

**ALMIR KAZUO KAMINISE**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO MATERIAL DO  
PORTA-FERRAMENTA SOBRE TEMPERATURAS DE  
USINAGEM NO TORNEAMENTO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
2012**

**ALMIR KAZUO KAMINISE**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO MATERIAL DO PORTA-FERRAMENTA  
SOBRE TEMPERATURAS DE USINAGEM NO TORNEAMENTO**

**Tese** apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de DOUTOR em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Gilmar Guimarães

**UBERLÂNDIA - MG**

**2012**

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

---

- K15e Kaminise, Almir Kazuo, 1963-  
Estudo da influência do material do porta-ferramenta sobre temperaturas de usinagem no torneamento / Almir Kazuo Kaminise. - 2012.  
124 p. : il.
- Orientador: Márcio Bacci da Silva.  
Coorientador: Gilmar Guimarães.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.
1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Usinagem - Teses. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964- II. Guimarães, Gilmar. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.9

---



**ALUNO:** Almir Kazuo Kaminise

**NÚMERO DE MATRÍCULA:** 94631

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Materiais e Processos de Fabricação

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA:** NÍVEL DOUTORADO

**TÍTULO DA TESE:**

***“Estudo da Influência do Material do Porta-ferramenta sobre Temperaturas de Usinagem no Torneamento”***

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. Gilmar Guimarães

A Tese foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Auditório E do Bloco 5O, Campus Santa Mônica, em 19 de dezembro de 2012, às 14:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

| NOME  | ASSINATURA |
|---|------------|
| Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva             | UFU        |
| Prof. Dr. Gilmar Guimarães                  | UFU        |
| Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva          | UFU        |
| Profa. Dra. Vanda Maria Luchesi             | UFU        |
| Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima | CEFET-MG   |
| Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos             | CEFET-MG   |

Uberlândia, 19 de dezembro de 2012

*Dedico a realização desse trabalho aos  
meus filhos Rodrigo Yukiti e Maria Clara*

## **Agradecimentos**

Aos Professores Márcio Bacci da Silva e Gilmar Guimarães pela orientação, disponibilidade, incentivo e confiança depositada na condução desse trabalho e, principalmente, pela amizade demonstrada no dia a dia.

À Professora Sônia A. Goulart Oliveira pela confiança e incentivo à realização desse trabalho.

Ao Professor Álisson Rocha Machado pela contribuição ao desenvolvimento do trabalho, com sugestões e incentivo.

À minha esposa Verônica pelo carinho, dedicação, incentivo, compreensão e abdicção.

A Fundação Tupy S.A., na pessoa do Sr. Dr. Eng. Wilson Luiz Guessser, pela disponibilidade no fornecimento do material de teste.

Aos amigos e colegas do LEPU, Daniel Fernandes da Cunha e Igor Cezar Pereira, pelas sugestões e participação direta ou indireta na realização desse trabalho.

Aos alunos de Iniciação Científica Gabriel Miranda Costa e Arthur Araújo Cunha pela colaboração na realização de procedimentos experimentais.

Aos órgãos de fomento CNPq, FAPEMIG e, em especial, à CAPES pela concessão de uma bolsa na modalidade PIQDTec.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, especialmente à Coordenação do Curso Técnico em Mecânica Industrial do Campus IV/Araxá.

## SUMÁRIO

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Lista de símbolos .....</b>   | <b>ix</b>    |
| <b>Lista de figuras .....</b>  | <b>xi</b>    |
| <b>Lista de tabelas .....</b>  | <b>xvi</b>   |
| <b>Resumo .....</b>  | <b>xvii</b>  |
| <b><i>Abstract</i> .....</b>   | <b>xviii</b> |
| <br><b>Capítulo I</b>  |              |
| <b>Introdução .....</b>  | <b>1</b>     |
| <br><b>Capítulo II</b>   |              |
| <b>Revisão bibliográfica .....</b>   | <b>6</b>     |
| 2.1 Breve histórico sobre os estudos da formação do cavaco em usinagem .....                   | 7            |
| 2.2 Mecanismos de formação do cavaco .....   | 9            |
| 2.3 Temperatura na interface ferramenta/cavaco .....   | 11           |
| 2.4 Medição de temperatura na interface peça-ferramenta/cavaco .....                           | 13           |
| 2.5 Técnica do termopar ferramenta-peça: Fundamentos e aplicações .....                        | 14           |
| <br><b>Capítulo III</b>  |              |
| <b>Método do termopar ferramenta-peça com compensação física .....</b>                         | <b>19</b>    |
| 3.1 Introdução .....   | 19           |
| 3.2 Aparato experimental do sistema termopar ferramenta-peça no torneamento.                   | 20           |
| 3.3 Análise do circuito termoeletrico do termopar ferramenta-peça - aparato experimental ..... | 24           |
| 3.3.1 Conceitos e definições de termopares .....   | 25           |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.3.2 | <i>Lei dos termopares</i> .....  | 26 |
| 3.3.3 | <i>Circuito termoeletrico do sistema termopar peça-ferramenta obtido do aparato experimental</i> ..... | 28 |
| 3.3.4 | <i>Circuito termoeletrico do sistema termopar ferramenta-peça com compensação física</i> .....         | 30 |
| 3.4   | Estudo da viabilidade de compensação física da junção secundária formada na ferramenta de corte .....  | 31 |
| 3.5   | Descrição dos componentes do termopar ferramenta-peça com compensação física .....                     | 34 |
| 3.5.1 | <i>Descrição da contra ponta rotativa adaptada com o mancal de mercúrio</i> ...                        | 35 |
| 3.5.2 | <i>Descrição do elemento de compensação física</i> .....   | 36 |
| 3.5.3 | <i>Isolação elétrica do corpo de prova e do porta-ferramenta</i> .....                                 | 36 |

