



**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*  
*Álison 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 E PARTIÇÃO DE CALOR EM USINAGEM POR MEIO DO MÉTODO CALORIMÉTRICO: UMA REVISÃO

**Ivanilson Sousa da Costa**

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:** Quantificar o calor gerado e sua partição durante a usinagem de metais é de fundamental importância para seu monitoramento, dado que a temperatura de usinagem é um parâmetro crítico no corte de metais, influenciando desde a formação dos cavacos até os custos em usinagem. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica sobre a medição do calor gerado em usinagem por meio do método calorimétrico, apresentando metodologias e resultados do calor gerado e sua partição entre peça, ferramenta de corte, cavacos e vizinhanças.

**PALAVRAS-CHAVE:** calor, temperatura, usinagem, calorímetro, revisão.

**ABSTRACT:** To quantify the heat generated and its partition during metal cutting is of fundamental importance for its monitoring, since the cutting temperature is a critical parameter in the machining, influencing from the formation of

the chips to the costs in machining. The objective of this paper is to present a review on the measurement of heat generated in machining by means of the calorimetric method, presenting methodologies and results of the heat generated and its partition between workpiece, tool, chips and neighborhoods.

**KEYWORDS:** heat, temperature, machining, calorimeter, review.

### 1 | INTRODUÇÃO

A maior parte da energia consumida para a usinagem de metais se transforma em calor (Shaw, 1984; Silva; Wallbank, 1999; Trent; Wright, 2000; Machado et al., 2015). Este acréscimo de energia térmica tem importância em todo processo de corte devido à distribuição de temperaturas desenvolvidas, influenciando desde a formação dos cavacos, as forças de usinagem, a vida da ferramenta, o controle dimensional, a integridade superficial da peça, inclusive os custos em usinagem. Por isso, a temperatura de usinagem é frequentemente um parâmetro crítico nestes processos, podendo acarretar problemas técnicos e econômicos devido principalmente à parcela de calor entregue à ferramenta de corte, limitando sua vida (Trent; Wright, 2000; Ferraresi, 2012;

Machado et al., 2015).

No início do século XVIII não havia nenhum método conhecido para medição de calor. Em 1784, os cientistas Lavoisier (1743-1794) e Laplace (1749-1827) publicaram a descrição de um calorímetro de gelo para medições da capacidade calorífica de metais e de calor em reações químicas. Baseado na troca de calor latente, o calorímetro de Lavoisier e Laplace, ilustrado pela Fig.(1), é considerado o primeiro calorímetro inventado (Tavares; Prado, 2010).

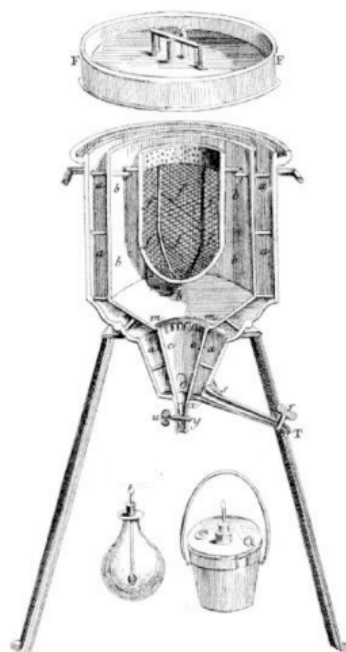


Figura 1. Concepção do calorímetro de gelo proposto por Lavoisier e Laplace em 1784

(Tavares; Prado, 2010)

A metodologia calorimétrica foi pela primeira vez utilizada em usinagem por Benjamin Thompson (conde Rumford) no final do século XVIII. Rumford observou que uma grande quantidade de calor era gerada durante a fabricação de canhões de bronze. Rumford estudou como esta quantidade de calor era produzida numa operação puramente mecânica, imergindo peça, ferramenta de corte e cavacos em um recipiente com uma quantidade conhecida de água, conforme é apresentado na Fig.(2) (Shaw, 1984; Komanduri; Hou, 2001).

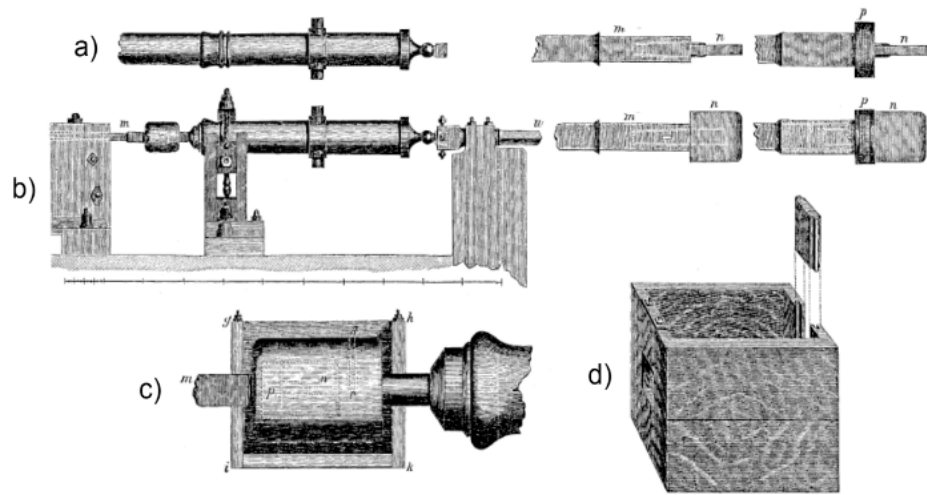


Figura 2. Determinação do calor gerado; a) canhão recebido da fundição; b) experimento montado; c) ampliação do calorímetro mostrando a barra de metal; d) recipiente do calorímetro (adaptado de Komanduri; Hou, 2001)

A importância dos experimentos de Rumford incluem: (i) uma metodologia para investigação de calor em usinagem por meio de calorímetros e (ii) o entendimento sobre a natureza do calor tendo em vista a vigente teoria do calórico na época, onde o calor era considerado como um fluido ígneo ou uma propriedade do material (Komanduri; Hou, 2001).

