



**Henrique Ajuz Holzmann  
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia  
(Organizadores)**

# Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica 3

**Atena**  
Editora  
Ano 2019

**Henrique Ajuz Holzmann**  
**Ricardo Vinicius Bubna Biscaia**  
(Organizadores)

**Impactos das Tecnologias na  
Engenharia Mecânica**  
**3**

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Lorena Prestes e Geraldo Alves

Revisão: Os autores

### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

I34 Impactos das tecnologias na engenharia mecânica 3 [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, Ricardo Vinicius Bubna Biscaia. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica; v.3)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN 978-85-7247-248-7

DOI 10.22533/at.ed.487190504

1. Automação industrial. 2. Engenharia mecânica – Pesquisa – Brasil. 3. Produtividade industrial. 4. Tecnologia. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Biscaia, Ricardo Vinicius Bubna. III. Série.

CDD 670.427

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

## APRESENTAÇÃO

A engenharia mecânica está em constante mudança, sendo uma das mais versáteis, se olhar desde seu surgimento durante a Revolução Industrial até os dias de hoje é visível a modernização e modificação dos métodos e das tecnologias empregadas.

Nesta evolução um dos pontos de destaque é a área de materiais e dos modos de obtenção dos mesmos, sendo responsável por grande parte desta modernização da área. Neste livro são tratados alguns assuntos ligados diretamente a área de matérias, bem como os processos de transformação dos mesmos em produtos finais.

A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas de desempenho técnico e econômico. Ainda são base da formação do engenheiro projetista cujo ofício se fundamenta na correta escolha de materiais e no processo de fabricação do mesmo.

Um compendio de temas e abordagens que constituem a base de conhecimento de profissionais que se dedicam a seleção, desenvolvimento e processos de obtenção e fabricação são apresentados nesse livro.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann  
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DAS LIGAS Al-3%Si E Al-9%Si ATRAVÉS DO PROCESSO “SQUEEZE-CASTING”, E A INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA DUREZA, MACRO E MICROESTRUTURA	
<i>Diógenes Linard Aquino Freitas</i> <i>Cláudio Alves de Siqueira Filho</i> <i>José Joelson de Melo Santiago</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4871905041</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>12</b>
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CEMENTANTES ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE MICRODUREZA VICKERS	
<i>Bernardo Rota</i> <i>Alisson Geovane Silva de Souza</i> <i>Annemarie Henker</i> <i>Daniel Amoretti Gonçalves</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4871905042</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>22</b>
ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO USANDO O MÉTODO DO FIO QUENTE	
<i>Alisson Augusto Azevedo Figueiredo</i> <i>Jefferson Gomes do Nascimento</i> <i>Luís Henrique da Silva Ignácio</i> <i>Vinicius Soares Medeiros</i> <i>Fernando Costa Malheiros</i> <i>Henrique Coelho Fernandes</i> <i>Gilmar Guimarães</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4871905043</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>27</b>
PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE NANOFUIDOS TiO <sub>2</sub>	
<i>Letícia Raquel de Oliveira</i> <i>Stella Rodrigues Ferreira Lima Ribeiro</i> <i>David Fernando Marcucci Pico</i> <i>Alessandro Augusto Olimpio Ferreira Vittorino</i> <i>Enio Pedone Bandarra Filho</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4871905044</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>35</b>
DESENVOLVIMENTO DE UM INDENTADOR INSTRUMENTADO PARA MEDIÇÕES DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS E PLÁSTICAS	
<i>Lucas dos Reis Heni Madeira</i> <i>Vinicius Carvalho Teles</i> <i>Washington Martins da Silva Junior</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4871905045</b>	

**CAPÍTULO 6 ..... 43**

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL EM HIDROXIAPATITA COMERCIAL E SINTETIZADA PELO MÉTODO SOL-GEL UTILIZANDO CASCA DE OVO DE GALINHA COMO PRECURSOR

*Marcelo Vitor Ferreira Machado*  
*José Brant de Campos*  
*Marilza Sampaio Aguilar*  
*Vitor Santos Ramos*

**DOI 10.22533/at.ed.4871905046**

**CAPÍTULO 7 ..... 53**

PARAMETRIZAÇÃO DE TEXTURIZAÇÃO VIA MECT EM METAL PATENTE

*Túlio Alves Rodrigues*  
*Erika Michele Damas*  
*Gabriela Caixeta Alcarria*  
*Náthaly Nascimento Sousa*  
*Washington Martins da Silva Junior*

**DOI 10.22533/at.ed.4871905047**

**CAPÍTULO 8 ..... 59**

CORRELAÇÃO ENTRE DIFERENTES FORMAS DE AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DE FERROS FUNDIDOS E SEU COEFICIENTE DE ATRITO

*Luiz Eduardo Rodrigues Vieira*  
*Guilherme de Oliveira Castanheira*  
*Leonardo Rosa Ribeiro da Silva*  
*Wisley Falco Sales*  
*Álisson Rocha Machado*  
*Wilson Luiz Guessser*

**DOI 10.22533/at.ed.4871905048**

**CAPÍTULO 9 ..... 69**

MANUFATURA DE LIGA DE AL5%CU PELO PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ

*André Pereira da Silva*  
*Juliano de Lemos Navarro*  
*Leonardo Almeida Lopes*  
*Felipe Antônio Viana de Araújo*  
*Gabriel Aires Honorato*  
*Sérgio Mateus Brandão*

**DOI 10.22533/at.ed.4871905049**

**CAPÍTULO 10 ..... 85**

ANÁLISE DO FENÔMENO DAS BOLHAS EM SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA COM ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO

*Camilla Mara Mendonça*  
*Alexandre Queiroz Bracarense*  
*Douglas de Oliveira Santana*  
*Marcelo Teodoro Assunção*

