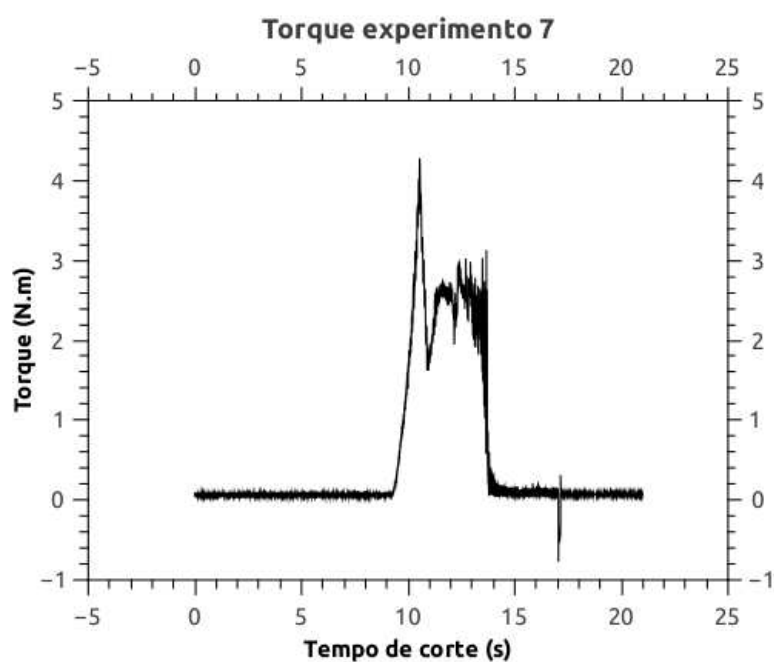


Figura 6.30 – Gráfico com a variação de torque no sétimo experimento.

As figuras 6.31, 6.32 e 6.33 mostram as temperaturas da água para os testes das figuras anteriores.

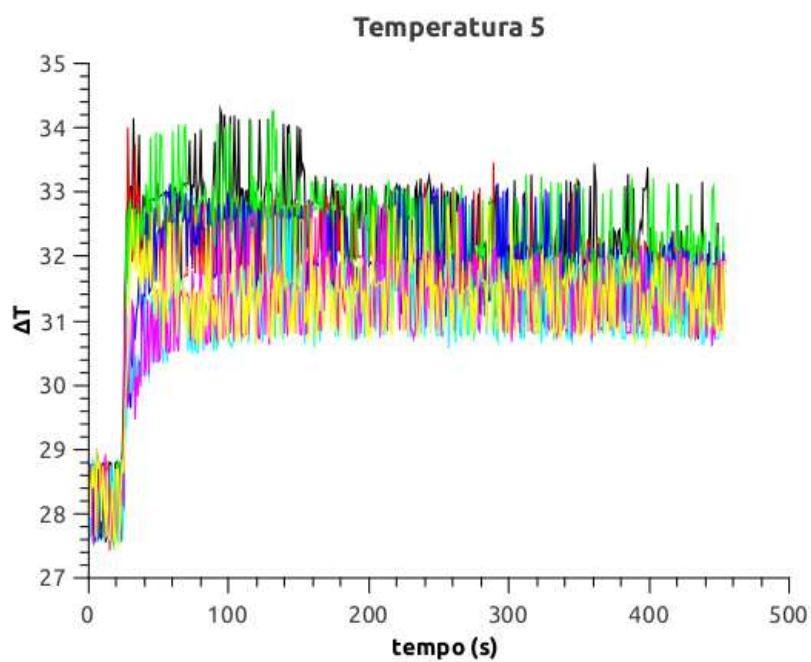


Figura 6.31 – Gráfico com a variação de temperatura no quinto experimento.

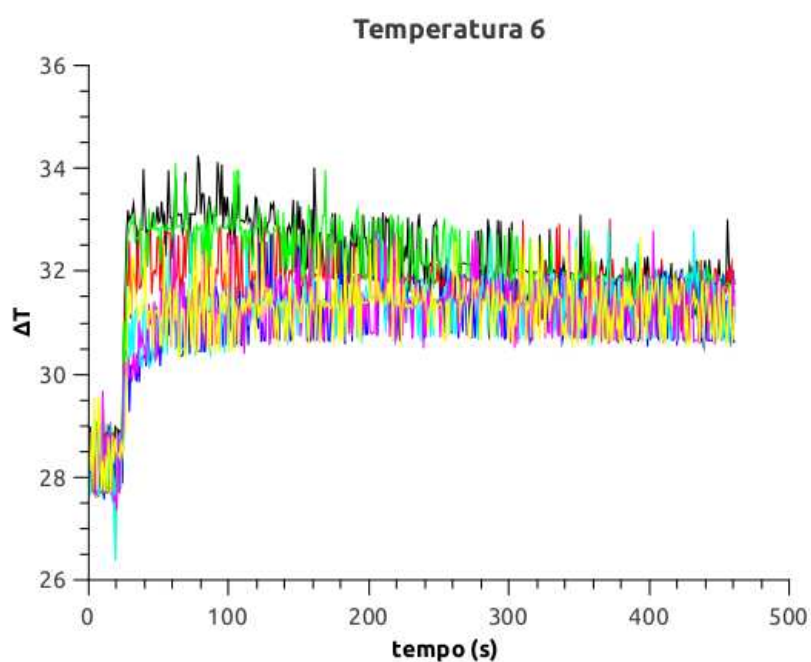


Figura 6.32 – Gráfico com a variação de temperatura no sexto experimento.