Em meados do século XIX, James P. Joule (1818-1889) desenvolveu o conceito de “equivalente mecânico de calor”: a relação existente entre a energia mecânica e a térmica, quando uma se converte na outra. O experimento de Joule consistiu de um calorímetro (recipiente de paredes adiabáticas, ou seja, termicamente isolado) com determinada massa de água, no qual foi inserido um conjunto de paletas presas a um eixo. Este conjunto foi colocado em rotação pela queda de massas, Fig. (3). O atrito das paletas aquece a água, cuja variação de temperatura, determinada por um termômetro, corresponde a energia mecânica transformada em energia térmica (Nussenzveig, 2008).

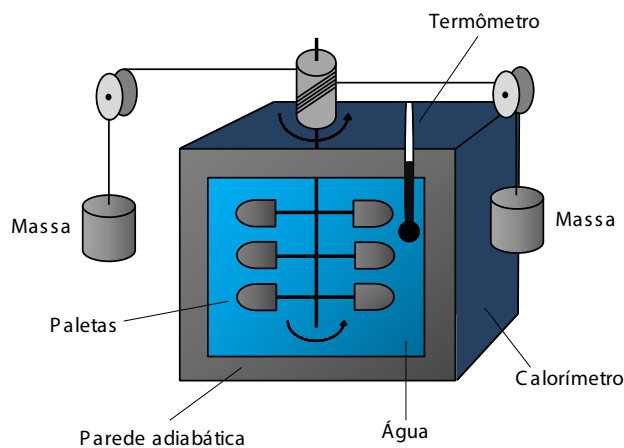


Figura 3. Medição do equivalente mecânico do calor por Joule

(adaptado de Nussenzveig, 2008)

O trabalho mecânico equivalente foi medido pela altura da queda das massas. Joule constatou que eram necessários aproximadamente 4,184 J para elevar de 1 °C a temperatura de 1 g de água. Assim, o equivalente mecânico da água é 4,184 J/cal (Nussenzveig, 2008).

Os experimentos de Lavoisier, Rumford e Joule trouxeram contribuições significativas no campo da Calorimetria e da Termodinâmica. Metodologias calorimétricas tem sido propostas e utilizadas na área de manufatura, especialmente na usinagem de metais e este trabalho se propõe a apresentar uma revisão bibliográfica destas metodologias e os resultados obtidos na medição de calor gerado e sua partição entre peça, ferramenta de corte, cavacos e vizinhanças.

## 2 | GERAÇÃO DE CALOR E TEMPERATURA EM USINAGEM

Em processos de usinagem de metais praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco, se transforma em energia térmica ou calor, proveniente da deformação e do cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento (zona de cisalhamento primário), do atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta de corte (zona de cisalhamento secundário) e do atrito na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta (zona de cisalhamento terciário) (Trent; Wright, 2000; Machado et al., 2015; Grzesik, 2017).

Na Figura 4 são apresentadas estas zonas distintas de geração de calor em usinagem.

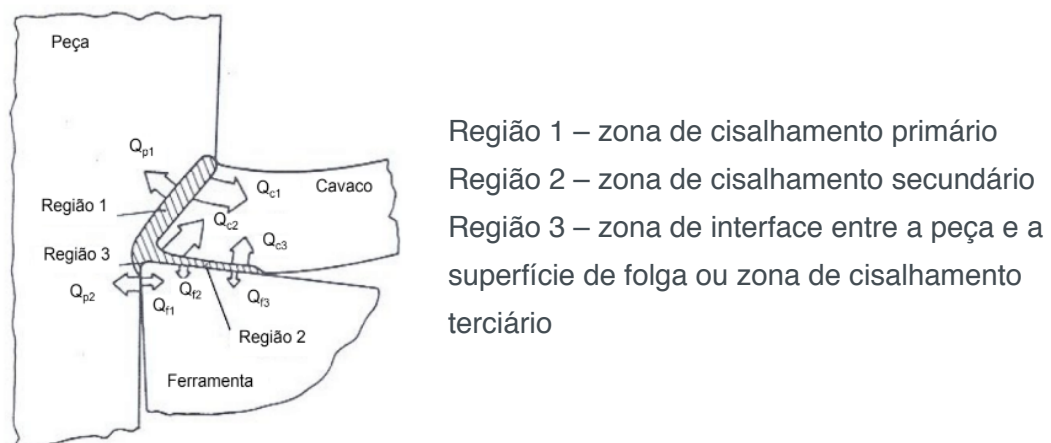


Figura 4. Zonas de geração e dissipação de calor em usinagem. Parcela de calor dissipadas pelo cavaco ( $Q_c = Q_{c1} + Q_{c2} + Q_{c3}$ ), dissipada pela ferramenta ( $Q_f = Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{f3}$ ) e dissipada pela peça ( $Q_p = Q_{p1} + Q_{p2}$ ) (adaptado de Ferraresi, 2012)