## Capítulo IV

|   |    |
|---|----|
| <b>Calibração do sistema termopar ferramenta-peça</b> .....   | 39 |
| 4.1 Descrição do sistema termopar ferramenta-peça utilizado na calibração .....   | 39 |
| 4.1.1 <i>Descrição do dispositivo de aquecimento</i> .....  | 40 |
| 4.1.2 <i>Medição da temperatura de calibração</i> .....   | 42 |
| 4.1.3 <i>Medição da temperatura de compensação</i> .....  | 43 |
| 4.1.4 <i>Instalação do elemento de compensação física</i> .....   | 44 |
| 4.1.5 <i>Aquecimento com chama a gás oxi-acetileno</i> .....  | 45 |
| 4.2 Execução dos ensaios de calibração .....  | 46 |
| 4.3 Efeito da temperatura da junta de compensação física sobre a <i>f.e.m.</i> resultante .....   | 52 |
| 4.4 Resultados experimentais da calibração do sistema .....   | 53 |
| 4.5 Ajuste da curva de calibração .....   | 56 |
| 4.5.1 <i>Determinação da curva de regressão com a função de correlação e o melhor ajuste para os valores experimentais de f.e.m, temperatura de compensação e de calibração</i> .....   | 56 |
| 4.5.2 <i>Segmentação do intervalo de dados experimentais para forçar o ajuste de equações de retas nos respectivos segmentos, usando resultados da curva de regressão</i> .....         | 57 |
| 4.5.3 <i>Comparação entre os resultados das estimativas de <math>T_{interface}</math> feitas com o polinômio de calibração e com a segmentação dos resultados desse polinômio</i> ..... | 58 |



**Capítulo V**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Procedimentos experimentais .....</b>      | <b>63</b> |
| 5.1 Planejamento experimental .....           | 63        |
| 5.2 Equipamentos e materiais utilizados ..... | 65        |
| 5.3 Metodologia experimental .....            | 68        |

**Capítulo VI**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Resultados e discussões .....</b>  | <b>73</b> |
| 6.1 Considerações iniciais .....  | 73        |
| 6.2 Temperaturas superficiais nos porta-ferramentas e nas respectivas<br>ferramentas de corte ..... | 75        |
| 6.3 Temperatura na interface ferramenta/cavaco .....  | 83        |

**Capítulo VII**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Conclusões .....</b>                      | <b>92</b> |
| 7.1 - Considerações finais .....             | 92        |
| 7.2 - Propostas para trabalhos futuros ..... | 94        |
| <b>Referências Bibliográficas .....</b>      | <b>96</b> |

## LISTA DE SIMBOLOS

### LETRAS LATINAS

|   |  |          |
|---|--|----------|
| <b>AC</b>                                     | - ( <i>alternate current</i> ) relativo sinal de comportamento alternado |          |
| <b><math>a_i</math></b>                       | - coeficiente angular da equação da reta                                 |          |
| <b><math>a_p</math></b>                       | - profundidade de corte  | mm       |
| <b><math>b_i</math></b>                       | - coeficiente linear da equação da reta                                  |          |
| <b>CP</b>                                     | - corpo de prova   |          |
| <b>DC</b>                                     | - ( <i>direct current</i> ) relativo a sinal de comportamento contínuo   |          |
| <b>E</b>                                      | - efeito termoelétrico de Seebeck  | Volt/°C  |
| <b>f</b>                                      | - avanço   | mm/volta |
| <b>f.e.m.</b>                                 | - força eletromotriz   | Volt     |
| <b>i</b>                                      | - corrente elétrica  | A        |
| <b>K, K'</b>                                  | - constante de calibração  |          |
| <b>K</b>                                      | - termopar normalizado <i>chromell-alumel</i>                            |          |
| <b><math>L_f</math></b>                       | - percurso de avanço   | mm       |
| <b>MEV</b>                                    | - microscópio eletrônico de varredura                                    |          |
| <b><math>R^2</math></b>                       | - coeficiente de correlação  |          |
| <b>T</b>                                      | - temperatura  | °C       |
| <b>T</b>                                      | - termopar normalizado <i>cobre-constantan</i>                           |          |
| <b><math>T_1</math></b>                       | - temperatura da junção de medição                                       | °C       |
| <b><math>T_2</math></b>                       | - temperatura da junção de compensação                                   | °C       |
| <b><math>T_{ambiente}</math></b>              | - temperatura ambiente   | °C       |
| <b>TC</b>                                     | - termopar   |          |
| <b><math>T_{compensação}, T_{comp}</math></b> | - temperatura (da junta) de compensação                                  | °C       |
| <b><math>T_{interface}</math></b>             | - temperatura na interface ferramenta/cavaco                             | °C       |
| <b><math>T_{padrão}, T_{pad}</math></b>       | - temperatura padrão   |          |
| <b><math>T_R</math></b>                       | - Temperatura de referência (junta fria)                                 | °C       |
| <b><math>v_c</math></b>                       | - velocidade de corte  | m/s      |
| <b><math>v_f</math></b>                       | - velocidade de avanço   | mm/min   |