**DOI 10.22533/at.ed.48719050410**



<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>99</b>
O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES DE SOLDAGEM	
<i>Heitor Abdias da Silva Pereira</i>	
<i>Marcelo Cavalcanti Rodrigues</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.48719050411</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>114</b>
ANÁLISE EXPERIMENTAL DA USINAGEM COM AÇO INOXIDÁVEL	
<i>Gabriella Arruda Martins</i>	
<i>Lays Edinir da Cunha</i>	
<i>Luís Gustavo Moreira</i>	
<i>Mikael Henrique Morais</i>	
<i>Thomas Ernst de Goes Ferreira Kohler</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.48719050412</b>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>123</b>
AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO DE RUGOSIDADE $R_v$ DE CILINDROS DE BLOCOS DE COMPRESSORES HERMÉTICOS USINADOS PELO PROCESSO DE BRUNIMENTO FLEXÍVEL	
<i>Leandro Carvalho Pereira</i>	
<i>Leonardo Rosa Ribeiro da Silva</i>	
<i>Rosenda Valdés Arencibia</i>	
<i>Luciano José Arantes</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.48719050413</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>131</b>
INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NO DESGASTE DE MICROFRESAS DE METAL DURO NA MICROUSINAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205	
<i>Aline Gonçalves dos Santos</i>	
<i>Daniel Fernandes da Cunha</i>	
<i>Mayara Fernanda Pereira</i>	
<i>Bruno Souza Abrão</i>	
<i>Mark James Jackson</i>	
<i>Márcio Bacci da Silva</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.48719050414</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>139</b>
GERAÇÃO E PARTIÇÃO DE CALOR EM USINAGEM POR MEIO DO MÉTODO CALORIMÉTRICO: UMA REVISÃO	
<i>Ivanilson Sousa da Costa</i>	
<i>Márcio Bacci da Silva</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.48719050415</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>153</b>
GERAÇÃO DE CALOR NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO POR MEIO DO MÉTODO CALORIMÉTRICO	
<i>Ivanilson Sousa da Costa</i>	
<i>Guilherme Henrique Alves Andrade</i>	
<i>Márcio Bacci da Silva</i>	

**DOI 10.22533/at.ed.48719050416**

**CAPÍTULO 17 ..... 168**

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE USINAGEM EM AÇOS DE CORTE FÁCIL POR MEIO DO MÉTODO DO TERMOPAR FERRAMENTA- PEÇA

*Ivanilson Sousa da Costa*

*Márcio Bacci da Silva*

**DOI 10.22533/at.ed.48719050417**

**CAPÍTULO 18 ..... 177**

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA NO PROCESSO DE FRESAMENTO UTILIZANDO SENSORES POR EFEITO HALL

*Leonardo Rosa Ribeiro da Silva*

*Kenji Fabiano Ávila Okada*

*Gabriel Marçal de Carvalho*

*Eder Silva Costa*

*Álisson Rocha Machado*

**DOI 10.22533/at.ed.48719050418**

**CAPÍTULO 19 ..... 187**

INFLUÊNCIA DE VÁRIOS PARÂMETROS OPERACIONAIS EM RETIFICAÇÃO NO ACABAMENTO E NA TEXTURA DA SUPERFÍCIE DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

*Bruno Souza Abrão*

*Mayara Fernanda Pereira*

*Mariana Landim Silveira Lima*

*Eduardo Carlos Bianchi*

*Rosemar Batista da Silva*

**DOI 10.22533/at.ed.48719050419**

**CAPÍTULO 20 ..... 193**

INFLUÊNCIA DA PENETRAÇÃO DE TRABALHO E VELOCIDADE DA PEÇA NO ACABAMENTO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR APÓS A RETIFICAÇÃO COM REBOLO DE SIC

*Lurian Souza Vieira da Silva*

*Rosemar Batista da Silva*

*Mariana Landim Silveira Lima*

*Deborah de Oliveira*

**DOI 10.22533/at.ed.48719050420**

**CAPÍTULO 21 ..... 202**

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM DO BRUNIMENTO FLEXÍVEL NA QUALIDADE GEOMÉTRICA DE CILINDROS DE BLOCOS DE COMPRESSORES HERMÉTICOS

*Leandro Carvalho Pereira*

*Leonardo Rosa Ribeiro da Silva*

*Rosenda Valdés Arencibia*

*Luciano José Arantes*

**DOI 10.22533/at.ed.48719050421**



<b>CAPÍTULO 22 .....</b>	<b>210</b>
USINAGEM ELETROQUÍMICA SUPERFICIAL EM AMOSTRAS DE FERRO FUNDIDO	
<i>Leonardo Rosa Ribeiro da Silva</i>	
<i>Leandro Carvalho Pereira</i>	
<i>Henara Lilian Costa</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.48719050422</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR.....</b>	<b>219</b>

## GERAÇÃO DE CALOR NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO POR MEIO DO MÉTODO CALORIMÉTRICO

### Ivanilson Sousa da Costa

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade  
de Engenharia Mecânica  
Uberlândia – Minas Gerais

### Guilherme Henrique Alves Andrade

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade  
de Engenharia Mecânica  
Uberlândia – Minas Gerais

### Márcio Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade  
de Engenharia Mecânica  
Uberlândia – Minas Gerais

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo explicar uma metodologia calorimétrica para medição do calor gerado durante a furação de ferro fundido cinzento. O calorímetro empregado consistiu de dois recipientes cilíndricos coaxiais encaixados entre si, o externo fabricado em Poliamida 6.6 e o interno fabricado em policloreto de vinila. Termopares foram utilizados para contínua medição das temperaturas no interior do calorímetro. Testes experimentais foram realizados e confirmaram a aplicabilidade da metodologia empregada para avaliação da energia mecânica transformada em energia térmica em usinagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** calor, furação, calorímetro, ferro fundido cinzento.

**ABSTRACT:** This paper is concerned with a calorimetric methodology for the measurement of the heat generated during the grey cast iron drilling. Calorimeter used consisted of two cylindrical containers fitted together, the external one made of Polyamide 6.6 and the internal one made of Polyvinyl chloride. Thermocouples were used to continuously measure the temperatures inside the calorimeter. Tests were performed and confirmed the applicability of the methodology used to evaluate the mechanical energy transformed into thermal energy in machining.

**KEYWORDS:** heat, drilling, calorimeter, grey cast iron.

### 1 | INTRODUÇÃO

A literatura científica tem sido unânime em afirmar que a maior parte da energia consumida na usinagem dos metais é convertida em calor próximo à aresta de corte da ferramenta (Silva; Wallbank, 1999; Komanduri; Hou, 2001) e vários métodos experimentais, analíticos e numéricos foram propostos para medição ou avaliação desse calor. Um desses é o método calorimétrico, técnica experimental na qual todas as trocas térmicas inerentes ao processo de usinagem são confinadas no interior de um

calorímetro.

Pesquisadores tem apresentado importantes resultados obtidos por meio desse método, em diversas configurações de calorímetros, processos de usinagem e materiais usinados (Komanduri; Hou, 2001; Quan; He; Dou, 2008; Denkena; Ammermann; Niederwestberg, 2012; Silva; 2015; Costa; Borba-Júnior; Silva, 2018).

O objetivo deste trabalho é explanar uma metodologia para medição do calor gerado durante o processo de furação de ferro fundido cinzento por meio do método calorimétrico.

## 2 | METODOLOGIA

### 2.1 Calorímetro

Neste trabalho foi utilizado o calorímetro desenvolvido por Silva (2015), que consiste de dois recipientes cilíndricos coaxiais encaixados entre si. O recipiente externo foi fabricado em Poliamida 6.6 em (nome comercial Technyl®) e o recipiente interno foi fabricado em policloreto de vinila (PVC). O recipiente externo possui um rebaixo para fixação do recipiente interno que, por sua vez, possui um rebaixo para fixação do corpo de prova.