Devido aos fenômenos inerentes do processo de usinagem de metais, uma grande quantidade de calor e altas temperaturas podem ser desenvolvidas durante o corte. Essas variáveis tem influência em todo o processo, destacando-se na ativação de mecanismo de desgaste de ferramentas de corte e na integridade superficial da

peça obtida. Uma vez que o calor é uma forma de energia, partições do calor serão dissipadas pelos cavacos formados, peça, ferramenta de corte e meio ambiente. Desta forma, o balanço energético do processo de corte pode ser expresso pela Eq.(1) (Ferraresi, 2012):

$$Q_z + Q_{a1} + Q_{a2} = Q_c + Q_p + Q_f + Q_m \quad (1)$$

Onde:

$Q_z$  = quantidade de calor produzida pela deformação e pelo cisalhamento do cavaco (zona de cisalhamento primário).

$Q_{a1}$  = quantidade de calor produzida pelo atrito do cavaco com a ferramenta de corte (zona de cisalhamento secundário).

$Q_{a2}$  = quantidade de calor produzida pelo atrito da peça com a ferramenta de corte (zona de cisalhamento terciário).

$Q_c$  = quantidade de calor dissipada pelo cavaco.

$Q_p$  = quantidade de calor dissipada pela peça.

$Q_f$  = quantidade de calor dissipada pela ferramenta de corte.

$Q_m$  = quantidade de calor dissipada pelo meio ambiente.

Na Figura 5 é apresentada esquematicamente uma típica partição de calor em aço baixo carbono AISI 1113, a qual a maior parte do calor gerado em usinagem é dissipada pelos cavacos ( $Q_c$ ), cerca de 10 % a 20 % do calor total é dissipado pela ferramenta de corte ( $Q_f$ ) e o restante é praticamente dissipado pela peça ( $Q_p$ ). O aumento da velocidade de corte provoca maiores partições do calor dissipado nos cavacos, embora as partições do calor dissipado na peça e na ferramenta diminuam (Shaw, 1984).

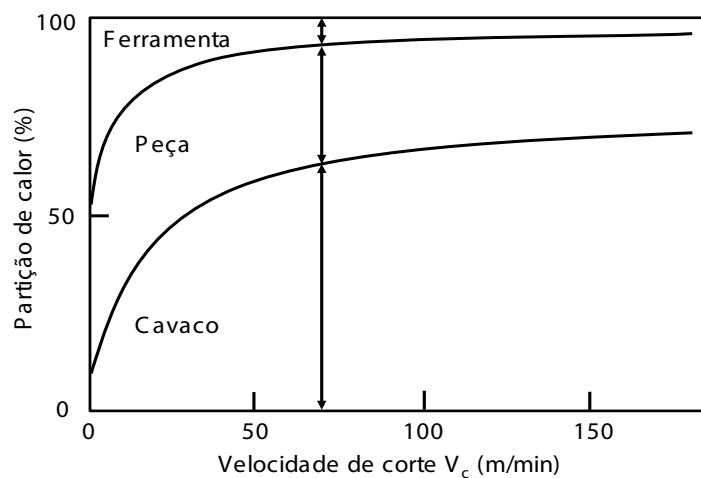


Figura 5. Representação esquemática da partição típica de calor gerado em usinagem, entre o cavaco, a ferramenta de corte e a peça, em aço baixo carbono AISI 1113

(adaptado de Shaw, 1984)

Verifica-se experimentalmente que quase todo o trabalho de usinagem (87 %

a 90 %) se transforma em calor (Ferraresi, 2012). Logo, a taxa de geração de calor, em watts, é aproximadamente equivalente ao trabalho de usinagem na unidade de tempo. Pode-se determinar, com bastante aproximação, a taxa de geração de calor ( $q$ ) produzida na usinagem pela Eq. (2) (Machado et al., 2015):

$$q = \frac{F_c \cdot V_c}{60} \quad [\text{W}] \quad (2)$$

Por meio da Eq. (2) verifica-se que a quantidade de calor gerada durante a usinagem aumenta com a velocidade de corte e com a força de corte. Conseqüentemente, a temperatura cresce com o aumento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte. Este aumento de temperatura é acelerado com o desgaste da ferramenta, o qual aumenta o valor do coeficiente de atrito e, conseqüentemente, a força de corte (Ferraresi, 2012).

### 3 | MÉTODO CALORIMÉTRICO

A medição de calor e temperaturas em usinagem é um desafio experimental e muitos métodos experimentais foram desenvolvidos ao longo do tempo (Trent; Wright, 2000; Komanduri; Hou, 2001; Machado et al., 2015). Cada método possui suas vantagens e desvantagens e o método mais adequado para um determinado problema depende da situação em consideração, tais como a facilidade de acesso e o tamanho da área de medição, a dinâmica do corte (contínuo ou interrompido), a precisão necessária, os custos de instrumentação, etc. (Komanduri; Hou, 2001).

Denomina-se calorímetro um sistema fechado que não permite trocas de calor com o ambiente (adiabático). O método calorimétrico consiste em confinar os fenômenos de geração de calor em usinagem no interior de um calorímetro e avaliar as temperaturas envolvidas e o calor por meio de medições com termopares ou termômetros e das equações da Calorimetria.