**LETRAS GREGAS**

|            |   |      |
|------------|---|------|
| $\Delta E$ | - diferença de potencial elétrico         | Volt |
| $\Delta T$ | - diferença de temperatura                | °C   |
| $\phi$     | - representação de diâmetro               | mm   |
| $\phi$     | - ângulo de cisalhamento                  | grau |
| $\gamma_0$ | - ângulo de saída da ferramenta           | grau |
| $\alpha_0$ | - ângulo principal de folga da ferramenta | grau |
| $\chi_r$   | - ângulo de posição da ferramenta         | grau |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Ilustrações da formação do cavaco elaborados por Mallock (1881-1982) a partir de observações em microscópio óptico, citado por Stephenson e Agapiou (2006): (a) início de usinagem de cobre e (b) usinagem de ferro forjado; Imagem obtida de ensaio <i>quick-stop</i> da usinagem de ferro puro em baixa velocidade de corte em (c) (CHILDS, 1972, citado por Childs et al. 2000 ..... | 8  |
| Figura 2.2 - Representação esquemática do mecanismo de formação do cavaco (MACHADO et. al., 2011) .....  | 10 |
| Figura 3.1 - Representações esquemáticas (a) de um circuito termopar genérico e (b) do circuito com a conexão do sistema de medição do potencial elétrico $E_A$ .....  | 20 |
| Figura 3.2 – Ilustração esquemática de um sistema termopar ferramenta-peça no torneamento (DAVIES et.al., 2007) .....  | 21 |
| Figura 3.3 – Ilustrações de aplicações de mancal de mercúrio: (a) através do eixo árvore do torno (GÖKKAYA, 2004); (b) através da ponta rotativa da contra ponta (INGRACI et. al.2011) .....   | 22 |
| Figura 3.4 – Ilustração da implantação do mancal de mercúrio em um contra ponta para uso no método do termopar ferramenta-peça (ALVELID, 1970) .....   | 24 |
| Figura 3.5 – Esquema para medição da temperatura de corte usando o método do termopar ferramenta-peça ressaltando os contatos termoelétricos .....   | 25 |
| Figura 3.6 - Representação esquemática de um circuito termopar básico .....  | 26 |
| Figura 3.7 – Ilustração mostrando a equivalência entre dois circuitos termopares submetidos, internamente, a diferentes temperaturas – 1ª lei dos termopares .....   | 26 |
| Figura 3.8 – Ilustração do efeito da inserção de um material C em um dos ramos do termopar – 2ª lei dos termopares .....   | 27 |
| Figura 3.9 – Ilustração do efeito da inserção de um material C em uma das junções, entre os ramos A e B de um termopar – 3ª lei dos termopares .....   | 27 |
| Figura 3.10 – Ilustração da propriedade associativa da <i>fem</i> entre materiais de um termopar – 4ª lei dos termopares .....   | 28 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.11 – Ilustração da propriedade associativa da <i>fem</i> entre diferentes temperaturas das junções do termopar – 5ª lei dos termopares .....   | 28 |
| Figura 3.12 – Representação esquemática do circuito termoeletrico do aparato experimental .....   | 29 |
| Figura 3.13 - Circuito elétrico do sistema termopar ferramenta-peça usando o conceito de compensação física .....   | 30 |
| Figura 3.14 – Representação esquemática do aparato experimental construído em laboratório usando compensação física .....   | 33 |
| Figura 3.15 – Curva de calibração do sistema equivalente ao aparato peça-ferramenta ..  | 34 |
| Figura 3.16 – Foto ilustrativa dos componentes do contra-ponta modificado para uso no sistema termopar ferramenta-peça. (baseado em Alvelid, 1970) .....  | 35 |
| Figura 3.17 – Foto ilustrativa do <i>elemento de compensação física</i> instalado no torno em (a) e da sua conexão com a ferramenta de corte montada em posição invertida em (b): 1 - material do corpo de prova; 2 - material da ponta rotativa da contra ponta (aço SAE 1050) ..... | 37 |
| Figura 3.18 - Ilustração da isolação elétrica do corpo de prova no rebaixo de fixação pela placa do torno: (a) com bucha de <i>Technyl</i> ®; (b) com lixa ferro e uso de bucha de alumínio .....   | 37 |
| Figura 3.19 – Ilustração da fixação do corpo de prova pela placa do torno com bucha elástica de aço, utilizando-se de cinta e disco de lixa ferro para a isolação elétrica do mesmo .....   | 38 |
| Figura 3.20 – Imagens do suporte de alumínio preparado para a execução dos ensaios, mostrando a aplicação de placas de <i>Celeron</i> ® para a isolação elétrica e a indicação da posição de conexão do elemento de compensação física (setas em vermelho) .....                      | 38 |
| Figura 4.1 - Representação esquemática da posição de instalação do <i>elemento de aquecimento</i> durante a calibração do sistema termopar ferramenta-peça .....  | 40 |
| Figura 4.2 – Representação esquemática do dispositivo de aquecimento usado na calibração do sistema termopar ferramenta-peça .....  | 41 |
| Figura 4.3 – Reprodução de fotografia mostrando os dois termopares tipo K instalados no <i>elemento de aquecimento</i> para a medição da temperatura de calibração (ampliação: 10 x) .....  | 42 |
| Figura 4.4 – Imagem do dispositivo de aquecimento após ensaios de calibração, apresentando a marca deixada pela ferramenta durante a formação da junta quente e a proximidade desta para os termopares padrão (indicação da seta) .....   | 43 |
| Figura 4.5 – Reprodução de fotografia mostrando os dois termopares tipo T instalados para medição da temperatura de compensação (ampliação: 10x) .....  | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.6 – Ilustrações da montagem do elemento de compensação no torno: (a) para a realização dos experimentos; (b) para a realização dos ensaios de calibração .....   | 44 |
| Figura 4.7 – Reprodução de fotografia mostrando o estabelecimento da <i>junta quente</i> e da <i>junta de compensação</i> durante os ensaios de calibração .....  | 45 |
| Figura 4.8 – Imagem do sistema de calibração destacando o uso do aquecimento com maçarico .....   | 46 |
| Figura 4.9 – Representação gráfica dos resultados de três ensaios de calibração realizados com o Método I .....   | 48 |
| Figura 4.10 - Representação gráfica dos resultados de três ensaios de calibração realizados com o Método II (10º, 13º e 14º ensaios) .....  | 49 |