A Poliamida 6.6 e o PVC foram selecionados por suas características de má condução de calor, baixo custo e disponibilidade. A condutividade térmica da Poliamida 6.6, a 23 °C, é de 0,23 W/m.K (Incomplast, 2018). A condutividade térmica do PVC é de 0,21 W/m.K (Macedo Plásticos, 2018).

A tampa do calorímetro foi fabricada em Poliamida 6.6 e encaixa-se com o recipiente interno, sendo fixada ao recipiente externo do calorímetro por quatro parafusos. Foram usinados quatro furos de 2 mm de diâmetro na tampa para a passagem dos termopares. No recipiente interno do calorímetro foi adicionado 90 ml de fluido do calorímetro. Todos os componentes do calorímetro e suas dimensões estão apresentados na Fig. (1) e na Tab. (1).

Silva (2015) utilizou a água deionizada como fluido calorimétrico, neste trabalho foi utilizado a água destilada. Para minimizar as perdas de energia térmica por convecção natural, foram adicionados blocos de poliestireno expandido (nome comercial Isopor®) de aproximadamente 13,6 mm de espessura entre os dois recipientes do calorímetro. A condutividade térmica do poliestireno expandido é de 0,038 W/m.K (Netzsch, 2018).

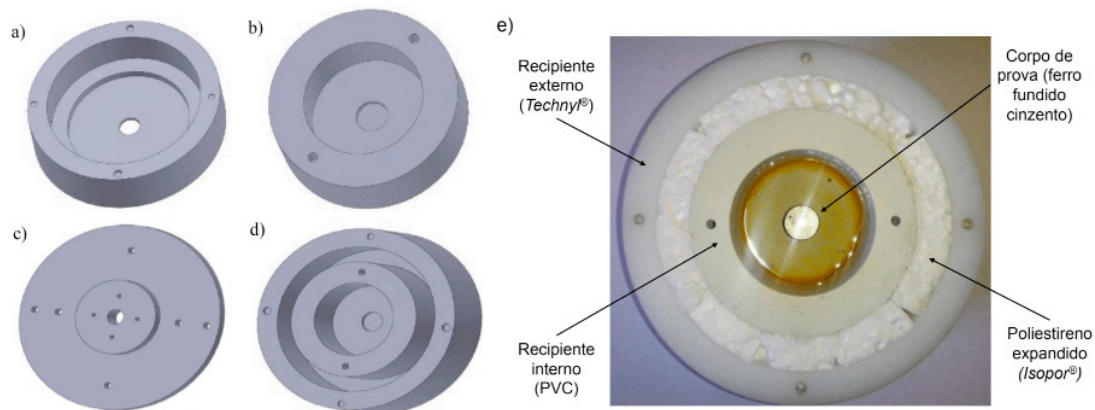


Figura 1. Componentes do calorímetro: a) recipiente externo; b) recipiente interno; c) tampa do calorímetro; d) recipiente interno e externo encaixados (adaptado de Silva, 2015); e) calorímetro com a peça a ser usinada fixada

Componente	Ø externo (mm)	Ø interno (mm)	Ø rebaixo (mm)	Altura (mm)
Recipiente externo (Poliamida 6.6)	150	122	95	66
Recipiente interno (PVC)	95	60	16	55
Tampa (Poliamida 6.6)	150	-	60 <sup>(1)</sup>	5

Tabela 1. Dimensões dos componentes do calorímetro

<sup>(1)</sup>: No caso da tampa, a dimensão corresponde a um ressalto.

## 2.2 Porcentagem total da energia mecânica transformada em energia térmica

Para avaliação da porcentagem total da energia mecânica transformada em energia térmica foi utilizada a metodologia que se segue.

Os corpos de prova utilizados foram peças cilíndricas de ferro fundido cinzento com 16 mm de diâmetro e 30 mm de altura. O corpo de prova foi fixado no rebaixo do recipiente interno do calorímetro por um parafuso, conforme a Fig.(1)(e). Na Fig.(2) é apresentada a configuração final do calorímetro, com o corpo de prova no seu interior.

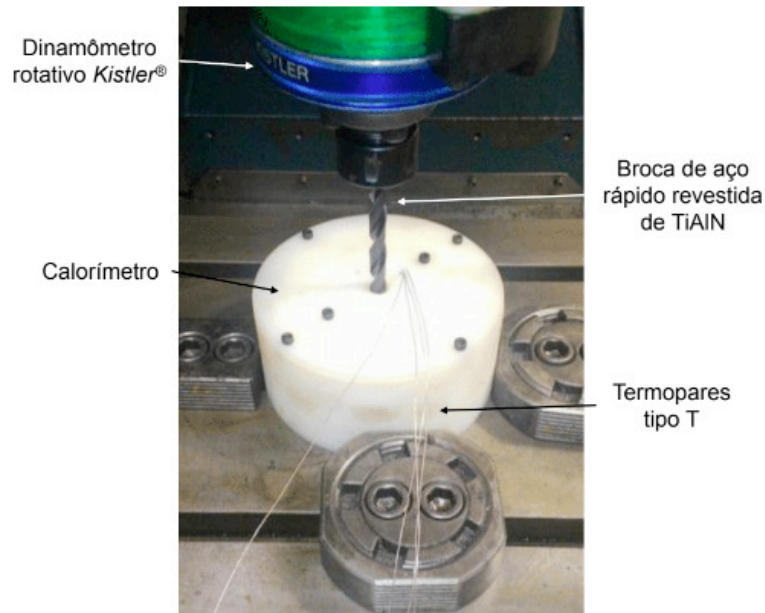


Figura 2. Configuração final do calorímetro na máquina-ferramenta

Para medição de temperaturas foram utilizados termopares tipo T inseridos no interior do calorímetro para contínuo monitoramento da temperatura do fluido calorimétrico. Uma unidade de aquisição, comutação e registro de dados Keysight Technologies® modelo 34970A comandado pelo programa computacional Agilent BenchLink Data Logger 3 foi utilizada para registro dos sinais de temperatura.

Para medição dos esforços de furação foi utilizado um dinamômetro rotativo Kistler® modelo 9123C1211, com condicionador de sinal de multicanal Kistler®. O dinamômetro foi fixado no mandril da máquina, transmitindo os sinais de força e torque por telemetria.

A ferramenta de corte utilizada foi uma broca helicoidal de corte a direita com duas arestas cortantes de aço rápido revestida de TiAlN (nitreto de titânio e alumínio) e diâmetro de 10 mm.

A máquina-ferramenta utilizada para realização dos testes de furação foi um Centro de Usinagem Romi® Discovery CNC 760 com potência do motor principal de 11 kW e rotação máxima de 10.000 rpm.