O calor gerado no corte pode ser determinado com bastante precisão pelo método calorimétrico, permitindo medições de trabalho, potência, forças, temperatura média do cavaco, etc. apresentando boas concordâncias entre as medidas de potência obtida a partir de medições de torque (Komanduri; Hou, 2001).

Segundo Ferraresi (2012), a temperatura média do cavaco pode ser determinada aproximadamente por meio de calorímetro de água, Fig. (6).



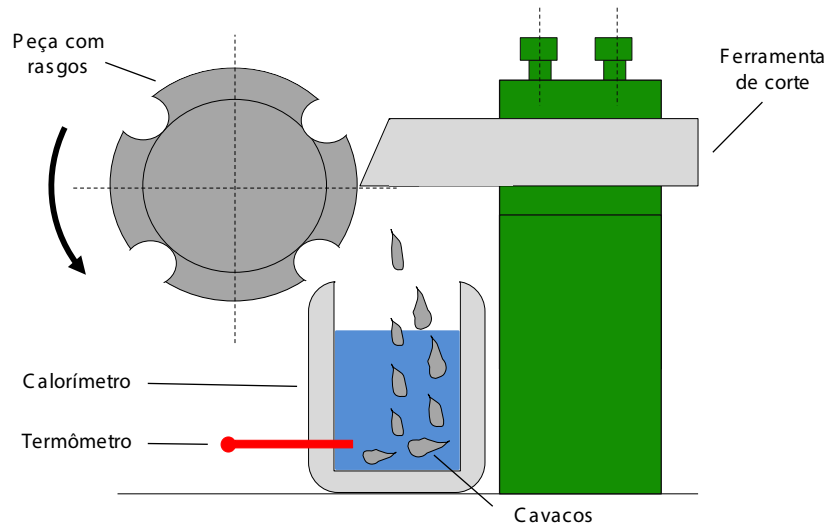


Figura 6. Determinação da temperatura média do cavaco por meio de um calorímetro  
(adaptado de Ferraresi, 2012).

A metodologia consiste na medição da temperatura inicial da água seguida da usinagem de uma peça com rasgos axiais (para favorecer a quebra do cavaco). Os cavacos gerados se alojam no interior do calorímetro por gravidade. Após a usinagem, a temperatura final da água é medida após um tempo previamente determinado. A massa dos cavacos é medida após a secagem. Desta forma, a temperatura do cavaco é determinada pela Eq. (3):

$$T_{cav} = \frac{(m_a + m_e \cdot c_e) \cdot (T_2 - T_1)}{m_c \cdot c} + T_2 \quad (3)$$

Onde  $m_c$  é a massa de cavaco (g),  $m_a$  é a massa da água no calorímetro (g),  $m_e$  é a massa equivalente do calorímetro (g),  $c$  é o calor específico do cavaco (cal/g.°C),  $c_e$  é o calor específico do calorímetro (cal/g.°C),  $T_2$  é a temperatura final de equilíbrio da água, do cavaco e do calorímetro (°C),  $T_1$  é a temperatura inicial de equilíbrio da água e do calorímetro (°C) e  $T_{cav}$  é a temperatura do cavaco, a ser determinada (°C).

A partição do calor gerado na furação foi estudada por Schmidt e Roubik (1949) (*apud* Shaw, 1984) (*apud* Komanduri; Hou, 2001). Os pesquisadores construíram três calorímetros de água para determinação: (i) do calor total gerado na furação de ligas de magnésio, (ii) do calor dissipado na ferramenta após o corte e (iii) do calor dissipado pelos cavacos, ver Fig. (7). Os autores mostraram que a maior parte do calor gerado em usinagem foi dissipada pelos cavacos, cerca de 70 % a 85 %, cerca de 10 % do calor é dissipado pela peça e o restante é dissipado pela ferramenta de corte, conforme a Fig. (8).

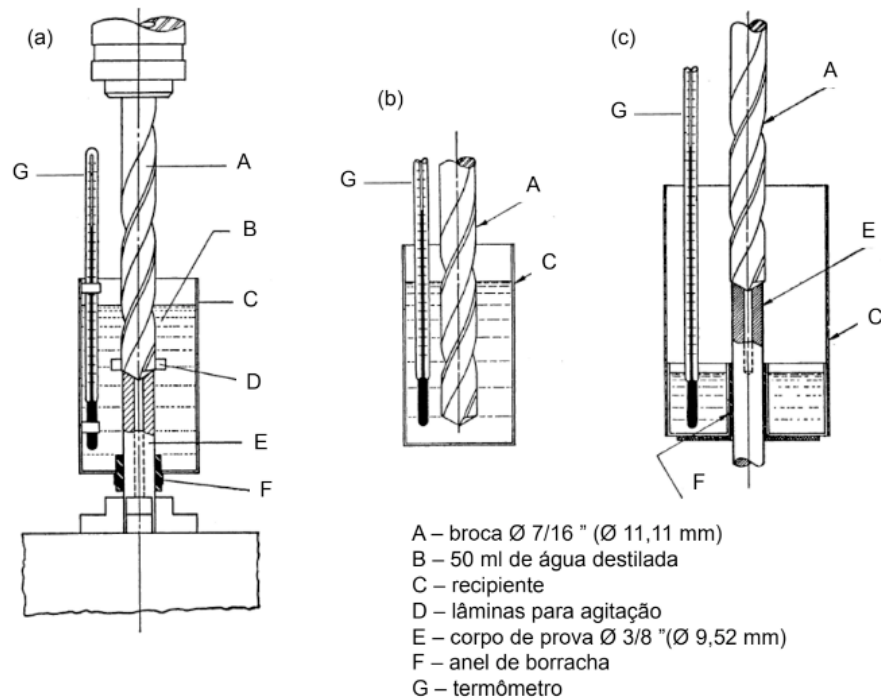


Figura 7. Esquemas de calorímetros de água para estimativa de: (a) calor total gerado na furação; (b) calor dissipado pela ferramenta; (c) calor dissipado pelos cavacos