| Figura 4.11 – Ilustração do posicionamento dos termopares padrão usados na calibração do sistema termopar ferramenta-peça .....   | 50 |
| Figura 4.12 – Representações gráficas das temperaturas no ambiente, da junta de compensação ( $T_2$ ), da junção peça e contra ponta ( $T_3$ ) e da conexão entre os componentes do elemento de aquecimento ( $T_6$ ): (a) 2º ensaio com o Método I e (b) 3º ensaio com o Método II (11º ensaio na ordem geral) ..... | 51 |
| Figura 4.13 – Representação gráfica das curvas de calibração correspondentes aos ensaios realizados com o Método I .....  | 54 |
| Figura 4.14 – Representação gráfica das curvas de calibração correspondentes aos ensaios realizados com os Método I e II .....  | 55 |
| Figura 4.15 – Representação gráfica dos resultados dos ensaios de calibração e a respectiva curva de calibração de melhor ajuste .....  | 57 |
| Figura 4.16 – Representação gráfica do polinômio de calibração de 5º grau e das retas de regressão ajustadas a 98 segmentos da sua curva, no intervalo entre 4,0 e 10,0 mV. ....  | 59 |
| Figura 4.17–Representação gráfica da diferença entre os valores calculados pelo polinômio de calibração e pelas retas de regressão dos seus segmentos, no intervalo 4 a 10 mV .....   | 60 |
| Figura 4.18 – Gráficos da temperatura na interface $T_{interface}$ calculada com o polinômio de calibração .....  | 61 |
| Figura 4.19 – Gráficos da temperatura na interface $T_{interface}$ calculada com 98 segmentos do polinômio de calibração .....  | 61 |
| Figura 4.20 – Diferença entre os valores de $T_{interface}$ estimados com o polinômio de calibração e com as equações lineares ajustadas aos 98 segmentos desse polinômio ...   | 62 |
| Figura 5.1 - Representação da geometria dos corpos de prova usados nos testes .....   | 65 |
| Figura 5.2 – Imagem de um torno universal eletrônico, idêntico ao usado nos experimentos ( <i>torno Diplomat, modelo Revolution RV 220, potência de 5,7 kW</i> ) .....  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.3 – Ilustração das posições dos termopares na ferramenta de corte (1, 2, 3 e 4), no porta-ferramenta (5, 6, 7 e 8) e da conexão do elemento de compensação física (círculo em vermelho) .....  | 67 |
| Figura 5.4 – Foto ilustrativa do porta-ferramenta de alumínio (com isolamento de <i>Celeron</i> ®) contendo quatro termopares (TC) instalados na ferramenta (TC <sub>1</sub> , TC <sub>2</sub> , TC <sub>3</sub> e TC <sub>4</sub> ) e no porta-ferramenta (TC <sub>5</sub> , TC <sub>6</sub> , TC <sub>7</sub> e .....)                  | 69 |
| Figura 5.5 – Ilustração da fixação do corpo de prova pela placa do torno com bucha de aço elástica e da aplicação de elementos de lixa ferro para a isolamento elétrica .....   | 70 |
| Figura 5.6 – Fotos ilustrativas da ferramenta de corte na posição convencional (a) e invertida com a superfície de saída voltada para baixo (b) .....   | 71 |
| Figura 6.1 – Foto ilustrativa do porta-ferramenta de alumínio (com isolamento de <i>Celeron</i> ®) contendo quatro termopares (TC) instalados na ferramenta (TC <sub>1</sub> , TC <sub>2</sub> , TC <sub>3</sub> e TC <sub>4</sub> ) e no porta-ferramenta (TC <sub>5</sub> , TC <sub>6</sub> , TC <sub>7</sub> e TC <sub>8</sub> ) ..... | 75 |
| Figura 6.2 - Figura 6.2 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de titânio: TC <sub>1</sub> a TC <sub>4</sub> - ferramenta de corte; TC <sub>5</sub> a TC <sub>8</sub> - porta-ferramenta .....  | 76 |
| Figura 6.3 - Figura 6.2 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de aço inoxidável: TC <sub>1</sub> a TC <sub>4</sub> - ferramenta de corte; TC <sub>5</sub> a TC <sub>8</sub> - porta-ferramenta .....   | 76 |
| Figura 6.4 - Figura 6.2 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de latão: TC <sub>1</sub> a TC <sub>4</sub> - ferramenta de corte; TC <sub>5</sub> a TC <sub>8</sub> - porta-ferramenta .....  | 77 |
| Figura 6.5 - Figura 6.2 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de titânio: TC <sub>1</sub> a TC <sub>4</sub> - ferramenta de corte; TC <sub>5</sub> a TC <sub>8</sub> - porta-ferramenta .....  | 77 |
| Figura 6.6 - Figura 6.2 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de cobre: TC <sub>1</sub> a TC <sub>4</sub> - ferramenta de corte; TC <sub>5</sub> a TC <sub>8</sub> - porta-ferramenta .....  | 78 |
| Figura 6.7 – Imagens do suporte de aço inoxidável, com destaque para a ferramenta e o posicionamento dos termopares nº 1 (a) e nº 3 (b) .....   | 79 |
| Figura 6.8 – Temperaturas médias em quatro posições no inserto, em função do tempo.   | 81 |
| Figura 6.9 – Temperaturas médias em quatro posições no suporte, em função do tempo  | 82 |
| Figura 6.10 - Representação gráfica das médias das estimativas da temperatura na interface $T_{interface}$ dos ensaios com os suportes de titânio, aço inoxidável, latão, alumínio e cobre .....  | 84 |
| Figura 6.11 - Reprodução de fotografias obtidas em microscópio óptico, das áreas de contato das ferramentas usadas com o suporte cobre (a) e com o suporte de titânio (b).  | 85 |
| Figura 6.12 - Reprodução de imagens obtidas em MEV de uma ferramenta usada nos experimentos com o suporte de titânio: (a) aresta de corte; (b) imagem ampliada da aresta de corte - <i>Detalhe A</i> .....  | 86 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 6.13 - Representação gráfica das médias das estimativas da temperatura na interface $T_{interface}$ dos ensaios com os suportes de latão, de alumínio e de cobre .....        | 87 |
| Figura 6.14 - Representação gráfica das médias das estimativas da temperatura na interface $T_{interface}$ dos ensaios com os suportes de aço inoxidável e de titânio .....          | 88 |
| Figura 6.15 - $T_{interface}$ dos ensaios dos suportes de cobre, alumínio, latão, aço inoxidável e titânio durante os 30 segundos iniciais de usinagem .....                         | 90 |
| Figura 6.16 - Apresentação da <i>fem</i> térmica média no intervalo inicial de 60 s, para os ensaios com porta ferramentas de titânio, aço inoxidável, latão, alumínio e cobre ..... | 91 |