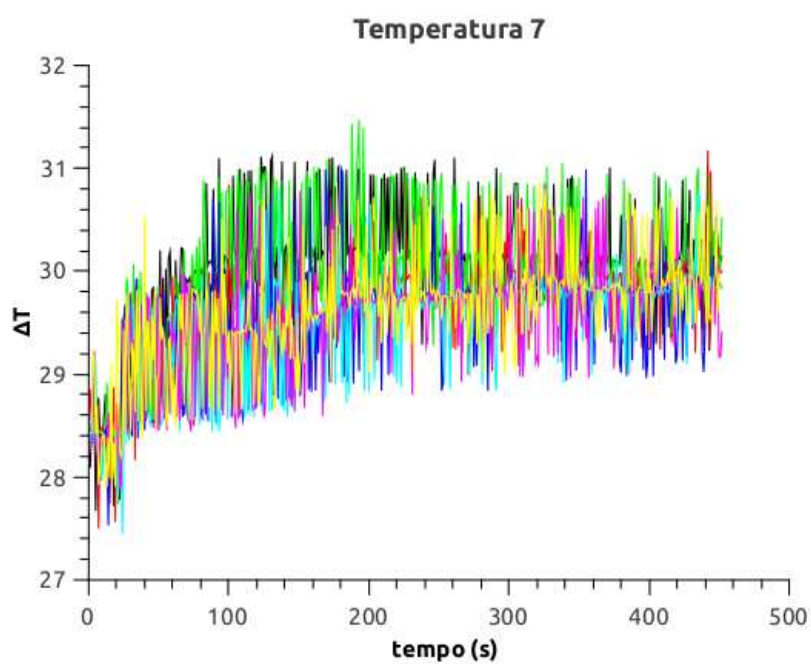


Figura 6.33 – Gráfico com a variação de temperatura no sétimo experimento.

Fazendo os mesmos cálculos anteriores pode-se obter a energia durante a furação e a quantidade de calor para cada um dos testes. Estes resultados são apresentados na Tabela 6.3, que mostra também os resultados dos demais testes.

Ensaio	Torque [N.m]	Força [N]	Calor absorvido [J]	Porcentagem de energia
experimento 1	3,388	338,8	1.525,07	125%
experimento 2	3,287	328,7	1.423,39	120%
experimento 3	3,322	332,2	1.208,76	101%
experimento 4	3,291	329,1	1.276,54	107%
experimento 5	3,321	332,1	1.253,94	104%
experimento 6	3,282	328,2	1.133,45	96%
experimento 7	2,557	255,7	515,89	56%

Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios experimentais usando o segundo calorímetro

Os ensaios experimentais apresentaram uma pequena variação nos valores de torque obtidos em todas as repetições. Algumas discrepâncias se justificam pela composição mista da matriz do ferro fundido cinzento, indicando um gráfico com muitos picos e vales.

Tomando como princípio o gráfico de distribuição de calor no momento da furação, apresentado na figura 2.4, era esperado para esses experimentos que a água deionizada presente no interior do calorímetro absorvesse cerca de 98% de todo o calor gerado durante o ensaio experimental.

Ocorre que os termopares que foram utilizados nesses experimentos, que por sua vez tratam-se de termopares convencionais do tipo K, possuem uma margem de erro de  $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ . Esse limite de erro pode ser o fator que esteja influenciando os resultados obtidos, já que para calcular a quantidade de calor absorvida pela água foi usada a diferença entre a temperatura inicial e final do experimento capturada pelo termopar em questão.

Outro fator importante é a evolução alcançada com a construção do segundo calorímetro. Nos experimentos utilizando o primeiro calorímetro, existia uma perda de calor muito rápida durante o ensaio experimental, que dificultava a leitura do calor gerado. Por outro lado, a leitura feita nos experimentos em que se utilizou o segundo calorímetro mostrou uma conservação de energia bastante evidente, podendo ser observado nos gráficos que apresentam a variação de temperatura no momento da furação.

Além desses fatores, outro detalhe observado é a fixação da peça de ferro fundido no interior do calorímetro, que foi efetivada através de um parafuso M6 de comprimento 10,0 mm em que penetrou aproximadamente 5,0 mm na peça de ferro fundido cinzento. O contato do parafuso com o corpo da peça contribui para a dispersão do calor gerado no local, ou seja faz com que o erro experimental se torne maior.