(adaptado de Schmidt; Roubik, 1945 *apud* Komanduri; Hou, 2001)

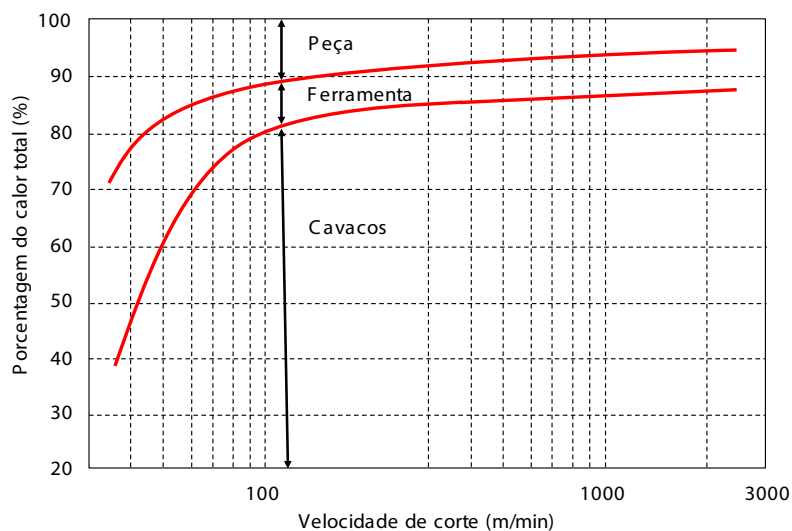


Figura 8. Distribuição do calor gerado em função da velocidade de corte

(adaptado de Schmidt; Roubik, 1949 *apud* Komanduri; Hou, 2001).

Os autores repetiram as experiências do método calorimétrico no fresamento de uma liga de alumínio e os resultados obtidos para a partição de calor em função da velocidade de corte foram semelhantes aos resultados de furação de ligas de magnésio (Schmidt; Roubik, 1945 *apud* Shaw, 1984).

Denkena; Ammermann; Niederwestberg (2012) desenvolveram e testaram um calorímetro para medição da partição de calor em furação de aço ABNT 1045. O projeto

do calorímetro, constituído de Poliamida 66, é apresentado na Fig. (9). O fluido utilizado no calorímetro foi óleo de base mineral Shell Macron® 2429 S-8. Três termopares tipo K foram utilizados para o monitoramento das temperaturas no calorímetro, em diferentes posições. Um sistema de estimulação dinâmica foi proposto para acelerar as trocas térmicas entre os cavacos e o fluido do calorímetro. Na Figura 10 são apresentados os resultados dos experimentos obtendo resultados entre 55 % e 70 % de calor dissipado pelos cavacos em relação à energia total consumida no corte.

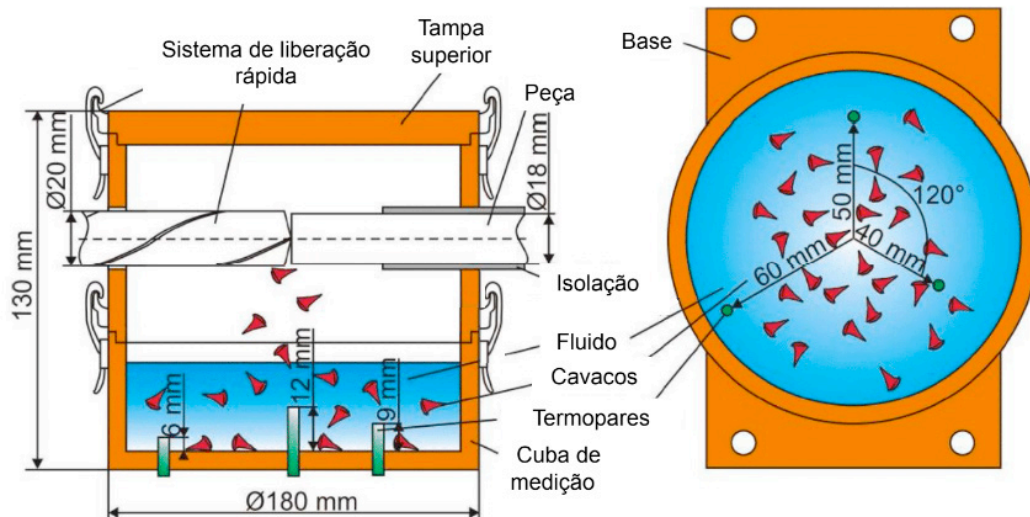


Figura 9. Configuração do calorímetro para medição da partição de calor dissipada pelos cavacos (adaptado de Denkena; Ammermann; Niederwestberg, 2012)