Foram realizados testes em duas etapas, ambas com termopares soldados no corpo de prova e termopares no interior do calorímetro monitorando a temperatura da água: primeiramente os testes foram realizados retrocedendo a broca no fim de curso da ferramenta, não permitindo a troca de calor no interior do calorímetro (testes denominados “A”). Em seguida, foi permitida a troca de calor da ferramenta no interior do calorímetro, admitindo que a ferramenta de corte permanecesse no fim de curso (testes denominados “B”).

Os termopares que monitoraram as temperaturas do corpo de prova foram

soldados perpendicularmente à superfície, em linha reta, conforme a Fig. (3). As posições de soldagem, medidas pelo comprimento do termopar até à face superior, foram medidas com paquímetro analógico (resolução de 0,05 mm). Foram inseridos dois termopares para medição da temperatura da água, na posição vertical e 25 mm de distância desde a tampa do calorímetro até o interior do calorímetro.

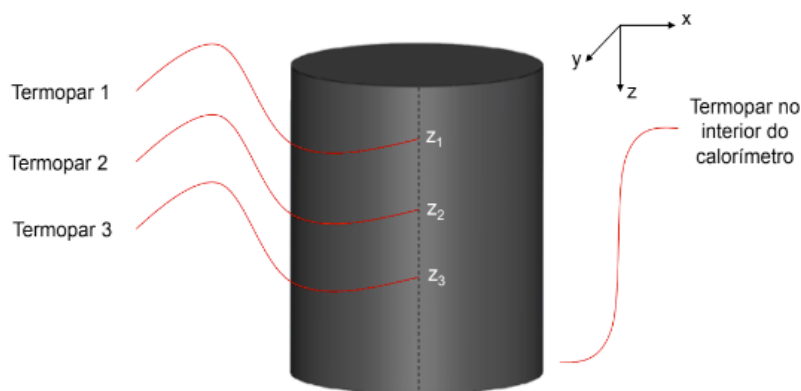


Figura 3. Posição de soldagem dos termopares no corpo de prova

Os parâmetros de usinagem utilizados foram: velocidade de corte de 30 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade do furo de 15 mm. Durante a furação não foi utilizado fluido de corte, contudo, o volume de fluido no interior do calorímetro foi suficiente para submergir totalmente a peça e, conseqüentemente, a zona de corte.

Testes adicionais foram realizados com o intuito de avaliar a aplicabilidade do calorímetro na medição das partições de calor em usinagem: a quantidade de calor que é transferida para a peça, para os cavacos e para a ferramenta de corte. Assim, o teste denominado “C” foi proposto com o objetivo de obter a porcentagem de calor dissipado pela ferramenta de corte ( $Q_{fer}$ ).

Foi realizada a furação com o corpo de prova fixado fora do calorímetro e, imediatamente após a usinagem, a ferramenta de corte foi imersa no interior do calorímetro. Dentro do calorímetro foram inseridos três termopares para medição da temperatura do fluido calorimétrico, na posição vertical a 25 mm de distância desde a tampa. O volume de 90 ml de água destilada foi adicionado como fluido do calorímetro.

Para estes testes adicionais os parâmetros de usinagem utilizados foram: velocidade de corte de 30 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade do furo de 15 mm. Não houve utilização de fluido de corte.

### 2.3 Estimativa da porcentagem de energia mecânica transformada em energia térmica

Para estimativa da porcentagem de energia mecânica transformada em energia térmica, foram utilizadas as equações que se seguem. Esta metodologia foi baseada no trabalho de Silva (2015) e Costa; Borba-Júnior; Silva (2018). A avaliação das trocas de calor no interior do calorímetro foi realizada por meio da equação fundamental da

Calorimetria, Eq.(1).

$$Q = m \cdot c \cdot (T_f - T_i) \quad (1)$$

A quantidade de energia térmica gerada durante o processo ( $Q_{tot}$ ) é calculada pelo somatório da quantidade de energia térmica recebida pelo fluido calorimétrico ( $Q_f$ ) e das quantidades de energia térmica absorvidas, após o equilíbrio térmico, pelo corpo de prova ( $Q'_p$ ), cavacos ( $Q'_c$ ) e ferramenta ( $Q'_{fer}$ ), todos no interior do calorímetro. Uma parcela adicional ( $Q_{perd}$ ) sintetiza as perdas de calor associados à capacidade térmica do calorímetro não ideal e outra parcela ( $Q_{cal}$ ) reúne a energia térmica absorvida pelo calorímetro, Eq.(2).

$$Q_{tot} = Q_f + Q'_p + Q'_c + Q'_{fer} + Q_{cal} + Q_{perd} \quad (2)$$

A quantidade de energia absorvida pela peça no interior do calorímetro após o equilíbrio térmico ( $Q'_p$ ) é calculada por meio da Eq.(1), onde  $m$  é a massa da peça,  $T_f$  é a média das temperaturas finais dos termopares soldados na peça, após o equilíbrio térmico e  $T_i$  é a média das temperaturas iniciais dos termopares soldados na peça.

De forma semelhante, a quantidade de energia absorvida pelos cavacos após o equilíbrio térmico ( $Q'_c$ ) é calculada por meio da Eq.(1), onde  $m$  é a massa dos cavacos formados,  $T_f$  é a média das temperaturas finais dos termopares imersos no fluido calorimétrico, após o equilíbrio térmico e  $T_i$  é a média das temperaturas iniciais dos termopares soldados na peça.

Por fim, a quantidade de calor absorvida pela ferramenta de corte após o equilíbrio térmico ( $Q'_{fer}$ ) é calculada por meio da Eq.(1), onde  $m$  é a massa do corpo da broca,  $T_f$  é a média das temperaturas finais dos termopares imersos no fluido calorimétrico, após o equilíbrio térmico e  $T_i$  é a média das temperaturas iniciais da broca.

Para o teste “C”, proposto com o objetivo de obter a porcentagem de calor dissipado pela ferramenta de corte ( $Q_{fer}$ ), o calor cedido pela broca deve ser igual ao calor absorvido pelo fluido calorimétrico, conforme a Eq.(3).

$$Q_{fer} = Q_f + Q'_{fer} + Q_{cal} + Q_{perd} \quad (3)$$

Assim, a temperatura inicial da ferramenta de corte ( $T_{i, fer}$ ), ao adentrar no calorímetro no teste “C”, é dada pela Eq.(4):

$$T_{i, fer} = \frac{m_{fl} \cdot c_{fl} \cdot (T_{eq} - T_{i, fl}) + m_{fer} \cdot c_{fer} \cdot T_{eq}}{m_{fer} \cdot c_{fer}} \quad (4)$$

Onde  $T_{eq}$  é a temperatura de equilíbrio no interior do calorímetro e  $T_{i, fl}$  a temperatura inicial do fluido, ambas no interior do calorímetro.