## LISTA DE TABELAS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabela 5.1 | Delineamento experimental utilizado nesse trabalho .....  | 64 |
| Tabela 5.2 | Quadro comparativo de condutividade térmica de materiais semelhantes aos utilizados na fabricação dos porta-ferramentas (GEM, 2001) .....             | 66 |
| Tabela 6.1 | Valores médios e respectivos desvios padrão da velocidade de corte ( $v_c$ ), do avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) experimentais ..... | 74 |

KAMINISE, A. K. **Estudo da Influência do Material do Porta-ferramenta sobre as Temperaturas de Usinagem no Torneamento**. 2012. 105 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

## Resumo

O objetivo principal deste trabalho é a investigação experimental do efeito que o material do porta-ferramenta exerce sobre a temperatura na interface ferramenta/cavaco e sobre as temperaturas superficiais da ferramenta de corte e do próprio porta-ferramenta. O estudo foi desenvolvido com a operação de torneamento cilíndrico externo de ferro fundido cinzento, a seco, com insertos de metal duro, em parâmetros de corte fixos. Cinco portas-ferramentas foram confeccionados em materiais com condutividades térmicas diferentes, sendo esses: cobre, latão, alumínio, aço inoxidável e liga de titânio. Os portas-ferramentas são geometricamente idênticos e têm as características construtivas de um porta-ferramenta comercial próprio ao torneamento daquele material. Mediu-se a temperatura na interface ferramenta/cavaco usando o método do termopar ferramenta-peça e as temperaturas superficiais na ferramenta e nos suportes, por meio de termopares convencionais do tipo *T*. O sistema termopar ferramenta-peça foi modificado no sentido de se desenvolver um procedimento experimental para a compensação física de forças eletromotrizes secundárias e parasitas. Destaca-se a execução de modificações em uma contra ponta rotativa convencional para o seu uso na condução do sinal da força eletromotriz entre a peça e um condutor estacionário sem, contudo, alterar significativamente a sua rigidez na fixação da peça. Nessas modificações, aplicou-se uma isolamento elétrica permanente, implantou-se um mancal de mercúrio no seu interior e promoveu-se mudanças nas suas conexões internas, que poderiam agir como junções secundárias, transformando-as em junções de referência à temperatura ambiente. A calibração do sistema termopar ferramenta-peça foi desenvolvida sobre o próprio aparato experimental usando as modificações implantadas nesse sistema. Os resultados obtidos no trabalho mostram que os materiais usados nos suportes influenciam nas temperaturas superficiais da ferramenta e do porta-ferramenta, porém, que tais materiais não tem efeito significativo sobre as temperaturas da interface ferramenta/cavaco. Além disso, o trabalho apresenta, também, contribuições ao uso e calibração do método do termopar ferramenta-peça.