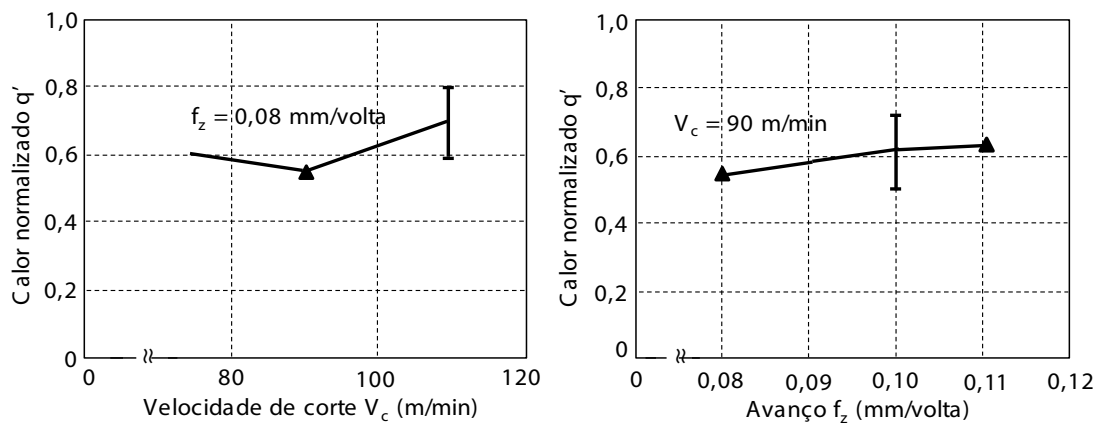


Figura 10. Influência da velocidade de corte e do avanço no calor dissipado pelos cavacos (adaptado de Denkena; Ammermann; Niederwestberg, 2012)

Quan; He; Dou (2008) estudaram a geração de calor no torneamento de aço carbono AISI 1045 a altas velocidades de corte por meio do método calorimétrico. Os autores construíram três calorímetros de água, na forma de um recipiente de aço revestido com espuma adiabática de condutividade térmica de 0,0337 W/m.K, ver Fig. (11).

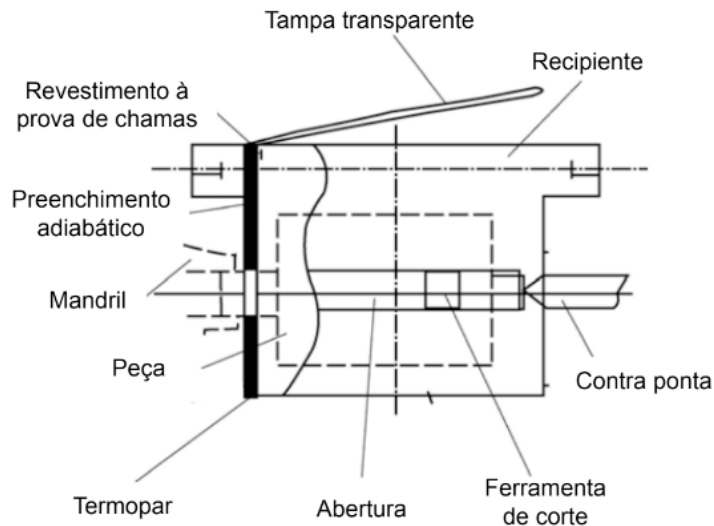


Figura 11. Calorímetro para avaliação do calor dissipado pelos cavacos

(traduzido de Quan; He; Dou, 2008)

A Figura 12 apresenta os resultados experimentais da taxa de geração de calor em usinagem ( $Q$ ) e da potência de corte ( $P_c$ ) em função da velocidade de corte. O calor dissipado para o meio ambiente ( $Q_{ma}$ ) foi de aproximadamente 0,2 %. A taxa de calor gerado e a potência aumentam com a velocidade de corte. A maior parte do calor gerado foi dissipada pelos cavacos ( $Q_c$ ). Os resultados também indicam que o ensaio tem um erro de medição notável nas menores velocidades de corte, porém o método é adequado para estudos em altas velocidades de corte (Quan; He; Dou, 2008).

A Figura 13 apresenta a partição de calor em usinagem dissipado entre a ferramenta ( $\%R_f$ ), peça ( $\%R_p$ ) e cavacos ( $\%R_c$ ) em função da velocidade de corte (Quan; He; Dou, 2008).

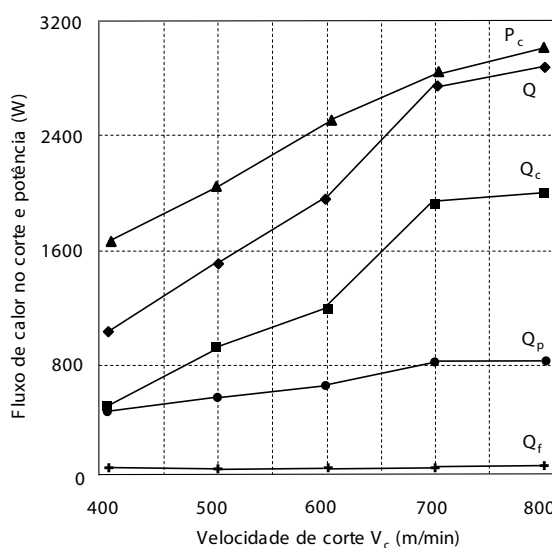


Figura 12. Taxa de calor gerado e potência consumida em função da velocidade de corte (adaptado de Quan; He; Dou, 2008)