O torque ( $\tau$ ) é utilizado para cálculo da energia consumida ( $E_{tot}$ ) em todo processo de usinagem. Utilizando-se as equações de energia, torque, potência e velocidade,



após manipulações algébricas, encontra-se a Eq.(5):

$$E_{tot} = \frac{2\pi \cdot \tau \cdot p}{f} \quad (5)$$

Onde  $p$  é a profundidade do furo (mm) e  $f$  é o avanço da broca (mm/volta).

A partir da razão do calor gerado pela energia mecânica consumida é obtida a porcentagem de energia consumida pela máquina que foi transformada em energia térmica, no processo de furação do ferro fundido cinzento, Eq.(6):

$$\%R = \frac{Q_{tot}}{E_{tot}} \quad (6)$$

## 2.4 Partição da energia mecânica transformada em energia térmica nos cavacos

O calorímetro foi utilizado para medição da partição de energia mecânica transformada em energia térmica nos cavacos. Desta vez, a seção inferior do calorímetro foi vedada para inserção de 90 ml de fluido calorimétrico (água destilada). Termopares tipo T e a unidade de aquisição de dados Keysight Technologies® foram igualmente utilizados.

A máquina-ferramenta utilizada foi um torno mecânico convencional Imor Maxi II 520, com potência máxima de 4,416 kW (6 cv). O corpo de prova foi uma barra cilíndrica de ferro fundido cinzento com 37,5 mm de diâmetro. Não foi utilizado fluido de corte durante os testes.

A ferramenta de corte utilizada foi uma broca helicoidal de corte a direita com duas arestas cortantes e diâmetro de 10 mm de metal duro tipo K30 revestida de TiN (nitreto de titânio) com canais para lubrificação interna.

Para o controle automático do avanço, a ferramenta de corte foi fixada na torre porta-ferramenta do carro transversal do torno. O calorímetro foi posicionado abaixo da região de corte, onde os cavacos foram colhidos por meio de um funil e alojados no interior do calorímetro. O percurso dos cavacos, desde a sua formação até a entrada do calorímetro, foi medido em 195 mm.

Os parâmetros de corte utilizados em ambos os testes foram: velocidade de corte de 27,3 m/min, avanço de 0,134 mm/volta e profundidade do furo de 15 mm. Após o corte, foi permitido que os cavacos trocassem calor com a água. Em seguida, os cavacos foram secados para medição da massa por meio de balança digital (resolução de 0,01 g).

## 2.5 Estimativa da partição de energia mecânica transformada em energia térmica nos cavacos

Foi proposta a utilização do calorímetro para medição da energia térmica absorvida pelos cavacos (partição do calor). As trocas de calor ocorridas entre o cavaco e o

fluido no interior do calorímetro foram avaliadas por meio da equação fundamental da calorimetria, Eq.(3). Pelo princípio da conservação de energia, a energia térmica transportada pelos cavacos ( $Q_c$ ) é transferida, na forma de calor, para o fluido no interior do calorímetro ( $Q_f$ ). Assim, é obtida a Eq.(7):

$$Q_c = Q_f + Q'_c + Q_{cal} + Q_{perd} \quad (7)$$

Onde  $Q'_c$  é a quantidade de energia absorvida pelos cavacos após o equilíbrio térmico ( $Q'_c$ ) é calculada por meio da Eq. (1), onde  $m$  é a massa dos cavacos formados,  $T_f$  é a média das temperaturas finais dos termopares imersos no fluido calorimétrico, após o equilíbrio térmico e  $T_i$  é a média da temperatura inicial do corpo de prova (material não usinado). Novamente uma parcela adicional sintetiza as perdas de calor ( $Q_{perd}$ ) e outra parcela reúne a energia térmica retida pela capacidade térmica do calorímetro ( $Q_{cal}$ ).

A temperatura inicial dos cavacos é obtida pela Eq. (8):

$$T_{i,c} = \frac{m_f c_f (T_{eq} - T_{i,fl}) + m_c c_c T_{eq}}{m_c \cdot c_c} \quad (8)$$

Onde  $T_{i,c}$  representa a temperatura inicial na qual os cavacos chegam no calorímetro,  $T_{i,fl}$  a temperatura inicial do fluido calorimétrico e  $T_{eq}$  representa a temperatura de equilíbrio entre calorímetro e cavacos.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Resultados para porcentagem de energia mecânica transformada em energia térmica

Nas Figuras (4) a (7) são apresentadas as variações de temperaturas do corpo de prova e do fluido no interior do calorímetro antes, durante e após a usinagem, nos testes A e réplica (A-2), teste B e réplica (B-2), respectivamente. Os termopares 1 a 3 representam a temperatura no corpo de prova enquanto os termopares 4 e 5 apresentam a temperatura do fluido no interior do calorímetro. As posições de soldagem dos termopares no corpo de prova estão registradas na Tab.(2).

Distâncias (mm)	Teste A	Teste A-2	Teste B	Teste B-2
$z_1$	3,00	2,60	3,50	3,30
$z_2$	9,00	10,60	7,50	7,20
$z_3$	11,25	15,70	10,90	14,10