Outra situação semelhante é referente a fixação da broca no mandril da máquina. A broca, após a furação, fica parada em contato com a peça de ferro fundido no intuito de ceder todo o calor gerado naquele momento para a água deionizada que está ocupando o interior da cuba do calorímetro, porém o contato da broca com o mandril da máquina permite o escoamento de uma pequena parcela do calor presente no sistema broca/peça de ferro fundido, que por sua vez estão em contato, prejudicando também na precisão dos cálculos matemáticos.

Durante a execução do experimento 7 a peça de ferro fundido cinzento se soltou do parafuso e quebrou o fundo do calorímetro, comprometendo a aquisição dos esforços realizados bem como da variação da temperatura sofrida.

Diante dos resultados apresentados, viu-se a necessidade de realizar novos experimentos com o objetivo de corrigir possíveis interferências que possam ter afetado a aquisição dos sinais.

Foram realizados 7 novos testes, nas mesmas condições apresentadas na tabela 6.1. Antes do teste foi avaliado o sinal de temperatura registrada pelo sistema. Também foram preparados 7 termopares e os mesmos foram testados.

Os testes de funcionamento do sistema de medição foram realizados com a máquina fresadora desligada e com a máquina em funcionamento, sem contudo usar o corpo de prova. Os resultados foram considerados adequados para os testes finais.

O erro de medição de temperatura final da água tem uma influência muito grande no cálculo da quantidade de calor.

A seguir são apresentados os resultados dos novos testes, seguindo a mesma metodologia utilizada na apresentação dos resultados anteriores. Nesta etapa não serão apresentados os gráficos do sinal de torque. estes resultados serão mostrados apenas na tabela final, 6.3.

A Figura 6.34 mostra o gráfico com a aquisição do primeiro ensaio.

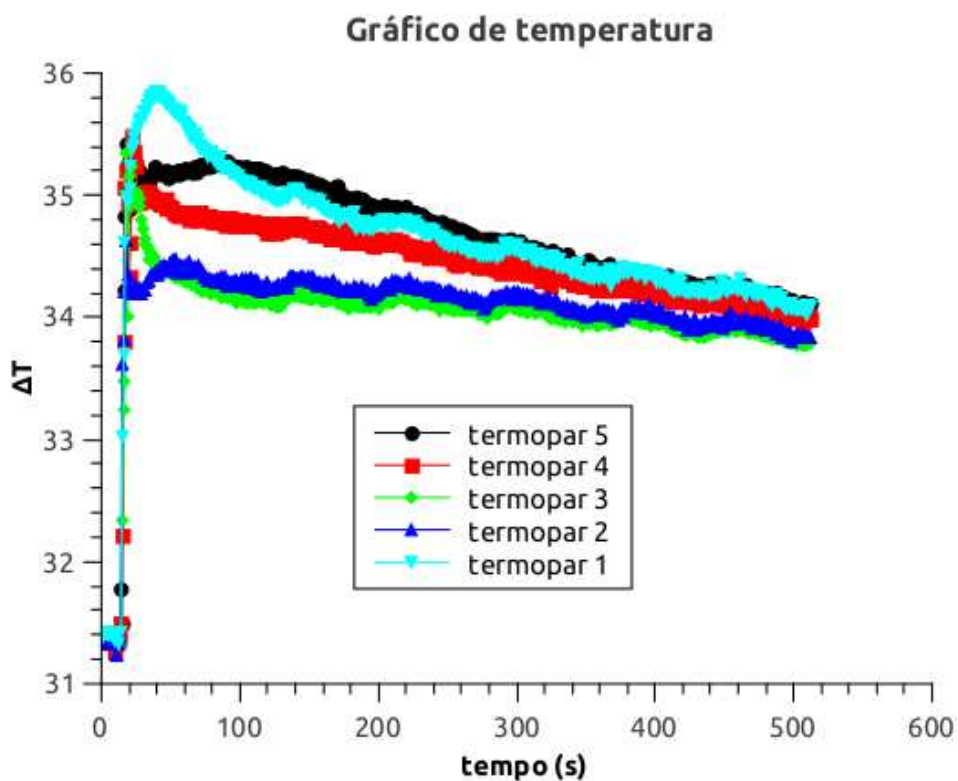


Figura 6.34 – Gráfico com a variação de temperatura no primeiro experimento.

Analisando o comportamento do gráfico e fazendo os cálculos de energia e quantidade de calor, pode-se afirmar que a quantidade de calor absorvida pela água durante o ensaio representa 88,3% da energia total do sistema durante o processo de furação.