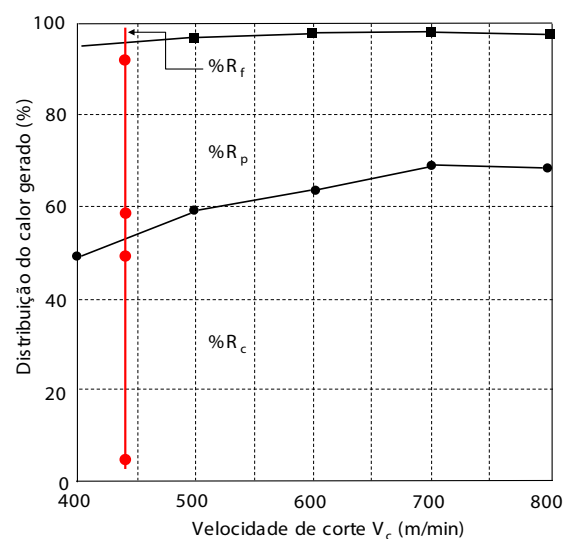


Figura 13. Distribuição do calor gerado em usinagem (partição) em função da velocidade de corte (adaptado de Quan; He; Dou, 2008)

Os resultados mostram que em velocidades de corte menores, o calor dissipado pela peça ( $Q_p$ ) tem sua maior parcela de contribuição, proporção próxima do calor dissipado pelos cavacos. O calor dissipado para a ferramenta de corte é cerca de 4% do calor total. Em velocidades de corte maiores, os cavacos dissipam maior parte do calor gerado, à medida que a velocidade de corte aumenta. Embora o calor de corte transferido para a peça e a ferramenta de corte também aumentem com a velocidade de corte, a proporção total destes diminuem (Quan; He; Dou, 2008).

Parâmetro	400 m/min	500 m/min	600 m/min	700 m/min	800 m/min
$Q_c$ (W)	504,8	890,2	1169,2	1908,0	1987,2
$Q_p$ (W)	478,0	568,4	632,5	808,0	827,0
$Q_f$ (W)	39,6	39,5	33,9	46,1	65,5
$Q_{ma}$ (W)	1,9	2,1	2,6	3,3	5,4
$Q$ (W)	1024,3	1500,2	1938,2	2765,4	2885,1
$P_c$ (W)	1633,0	2033,0	2480,0	2823,0	2988,0
% $R_c$ (%)	49,4	59,4	63,7	69,1	69,0
% $R_p$ (%)	46,8	37,9	34,5	29,3	28,7
% $R_f$ (%)	3,8	2,7	1,8	1,7	2,3

Tabela 1. Taxa de calor gerado, potência consumida e partição de calor em função da velocidade de corte no torneamento de aço carbono 1045 (Quan; He; Dou, 2008)

Silva (2015) projetou e construiu um calorímetro de água para medição da geração de calor na furação de ferro fundido cinzento. O calorímetro consistiu de dois recipientes cilíndricos coaxiais, o interno foi fabricado em PVC (policloreto de polivinila) e o externo em Technyl®. A tampa, também fabricada em Technyl® encaixa-se ao recipiente interno e é fixado por parafusos. O espaço entre os dois recipientes foi preenchido com poliestireno expandido comercial (Isopor®) para isolamento térmica, ver Fig. (14).

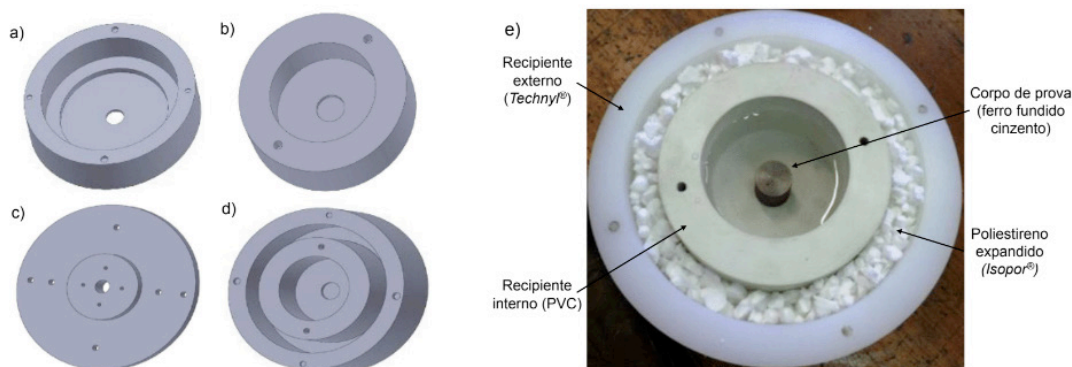


Figura 14. a) recipiente externo de Technyl®; b) recipiente interno de PVC; c) visão inferior da tampa do calorímetro (Technyl®); d) os dois recipientes coaxiais encaixados constituem o calorímetro; e) configuração final do calorímetro (adaptado de Silva, 2015)

As temperaturas da água foram medidas por termopares tipo K inseridos no interior

do calorímetro. Silva (2015) comparou a energia consumida na usinagem usinagem, calculada pelo torque, e o calor gerado em usinagem, estimado pelo calorímetro. Em suma, o calorímetro de água projetado e construído foi conveniente para avaliação da quantidade de calor gerada em usinagem, apesar dos possíveis erros associados às medições.