Tabela 2. Posição dos termopares soldados no corpo de prova

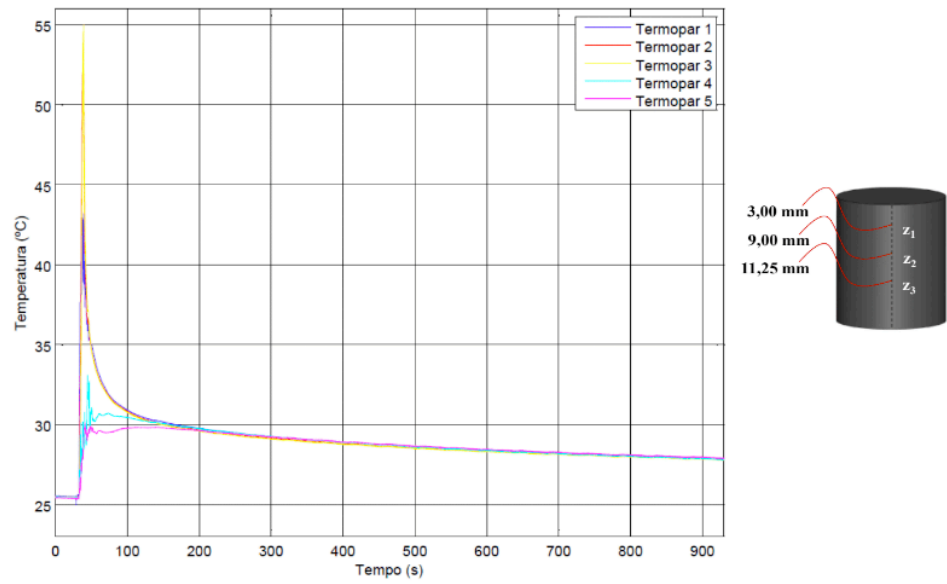


Figura 4. Medição de temperaturas para o teste A

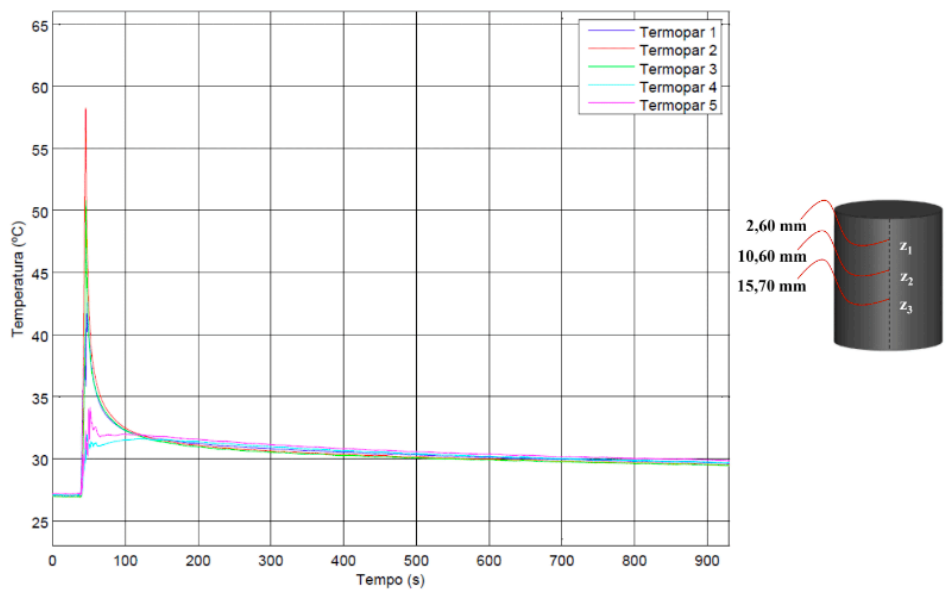


Figura 5. Medição de temperaturas para o teste A-2

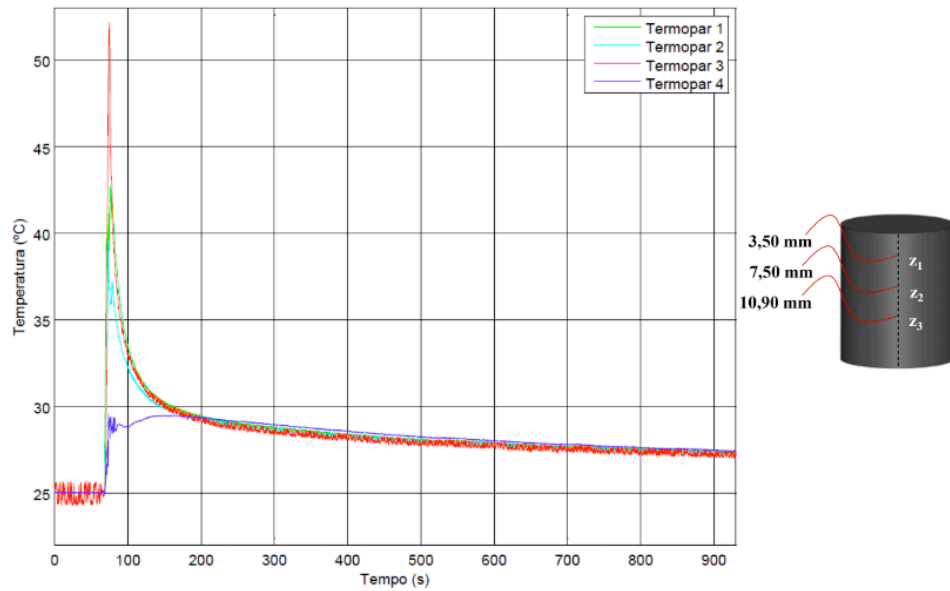


Figura 6. Medição de temperaturas para o teste B

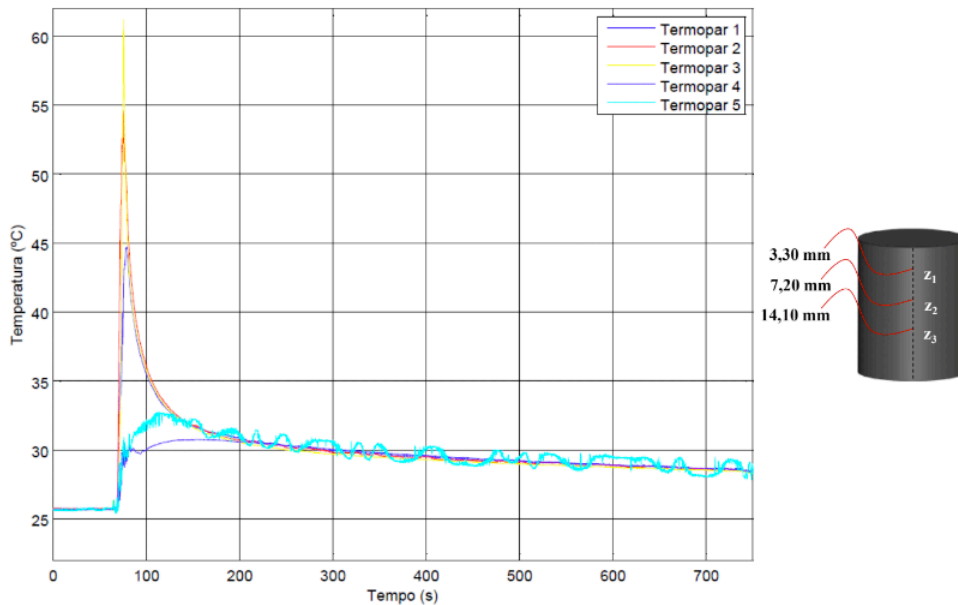


Figura 7. Medição de temperaturas para o teste B-2

A análise das Fig. (4) a (7) revela um padrão durante os testes. Os termopares soldados em uma região mais próxima da posição final do furo ( $z = 15 \text{ mm}$ ) apresentam maiores valores de temperatura. Esse comportamento acontece devido à difusão do calor gerado pela interface cavaco-ferramenta. Esta região pode ser comparada a uma fonte de geração de calor móvel, deslocando-se na direção vertical com a velocidade de avanço. Assim, essa fonte móvel se movimenta gerando calor, que é propagado para o corpo de prova. A condução deste calor aumenta as temperaturas do corpo de prova e, no momento em que as arestas de corte atravessam o ponto de menor distância entre o eixo da ferramenta e a face lateral da peça, onde o termopar foi soldado, a temperatura captada é máxima.