Feito um segundo experimento, mostrado na fig. 6.35, foi realizado e obteve-se o seguinte:

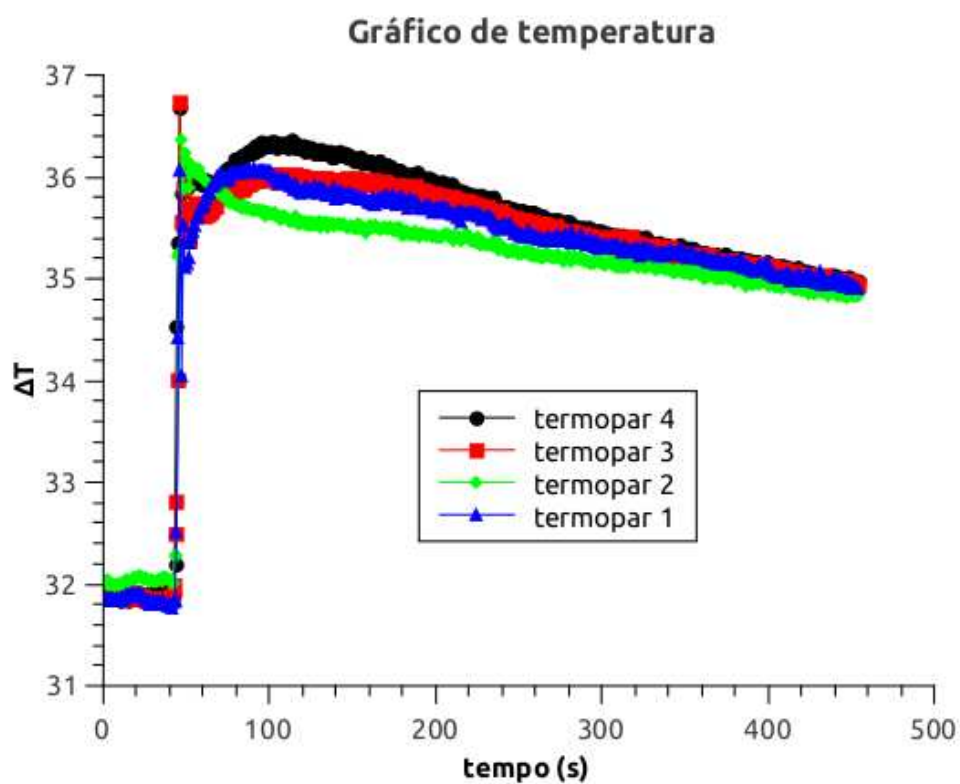


Figura 6.35 – Gráfico com a variação de temperatura no segundo experimento.

Neste experimento a quantidade de calor absorvida pela água durante o ensaio representa a 94% da energia total gerada no sistema.

Foi realizado um novo ensaio conforme apresenta a fig. 6.36.

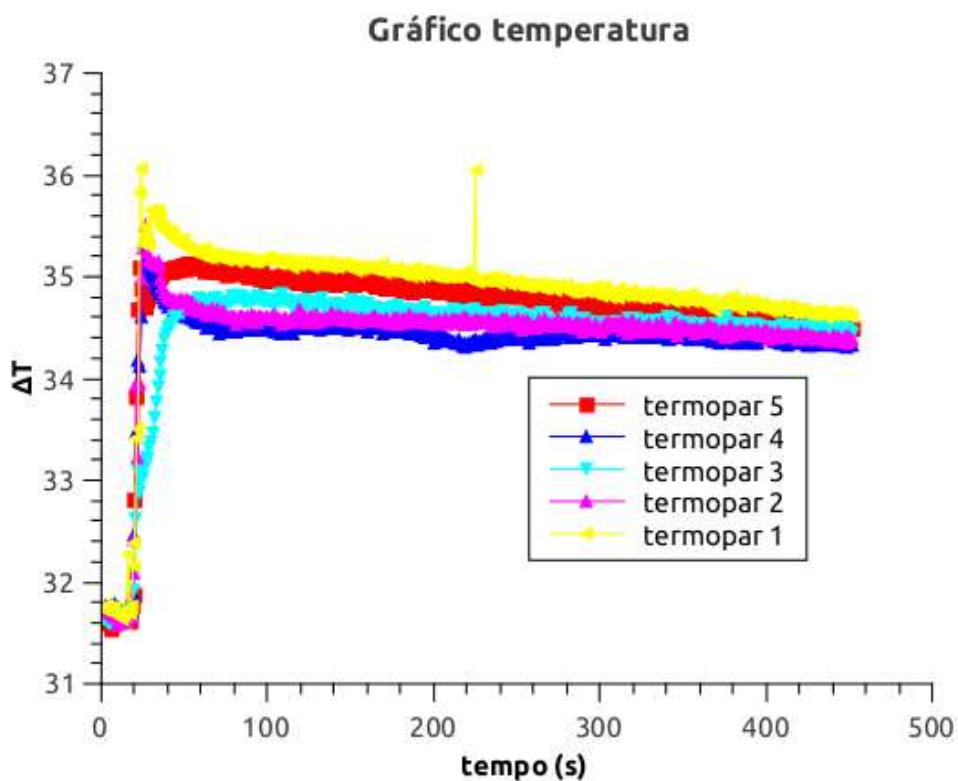


Figura 6.36 – Gráfico com a variação de temperatura no terceiro experimento.