---

*Palavras chave: Usinagem. Temperatura na interface. Termopar ferramenta-peça. Calibração. Porta-ferramenta.*

KAMINISE, A. K. **Study on the Influence of Toolholder Material on the Cutting Temperatures in Turning Machining**. 2012. 119f. Doctorate Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### **Abstract**

The main objective of this work is the experimental investigation of the effect that the material of the toolholder has on the temperature at tool-chip interface and on the surface temperatures of the cutting tool and toolholder. The study was conducted in dry turning of gray iron with uncoated cemented carbide inserts, using the same cutting parameters. Five toolholders had been confectioned in materials having different thermal conductivity, these being: copper, brass, aluminum, stainless steel and titanium alloy. The toolholders are identical and have the constructive aspects obtained from a commercial toolholder for turning that material. The temperature at the tool-chip interface was measured using the tool-workpiece thermocouple method and the surface temperatures in the tools and the toolholders, by conventional type T thermocouples. The system was modified in order to develop an experimental procedure for the physical compensating of the secondary and parasites thermoelectric signals (emf). Also, modifications was carried out in a conventional tailstock for use in driving the emf signal between the workpiece and a stationary conductor, but without significantly altering the stiffness of the system. The tailstock was electric insulated and a mercury bearing was mounted inside it and their internal connections were turned in reference junctions at room temperature because on otherwise it could act as secondary junctions. The calibration of the tool-workpiece thermocouple was developed in the same experimental apparatus using the modifications implemented in this system. Besides the results obtained with the investigation of the effects of the toolholder material on the surface temperatures of the tool and the tool holder and on the tool-chip interface temperature, this research also presents contributions to the use and performance of the tool-workpiece thermocouple method.

---

*Keywords: Machining. The interface temperature. Tool-workpiece thermocouple. Calibration. Toolholder.*

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A usinagem é o processo de fabricação mais empregado na indústria da manufatura metal-mecânica e pode ser definida como: “*operação que ao conferir à peça forma, dimensões e acabamento, produz cavaco*”, (MACHADO et al., 2011). Essa atividade estabeleceu a sua importância e presença a partir da Revolução Industrial ocorrida no século XVIII em resposta às necessidades dos setores produtivos para o contínuo desenvolvimento de produtos, que eram concebidos e elaborados com exigências dimensionais e geométricas somente executáveis de forma viável com processos de usinagem. O desenvolvimento da máquina a vapor por James Watt, por exemplo, foi prejudicado pela falta de equipamentos para fabricação de componentes e, principalmente, dos cilindros de pressão com a precisão dimensional necessária (TRENT e WRIGHT, 2000). O projeto passou por uma interrupção de 10 anos e somente foi retomado, conduzindo à difusão da máquina a vapor, após John Wilkinson construir uma máquina-ferramenta específica para mandrilar tais cilindros de pressão, em 1776, (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006). Esse fato é considerado um dos principais desenvolvimentos da usinagem dos metais e marcou o surgimento da máquina-ferramenta moderna (TRENT e WRIGHT, 2000), (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Após a introdução da máquina a vapor, houve significativos desenvolvimento e expansão tecnológicos, levando à implantação da indústria de máquinas-ferramentas que permitiam a usinagem de todas as geometrias básicas necessárias - superfícies cilíndricas e planas, entalhes, sulcos, furos e roscas (TRENT e WRIGHT, 2000), (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006). Em consequência, houve a diversificação dos produtos ofertados pela indústria da manufatura e isso aumentou o uso dos materiais metálicos daquele momento como ferro fundido cinzento, ferro forjado, latão e bronze. Esses materiais eram facilmente usinados com ferramentas de aço temperado de alto teor de carbono, atendendo às necessidades de precisão dimensional da época. No entanto, tais materiais de ferramentas

de corte apresentavam condições limitadas de uso relacionadas ao desgaste e se mostravam ineficientes às emergentes e inovadoras necessidades industriais: o aumento de produção e a redução de custos (TRENT e WRIGHT, 2000).

Nesse novo contexto, o desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação do aço (processos de *Bessemer* e *Open Hearth*) levou-o a ser utilizado como principal material estrutural, (TRENT e WRIGHT, 2000). No entanto, por oferecer maior dificuldade à usinagem em relação aos materiais metálicos, o seu uso em escala comercial exigiu a busca por materiais para ferramentas visando à melhoria de desempenho. O evento do desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte tornou-se um marco no desenvolvimento da tecnologia da usinagem.

A introdução do aço rápido na fabricação de ferramentas de corte, desenvolvido por Frederick W. Taylor e Maunsel Write por volta de 1900, representou o primeiro grande salto da tecnologia da usinagem dos metais (MACHADO et al., 2011), pois as velocidades de corte puderam ser praticadas com aumentos de 10 vezes em relação à utilização de ferramentas de aço temperado, o que foi muito significativo para o correspondente aumento de produtividade. Com o advento do metal duro, descoberto por Karl Schöter em 1925, houve o segundo grande momento de evolução da usinagem, pois, novamente, as velocidades de corte puderam ser aumentadas em mais 10 vezes (MACHADO et. al., 2011). A disseminação do uso do aço rápido e do metal duro provocou, também, o desenvolvimento da indústria de máquinas-ferramentas, com projetos mais robustos e capazes de executar maiores taxas de remoção de material, e de ferramentas de corte, com a elaboração de geometrias mais eficientes e com o uso de revestimentos para melhorar o seu desempenho.