Os termopares próximos ao fim de curso apresentam maiores temperaturas devido à soma do calor propagado desde o início do corte e o calor gerado pela fonte móvel quando a distância entre ferramenta de corte e termopar soldado é mínima. Nos testes A-2 e B-2 este comportamento evidencia que, devido às posições dos termopares 3, respectivamente 15,70 mm e 14,10 mm, estes apresentaram as maiores temperaturas registradas no respectivo teste.

Na Figura (8) são apresentadas as temperaturas obtidas nos testes C e C-2. Observa-se o acréscimo de temperaturas oriundos da condução de calor da ferramenta de corte para o fluido calorimétrico. As medições e estimativas de parâmetros adicionais estão apresentadas na Tab.(3).

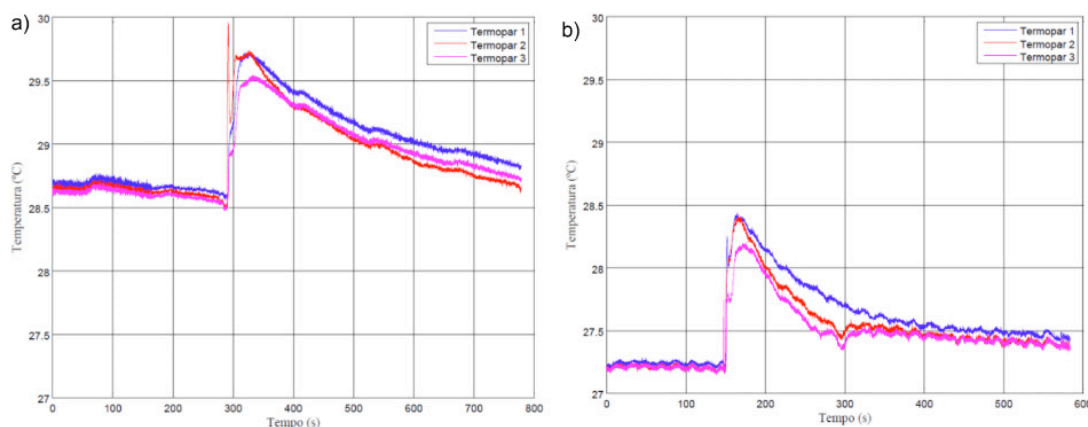


Figura 8. Medição de temperaturas para avaliação da partição de calor transferida pelos cavacos; a) teste C; b) réplica C-2

Grandeza	Valor adotado	Metodologia
Massa do corpo de prova	(42,08 ± 0,78) g	Medição direta
Densidade do ferro fundido	(7,16 ± 0,06) g/cm <sup>3</sup>	Estimativa
Massa dos cavacos	(8,44 ± 0,07) g	Estimativa
Massa da ferramenta de corte	(60,47 ± 0,02) g	Medição direta

Tabela 3. Posição dos termopares soldados no corpo de prova

Aplicando as equações Eq.(1) a (6) obtêm-se os resultados sumarizados na Tab. (4).

Parâmetros	Teste A	Teste A-1	Teste B	Teste B-2
$T_i$ (°C)	25,445	27,140	25,039	25,636
$T_f$ (°C)	27,870	29,785	27,450	28,546
$\Delta T$ (°C)	2,425	2,645	2,411	2,910
$\tau$ (N.m)	2,331			
$E_{tot}$ (kJ)	2,197			
$Q_a$ (kJ)	0,913	0,996	0,908	1,096

$Q'_p$ (kJ)	0,047	0,051	0,047	0,056
$Q'_c$ (kJ)	0,009	0,011	0,011	0,011
$Q'_{fer}$ (kJ)	-	-	0,061	0,074
$Q_{fer}$ (kJ)	0,010		-	-
$Q_{tot}$ (kJ)	0,974	1,063	1,027	1,237
$R_{tot}$	44,33 %	48,38 %	46,75 %	56,30 %

Tabela 4. Resultados obtidos nos testes A e testes B

É importante ressaltar a diferença entre calor dissipado pela ferramenta ( $Q_{fer}$ ) e o calor “retido” pela ferramenta ( $Q'_{fer}$ ). A ferramenta de corte dissipa uma determinada quantidade do calor gerado na zona de corte. Esta parcela é uma partição, denominada  $Q_{fer}$ . Uma vez que a ferramenta de corte permanece no calorímetro após a usinagem, há perda de calor da ferramenta para o fluido calorimétrico. Entretanto, como pode ser visto nas Fig. (8), as temperaturas finais da ferramenta de corte não são iguais às temperaturas iniciais, demonstrando que uma parcela de calor foi “retida” na ferramenta, denominada por  $Q'_{fer}$ . Conceitos semelhantes podem ser enunciados para a peça ( $Q'_p$ ) e os cavacos ( $Q'_c$ ).

Nos testes A e A-1 não foi calculado o calor retido ( $Q'_{fer}$ ), pois a ferramenta de corte foi retraída logo após a usinagem. Em compensação, o teste C permitiu a avaliação do calor dissipado pela ferramenta ( $Q_{fer}$ ).

Os resultados demonstram que, entre 46,75 % e 56,30 % da energia mecânica utilizada para o corte foi transformada em calor em usinagem e percebida pelo método calorimétrico, desconsiderando a partição de calor da ferramenta de corte. Para fins comparativos, Costa; Borba-Júnior; Silva (2018) obtiveram valores entre 51,15 % e 54,15 % da potência consumida na furação de ferro fundido cinzento com mesmos parâmetros de corte, também desconsiderando a partição de calor da ferramenta de corte.

### 3.2 Resultados para porcentagem de energia mecânica transformada em energia térmica dissipada pelos cavacos

Na Figura (9) são apresentadas as medições de temperatura da água para o teste C. Observa-se que a máxima temperatura medida ocorre na entrada dos cavacos no interior do calorímetro. A temperatura máxima registrada no interior do calorímetro foi em torno de 30,3 °C.