Após fazer os cálculos de energia e calor durante esse experimento, pode-se afirmar que a água absorveu uma quantidade de calor equivalente a 88,4% da energia total gerada no momento da furação.



Realizado uma nova repetição do experimento conforme apresenta a fig. 6.37 e obteve-se:

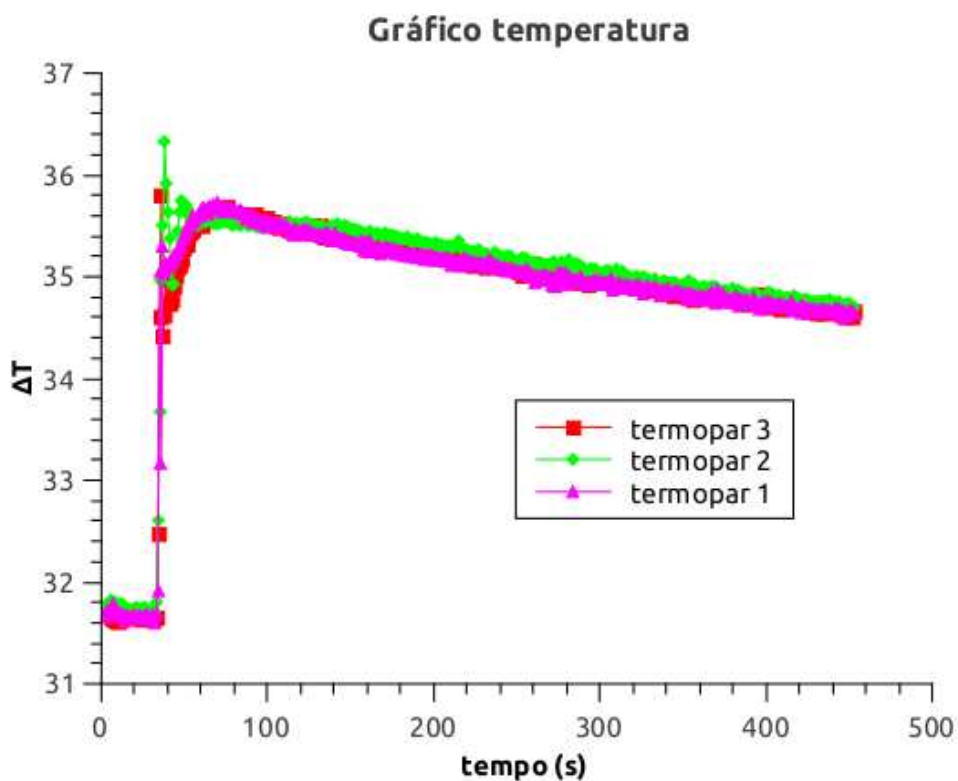


Figura 6.37 – Gráfico com a variação de temperatura no quarto experimento.

Neste experimento obteve-se uma quantidade de calor que representa 95,9% da energia total gerada pelo sistema.

Um novo ensaio foi realizado e apresentado conforme a fig. 6.38.