Após a 2ª Guerra Mundial, a indústria automobilística e a aeronáutica tornaram-se mais influentes sobre a tecnologia de usinagem. Em ambos os casos, as suas necessidades próprias estimularam o desenvolvimento de materiais metálicos com melhores propriedades mecânicas como os aços-carbono altamente ligados, aços inoxidáveis, as ligas termo resistentes e superligas, os materiais compósitos e os materiais endurecidos. Conseqüentemente, isso estimulou o desenvolvimento tecnológico na indústria de ferramentas de corte. Assim, houve a introdução de ferramentas de materiais cerâmicos (à base de óxido de alumínio ou de nitreto de silício) a partir de 1950, de materiais compósitos (denominados *cermet*), a partir de 1970, e mais recentemente, de materiais ultra-duros (diamantes naturais e sintéticos, nitreto cúbico de boro e nitreto cúbico de boro policristalino). Atualmente, pode-se considerar que, para muitos materiais usinados, o limite da velocidade de corte é dado pelas limitações das máquinas-ferramentas e não mais pelas propriedades do material da ferramenta de corte (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Do exposto anteriormente, podemos observar que o desenvolvimento da tecnologia de usinagem ocorreu a partir de necessidades percebidas no ambiente da produção. Uma leitura mais detalhada sobre o desenvolvimento da usinagem é apresentada pelos autores STEPHENSON e AGAPIOU (2006).

Verifica-se que a tecnologia da usinagem passou por dois grandes momentos de desenvolvimento relacionados à descoberta de novos materiais de ferramentas de corte - o aço rápido e metal duro, respectivamente. No entanto, assim como aconteceu com as ferramentas de aço temperado no final do século XIX, os materiais para ferramenta de corte tem limites de uso que são estabelecidos à medida que a sua capacidade vai sendo explorada pela combinação entre os parâmetros de corte (velocidade de corte  $v_c$ , avanço  $f$  e profundidade de corte  $a_p$ ), a geometria da ferramenta e as características do material a ser usinado. Esse limite de utilização visa atingir a durabilidade ou a vida da ferramenta economicamente viável.

A busca pelo aumento de produtividade na usinagem normalmente conduz ao incremento na velocidade de corte. A consequência imediata é a elevação da temperatura da ferramenta, que pode ativar ou acelerar os mecanismos de desgaste ou provocar avarias, causando uma falha catastrófica prematura. O procedimento imediato usado desde o início da história da usinagem para se obter a redução da temperatura da ferramenta é a utilização de fluidos de corte. Segundo Machado et. al. (2011) citando RUFFINO (1977), em 1894, Taylor conseguiu o aumento da velocidade de corte em 33 % sem prejudicar a vida da ferramenta com o uso de arrefecimento com grande quantidade de água. Nesse sentido, o uso de métodos e técnicas de arrefecimento da ferramenta visa ao aumento da vida da ferramenta através da redução da temperatura da aresta de corte na interface ferramenta/cavaco (MACHADO et. al., 2011).

Assim, devido à importância da temperatura de usinagem sobre a vida da ferramenta, esse se tornou um assunto muito pesquisado e diretamente relacionado ao desenvolvimento de novos materiais e geometrias para ferramentas de corte e de novas tecnologias e componentes para aplicação de fluidos de corte.

Em geral, os estudos sobre a temperatura de usinagem analisam um sistema composto por peça, cavaco e ferramenta de corte desconsiderando os efeitos do contato térmico entre essa ferramenta e o suporte porta-ferramenta. Especificamente nos trabalhos incluindo a presença do porta-ferramenta no torneamento concentram-se em modificações nesse suporte para o uso de sistemas de arrefecimento da ferramenta de corte (KAMINSKI e ALVELID, 2000), (AHMED et. al., 2007), (YILDIZ e NALBANT, 2008), (STANFORD et. al., 2009), (SHARMA et. al., 2009), (AHMAD-YAZID et. al., 2010). No entanto, numa abordagem por simulação numérica que considerou a troca de calor entre ferramenta e sua vizinhança,

CARVALHO (2005) e CARVALHO et. al. (2006) mostraram que a presença do porta-ferramenta afeta significativamente a dissipação da taxa de transferência de calor na interface de corte no torneamento de ferro fundido cinzento a seco.

Os resultados obtidos por CARVALHO (2005) estimularam o desenvolvimento desse trabalho cujo objetivo principal é a investigação experimental do efeito que o material do porta-ferramenta exerce sobre as temperaturas na interface ferramenta/cavaco estimadas pelo método do termopar ferramenta-peça e sobre as temperaturas superficiais da ferramenta de corte e do próprio porta-ferramenta, medidas com termopares convencionais do tipo T.

Os ensaios foram realizados com o torneamento cilíndrico externo de ferro fundido cinzento, a seco, com pastilhas de metal duro não revestidas usando cinco portas-ferramentas geometricamente idênticos, mas em materiais que apresentam propriedades térmicas distintas – cobre eletrolítico, alumínio comercialmente puro, latão, aço inoxidável e liga de titânio.

Apresenta-se no Capítulo II uma revisão bibliográfica sobre os dois temas em questão - o efeito do material do suporte sobre a temperatura na interface ferramenta/cavaco e sobre a temperatura da ferramenta de corte, respectivamente. Incluiu-se ainda nesse capítulo a teoria fundamental que descreve os mecanismos de formação do cavaco e a geração de calor na interface ferramenta/cavaco. Além disso, apresentam-se os métodos de medição de temperatura na interface ferramenta/cavaco, procurando-se identificar os mais adequados ao torneamento de ferro fundido cinzento.