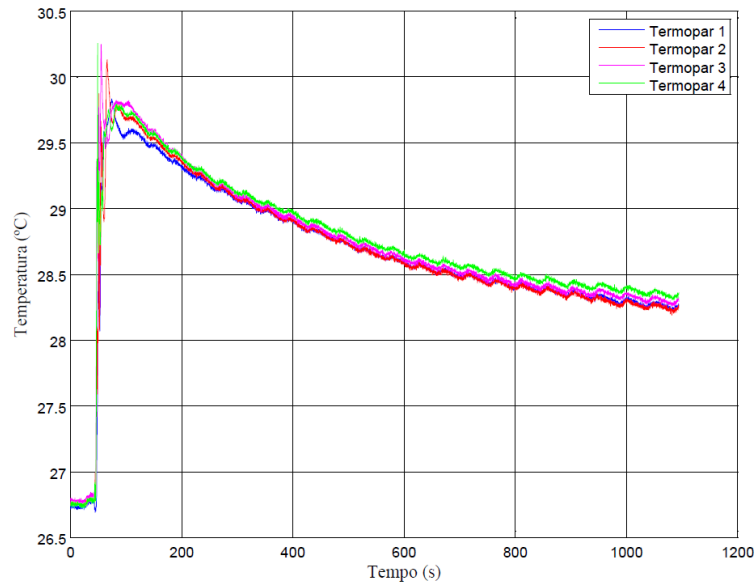


Figura 9. Medição de temperatura da água para o teste C

A massa dos cavacos medida foi de  $(8,35 \pm 0,04)$  g. Calculando-se o volume de material retirado e, juntamente com a densidade do ferro fundido, a massa de cavacos formados foi estimada em  $(8,43 \pm 0,06)$  g. Logo, pode-se considerar que o funil foi eficaz para a coleta dos cavacos.

Por meio da Eq.(8) é possível estimar a temperatura média em que os cavacos adentraram no calorímetro, de  $171,8$  °C. É importante ressaltar que o percurso desde a zona de corte até a entrada dos cavacos no calorímetro foi de  $195$  mm. A taxa de resfriamento do cavaco durante este percurso é desconhecida, impossibilitando uma estimativa da temperatura dos cavacos imediatamente após sua formação. O calor absorvido pelo fluido calorimétrico foi calculado em  $0,57$  kJ.

Na Figura (10) é apresentada a variação de temperaturas na superfície principal de folga da ferramenta, realizada no teste B. Foram observadas as temperaturas máximas de  $170,1$  °C para o termopar 1 e  $193,6$  °C para o termopar 2. A taxa de resfriamento apresentada logo após as máximas temperaturas registradas foi calculada em  $- 24$  °C/s, sendo um indício de uma acentuada taxa de resfriamento dos cavacos.



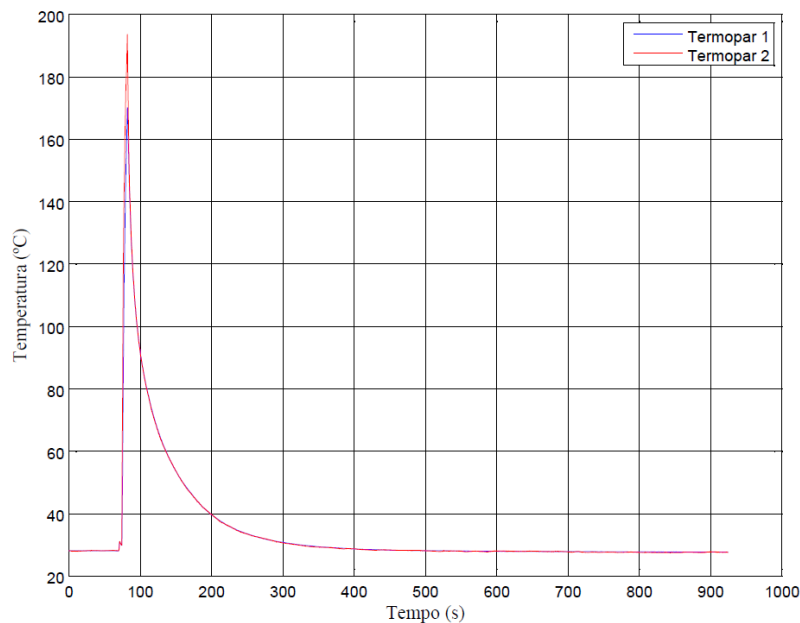


Figura 10. Variação da temperatura na superfície principal de folga da ferramenta

## 4 | CONCLUSÕES

O método calorímetro, apesar de suas dificuldades experimentais, pode ser utilizado para medição do calor gerado e das temperaturas associadas à furação de ferro fundido cinzento. Os resultados demonstram que, entre 46,75 % e 56,30 % da energia mecânica utilizada para o corte foi transformada em calor em usinagem e percebida pelo método calorimétrico, desconsiderando a partição de calor da ferramenta de corte.

O método calorimétrico apresentou bons resultados na medição do calor dissipado pelos cavacos na furação do ferro fundido cinzento e nas temperaturas envolvidas na sua formação. A temperatura média em que os cavacos adentraram no calorímetro foi calculada em 171,8 °C e o calor cedido pelos cavacos à água foi calculado em 0,57 kJ. Os termopares inseridos no canal de lubrificação interna apresentaram as temperaturas máximas de 170,1 °C e 193,6 °C e apresentaram taxa de resfriamento máxima de - 24 °C/s, sendo um indício de uma acentuada taxa de resfriamento dos cavacos.

## REFERÊNCIAS

COSTA, I. S.; BORBA-JÚNIOR, M.; SILVA, M. B. Medição de Calor e Temperatura em Usinagem por meio do Método Calorimétrico. **Acta Mechanica Et Mobilitatem**, vol.3, n.6, p.19-23, 2018a.

DENKENA, B.; AMMERMAN, C.; NIEDERWESTBERG, D. Development of a Calorimeter to Determine the Chip Heat in Drilling of C45EN. **Key Engineering Materials**, vol. 504-506, p. 1341-1346, 2012.

INCOMPLAST. **Nylon (PA)**. Disponível em: <<http://incomplast.com.br/nylonpa/>>. Acesso em 27 de Nov. 2018.

KOMANDURI, R.; HOU, Z. B. A Review of the Experimental Techniques for the Measurement of Heat and Temperatures Generated in Some Manufacturing Processes and Tribology. **Tribology International**, 34, p. 653-682, 2001.

MACEDO PLÁSTICOS. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.macedoplasticos.com.br/nylon.html>>. Acesso em 27 de Nov. 2018.

NETZSCH PROVEN EXCELLENCE. **Poliestireno Expandido - Condutividade Térmica**. Disponível em: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/pt/materiais-aplicacoes/isolacao-termica/poliestireno-expandido-condutividade-termica/>. Acesso em 27 de Nov. 2018.

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

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

SILVA, M. D. **Desenvolvimento e Construção de um Calorímetro para Processo de Furação**. 90 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Uberlândia, 2014.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**Henrique Ajuz Holzmann** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**Ricardo Vinicius Bubna Biscaia** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia de Produção pela UTFPR. Trabalha com os temas: análise microestrutural e de microdureza de ferramentas de usinagem, modelo de referência e processo de desenvolvimento de produto e gestão da manutenção.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-248-7