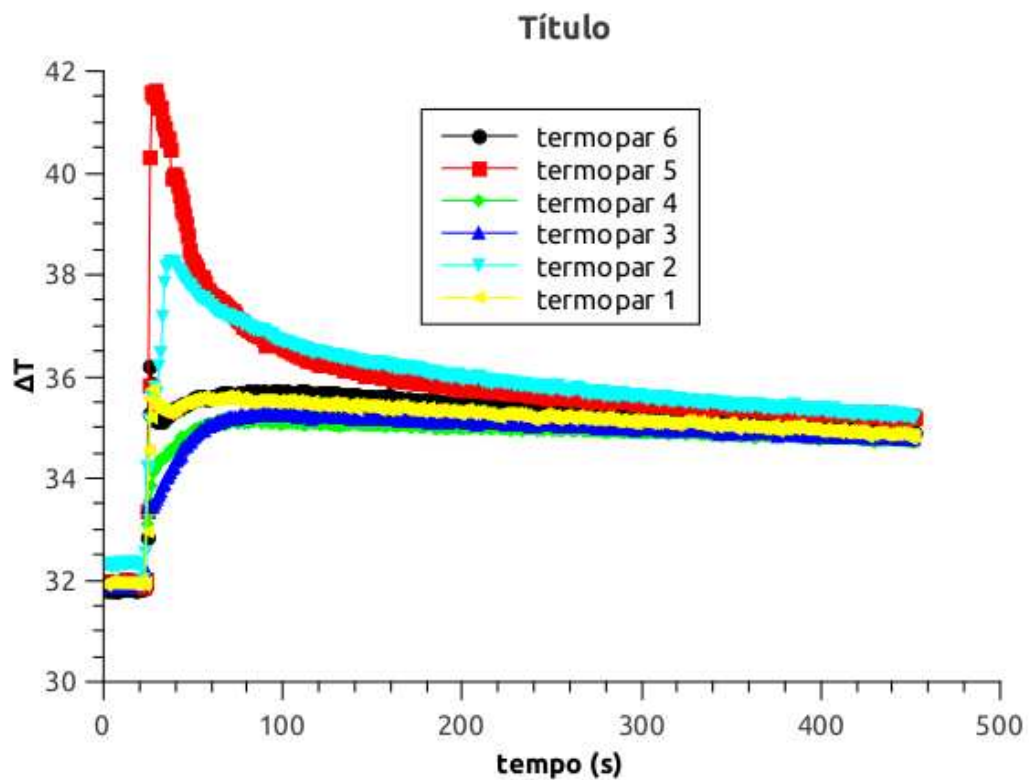


Figura 6.38 – Gráfico com a variação de temperatura no quinto experimento.

Após a realização dos cálculos de energia e calor, viu-se que a quantidade de calor absorvida pela água durante o experimento representa 96,7% da energia total gerada.

Foi realizado um novo ensaio conforme a fig. 6.39.

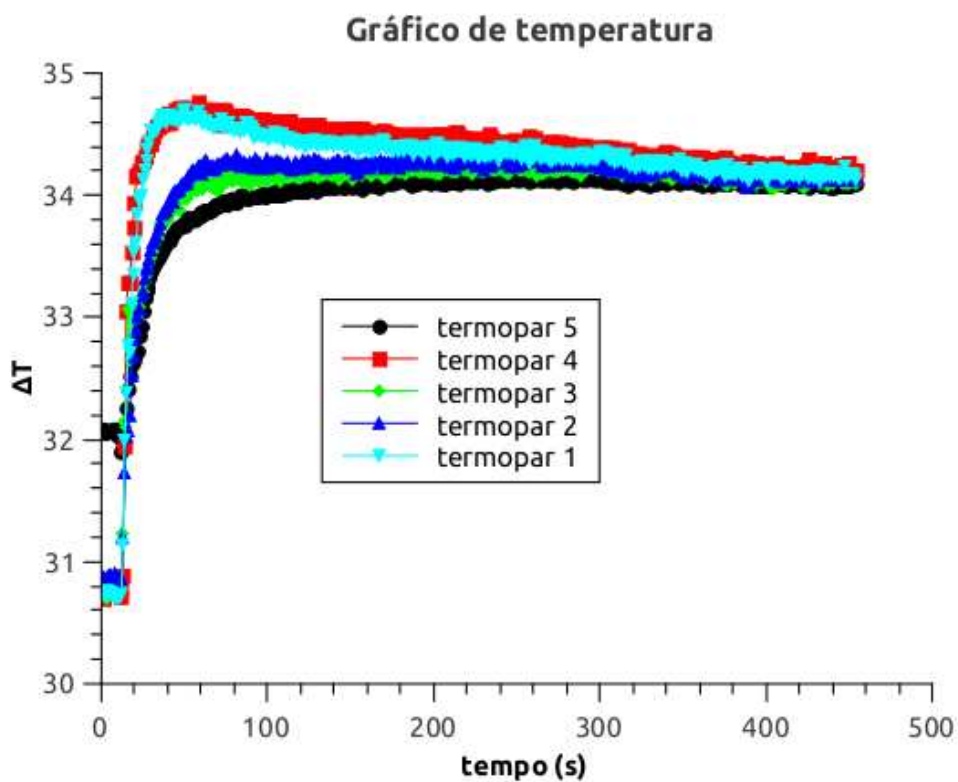


Figura 6.39 – Gráfico com a variação de temperatura no sexto experimento.

Os cálculos mostram que a quantidade de calor absorvida pela água representa 99% da energia total gerada no sistema.

Foi feita uma última repetição do experimento, a qual é mostrada conforme a fig. 6.40.