O calorímetro de água projetado e construído por Silva (2015) foi utilizado em trabalhos posteriores. Costa; Borba Júnior; Silva (2018a) apresentaram uma metodologia atualizada para medição de calor durante a furação do ferro fundido cinzento. Costa; Borba Júnior; Silva (2018b) propuseram a combinação da metodologia calorimétrica com outras técnicas de medição de temperaturas, como a termografia infravermelha e os termopares inseridos.

Andrade; Costa; Silva (2018) propuseram a estimativa do calor dissipado pelos cavacos utilizando o calorímetro de água. Na Figura 15 é apresentada a configuração dos testes realizados em torno mecânico. O calorímetro foi posicionado 195 mm abaixo da região de corte e os cavacos foram colhidos por gravidade e retidos no interior do calorímetro, trocando calor com o fluido calorimétrico.

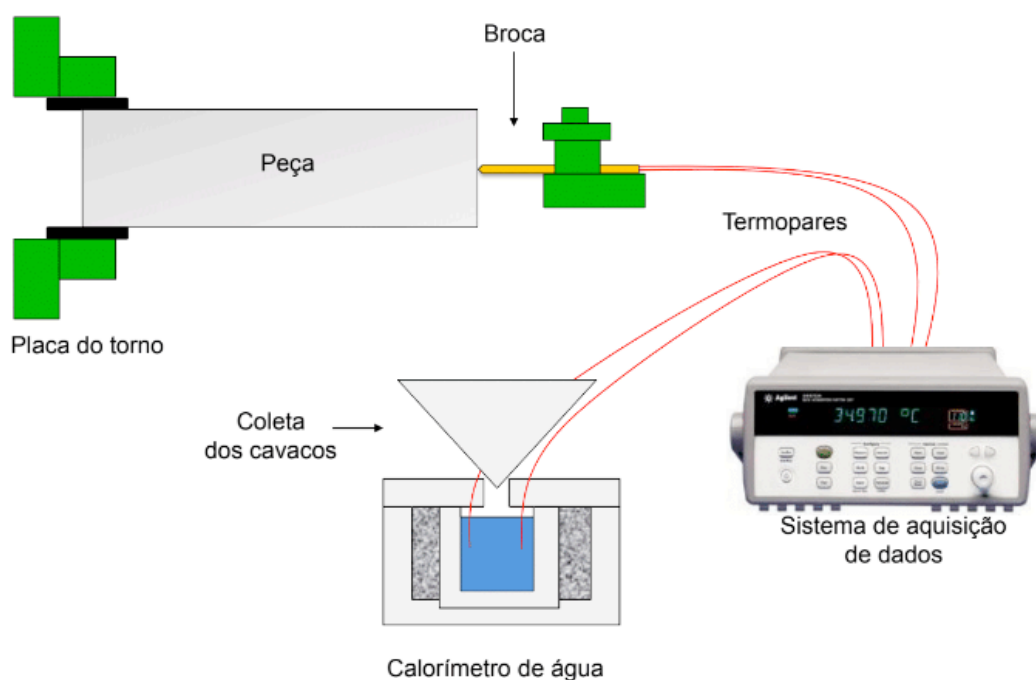


Figura 15. Montagem experimental utilizada nos testes (Andrade; Costa; Silva, 2018)

Os autores concluíram que o método calorimétrico apresentou bons resultados na medição do calor dissipado pelos cavacos na furação do ferro fundido cinzento sendo a quantidade de calor cedido pelos cavacos à água calculado em 0,57 kJ (Andrade; Costa; Silva, 2018).



## 4 | CONCLUSÃO

O método calorímetro é uma técnica essencialmente experimental utilizada na medição de calor em processos de usinagem desde 1798 até os dias atuais. Apesar de suas dificuldades experimentais inerentes, a técnica calorimétrica é relativamente simples, bastante versátil e de baixo custo, podendo ser utilizada para medição do calor gerado em processos de torneamento e furação, além das partições do calor gerado para a ferramenta de corte e cavacos.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M.; COSTA, I. S.; SILVA, M. B. **Medição de Calor e Temperatura de Cavacos por Meio do Método Calorimétrico**. In: XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Brasília-DF, 2018.
- 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.
- COSTA, I. S.; BORBA JÚNIOR, M.; SILVA, M. B. **Metodologia Calorimétrica para Medição de Calor e Temperatura na Furação de Ferro Fundido Cinzento**. In: XXII Colóquio de Usinagem, Uberaba-MG, 2018b.
- 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.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blücher, 2012.
- GRZESIK, W. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applications**. 2<sup>nd</sup> ed. [S.l.]: Elsevier, 2017.
- 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.
- MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. 4<sup>a</sup> ed. São Paulo: Blücher, 2008.
- 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.
- SCHMIDT A. O., ROUBIK J. R. Distribution of Heat Generated in Drilling. **Trans ASME**, 71:242-5, 1949.
- SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. New York: Oxford University Press, 1984.
- 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.

TAVARES, G. W.; PRADO, A. G. S. Calorímetro de Gelo: Uma Abordagem Histórica e Experimental para o Ensino de Química na Graduação. **Química Nova**, vol. 33, n. 9, p.1987-1990, 2010.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4<sup>th</sup> ed. London: Butterworths, 2000.

## **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