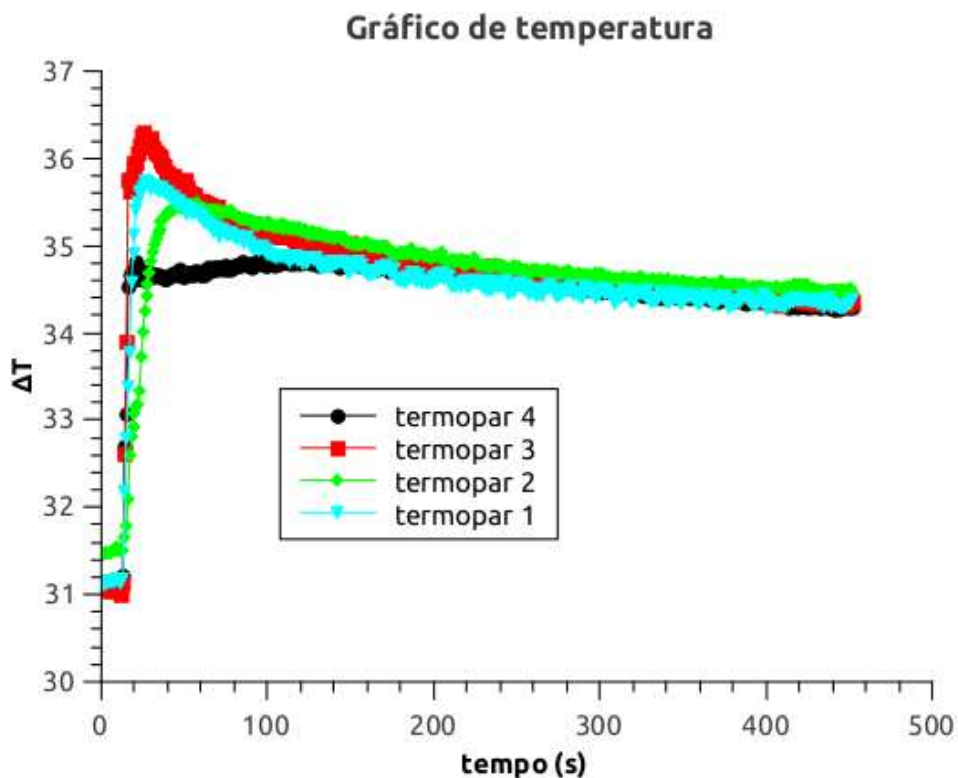


Figura 6.40 – Gráfico com a variação de temperatura no sétimo experimento.

Nesse experimento os cálculos mostram que a água teria absorvido uma quantidade de calor que representa cerca de 92% da energia total do sistema.

A tabela seguinte mostra os valores obtidos nessa segunda bateria de experimentos utilizando o segundo calorímetro.

Ensaaios	Torque [N.m]	Força [N]	Calor absorvido [J]	Porcentagem de energia
experimento 1	3,225	322,5	1028	88,3%
experimento 2	3,233	323,3	1.095,79	94%
experimento 3	3,242	324,2	1.035,54	88,4%
experimento 4	3,23	323	1.118,38	95,9%
experimento 5	3,203	320,3	1.118,38	96,7%
experimento 6	3,237	323,7	1.167,34	99%
experimento 7	3,231	323,1	1.071,77	92%

Tabela 6.3 – Resultados obtido na segunda bateria de experimentais usando o segundo calorímetro

Os resultados obtidos mostrados na tabela 6.3 sugerem que a porcentagem média de energia que se converte em calor é de aproximadamente 93%. O menor valor obtido foi de 88,3% e o maior foi de 99%. Estes resultados estão bem mais coerentes com os valores normalmente encontrados na literatura.

# **CAPÍTULO VII**

## **CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

### **7.1 Conclusões**

Em relação aos objetivos específicos desse trabalho, pode-se afirmar que foram satisfeitos. Durante a execução do trabalho foi possível projetar e construir um calorímetro que pudesse viabilizar a quantificação do calor gerado durante o processo de furação de ferro fundido cinzento e, que pudesse apresentar uma boa condição de conservação de calor.

De posse dos dados obtidos foi possível calcular a energia envolvida em todo o processo de furação de ferro fundido, bem como a quantidade de calor absorvida pela água, que por sua vez recebe o calor absorvido pela peça, pelo cavaco e também pela broca.

O segundo calorímetro construído mostra uma eficiência superior ao primeiro. Essa afirmação pode ser confirmada de acordo com os resultados obtidos na segunda bateria de ensaios usando o segundo calorímetro.

Para que se possa aumentar a precisão dos valores obtidos será preciso um estudo complementar com alguns ajustes, conforme sugestões a seguir.

### **7.2 Trabalhos Futuros**

Visando subsidiar novas pesquisas relacionadas ao estudo da partição de calor no processo de furação, serão apresentadas algumas sugestões que buscam alcançar resultados mais

precisos.

- O tipo do termopar escolhido para o experimento, que possa apresentar uma menor margem de erro;
- projeções de condições de corte que possam gerar uma quantidade maior de calor para facilitar a aquisição do sinal de temperatura e tornar o erro experimental menor;
- a forma com que a peça será fixada no interior do calorímetro, para que se evite a perda de calor para o ambiente;
- projetar uma forma de aumentar a agitação da água no interior do calorímetro, no intuito de homogeneizar a distribuição de calor durante a furação;

## CAPÍTULO VIII

### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABHANG, L. B.; HAMEEDULLAH, M.; Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process. international Journal of Engineering Science and Technology, vol. 2, n. 4, 2010, pp. 382-393.

ALEXANDRE, G. S.; PRADO, G. W. T.; Calorímetro de Gelo: Uma Abordagem histórica e Experimental para o Ensino de Química na Graduação. Química Nova na Escola. vol. 33, n. 9, 2010, pp. 4.

ARAÚJO, A. C. M.; Estudo das Forças de Usinagem no Fresamento de Topo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

ANDRADE, C. L. F.; Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN, volume Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Florianópolis, 2005.

ATIKINS, P.; JONES, L.; Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente. Bookman, Porto Alegre, 3ª edição, 2006.

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.

BAGHERI, M.; MOTTAGHIZADEH, P.; Analysis of Tool-Chip Interface Temperature With Fem and Empirical Verification. World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 6, 2012, pp. 8-20.

BOOTHROYD, G.; Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools. Hemisphere, Washington - USA, 1975.

BORDIN, F. M.; NABINGER, E.; ZEILMANN, R. P.; Relação Entre o Desgaste e a Força de Avanço na Determinação do Fim de Vida Efetivo de Uma Broca helicoidal. Anais VI COBEF, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, vol. 1, 2011, pp. 1-9.

BRAGA, P. S. T.; Processos de Fabricação. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial SENAI, Vitória, 1999.

BREDA, E. M.; Água Grau Reagente Para Laboratório e Outros Fins Especiais. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2011.

BRANDÃO, L. C.; COELHO, R. T.; Temperature and Heat Flow When Tapping of the Harden Steel Using Different Cooling System. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 17, n. 2, 2009, pp. 267-274.

CHAGAS, A. P. A.; "Mémoire sur la Chaleur" de Lavoisier e Laplace e os inícios da termodinâmica química. Química Nova na Escola, vol. 15, n. 3, 1992, pp. 269-273.

CHAO, B.; TRIGGER, K.; An Analytical Evaluation of Metal Cutting Temperature. Transactions ASME, vol 73, 1951, pp. 57-68.

COSTA, E. S.; Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido (MQF). Tese de Doutorado - UFU, Uberlândia - MG, 2004.

CUNHA, A. P. S.; JOSÉ, L. A. C.; VASCONCELOS, M. N.; Análise das Forças de Corte no Processo de Furação da Liga Sanicro. Projeto final 2008 CEFET - RJ, Rio de Janeiro, 2008.

D'ERRICO, G. E.; An Adaptive System For Turning Process Control Based on Tool Temperature Feedback. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 78, n. 1, 1998, pp. 43-47.

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

FATA, A.; RAZFAR, M. R.; Measurement Tool Temperature by Finite Elements Methods. 15th Annual International Iranian Mechanical Engineering Conference, Irã, 2007.

FERRARESI, D.; Fundamentos da Usinagem dos Metais. Editora Edgard Blucher LTDA, São Carlos, 1ª edição, 1969.

FRANÇA, J. A.; Sistemas de Aquisição de Dados Baseados em Microcontroladores. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande - PB, 1997.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.; Fundamentos de Física. LTC, Rio de Janeiro, vol. 1, 2008.

HERSKOWICZ, G.; PENTEADO, P. C. M.; SCOLFARO, V.; Curso Completo de Física. Editora Moderna, São Paulo, 1991.

KÖNIG, W.; KLOCK, F.; Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren. Springer, Berlin, 5ª edição, 1997.

LOEWEN, E. G.; SHAW, M. C.; Analysis of Cutting Tool Temperature. Transactions of the ASME, vol 76, n. 1, 1954, pp. 217-231.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; Teoria da Usinagem dos Materiais. Editora Blucher, São Paulo, 1ª edição, 2009.

MULLER-HUMMED, P.; LAHR'S, M.; A New Instrument to Optimize Cutting Process, in Situ Temperature Measurement on Diamond Coated Tools. Innovations in Material Research, vol. 1, n. 1, 1996, pp. 1-9.

NASCIMENTO, C. H.; LUCHESI, V. M.; COELHO, R. T.; Estudo Teórico-Experimental da Condução de Calor na Região de Formação de Cavacos Usando Métodos Analíticos e Numéricos. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande - PB, 2010.

NATIONAL Instruments 15B, Editor. IEEE 488 and VXIbus Control, Data Acquisition, and Analysis. National Instruments 15B, 1993.

POTTER, D.; Measuring Temperature With Thermocouples: A Tutorial. Technical Report, National Instruments, 1996.

RODOLFO, J.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W.; Tecnologia do PVC. Editora Braskem, São Paulo, 2ª edição, 2006.

ROSA, T. S.; Curso Técnico em Eletromecânica, Instrumentação e Controle. Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, 2009.

SCHRÖETER, R.; WINGERTNER, W. L.; Processos de usinagem e Ferramentas de Corte. Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Florianópolis, 1ª edição, vol 1, 2001.

SOUSA, P. F. B.; Estudos de Processos Térmicos Decorrentes da Usinagem: Aplicação de Proble-

mas Inversos em Furação. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia MG, 2009.

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

STEIN, P. K.; The Unifield Approach to the Engineering of Measurement Systems for Test and Evaluation, Volume Technical Report. Stein Engineering Services, 1992.

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

TAY, A.; STEVENSON, M.; Using the Finite Element Method to Determine Temperature Distributions in Orthogonal Machining. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, vol 188, 1974, pp 627-638.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K.; Metal Cutting. Butterworth Heinemann, Woburn, Massachusetts USA, 4<sup>a</sup> edição, 2000.