No Capítulo III, descreve-se o Método do termopar ferramenta-peça com compensação física. Nesse capítulo apresentam-se as modificações realizadas no sistema termopar ferramenta/peça original para a obtenção da compensação física das junções secundárias. Descreve-se o elemento de compensação física que é conectado entre o inserto de metal duro e o fio condutor, visando à eliminação da junção secundária que se formaria se a ferramenta fosse conectada diretamente ao fio condutor (STEPHENSON, 1993). Apresentam-se, também, as modificações desenvolvidas numa contra ponta rotativa convencional para transformá-la em um mancal de mercúrio que permite a continuidade do sinal elétrico, mantendo a isolamento elétrica para a massa da máquina (ALVELID, 1970). Nessa contra ponta, foram introduzidas outras modificações que propiciaram a formação de juntas frias à temperatura ambiente, onde poderiam ocorrer outras junções secundárias. O uso da estrutura de uma contra ponta rotativa convencional juntamente com um sistema simples de fixação da peça à placa do torno, mantendo a isolamento elétrica nesse ponto, aumentou significativamente a rigidez do sistema, reduzindo a trepidação ou *chatter* durante a usinagem que produz o componente AC no sinal da *f.e.m.* (DONOVAN e SCOTT, 1995).

A calibração do sistema termopar ferramenta-peça é apresentada no Capítulo IV. Nele descreve-se o método de calibração do sistema termopar ferramenta/peça com o aquecimento sendo produzido com uma chama de maçarico a gás oxiacetileno. A calibração foi feita na própria máquina-ferramenta, com os mesmos elementos usados em um ensaio de torneamento, porém, com a introdução de um elemento específico de aquecimento colocado entre a peça e a ferramenta para produzir a temperatura de calibração.

Apresenta-se, no Capítulo V, o planejamento experimental, a metodologia e os procedimentos experimentais usados na realização dos ensaios e na medição das temperaturas investigadas. As modificações para a execução dos ensaios com a ferramenta de corte posicionada com a superfície de saída voltada para baixo são também mostradas.

No Capítulo VI são apresentados os resultados obtidos e as discussões sobre os mesmos considerando, separadamente, as temperaturas superficiais na ferramenta, nos portas-ferramentas e as estimativas das temperaturas na interface ferramenta/cavaco.

Conclui-se o trabalho apresentando-se as conclusões verificadas e as considerações sobre suas contribuições quanto ao método do termopar ferramenta-peça. Sugestões para trabalhos futuros são também apresentadas.



## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Em geral, os estudos sobre a temperatura de usinagem analisam um sistema composto por peça, cavaco e ferramenta de corte desconsiderando os efeitos do contato térmico entre essa ferramenta e o suporte porta-ferramenta.

Especificamente nos trabalhos que tratam da temperatura de usinagem incluindo a presença do porta-ferramenta no torneamento, os objetivos se concentram em modificações nesse suporte para o uso de sistemas de arrefecimento visando à redução da temperatura da ferramenta de corte. Tais estudos investigam a aplicação de fluidos a alta pressão (KAMINSKI e ALVELID, 2000), o uso de ar comprimido injetado na interface ferramenta/cavaco (SHARMA et. al., 2009), a aplicação de fluidos criogênicos (AHMED et. al., 2007), (YILDIZ e NALBANT, 2008), (STANFORD et. al., 2009), (AHMAD-YAZID et. al., 2010) dentre outros procedimentos visando ao aumento da vida da ferramenta.

No entanto, numa abordagem que considerou a troca de calor entre ferramenta e sua vizinhança, os resultados de Carvalho (2005) e Carvalho et.al.. (2006) mostraram que a temperatura da ferramenta de corte é também influenciada pelo material desse suporte. Em sua tese de doutorado realizada no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM - FEMEC/UFU), Carvalho (2005) fez uma análise por simulação numérica usando o método dos volumes finitos num estudo sobre a temperatura na interface ferramenta/cavaco com uma modelagem que incluiu a ferramenta e o porta-ferramenta. Nessa simulação ele considerou o torneamento de ferro fundido, a seco. Além da elaboração de uma metodologia numérica para determinar a temperatura na interface ferramenta/cavaco, o autor obteve resultados que mostraram a existência de correlação entre as propriedades térmicas do material do porta-ferramenta e as temperaturas da ferramenta de corte.

Com base nos resultados apontados por Carvalho (2005) e Carvalho et.al.. (2006), este trabalho foi proposto e desenvolvido com foco nas temperaturas de usinagem visando à

comprovação experimental de que há influência do material do suporte sobre o campo de temperatura da ferramenta de corte e, também, para verificar se essas alterações afetam a temperatura na interface ferramenta/cavaco.

Embora esse estudo pudesse ser desenvolvido com a usinagem de outro material, utilizamos o processo de torneamento de ferro fundido cinzento devido à disponibilidade no LTCM de cinco portas-ferramentas confeccionados em geometrias idênticas, própria ao seu torneamento, em materiais que apresentam propriedades térmicas distintas - cobre eletrolítico, alumínio comercialmente puro, latão, aço inoxidável e liga de titânio.

O desenvolvimento dessa investigação partiu da revisão bibliográfica sobre a interface ferramenta/cavaco, iniciando pelos conceitos dos mecanismos de formação do cavaco, passando à interface ferramenta/cavaco, à medição de temperatura de usinagem e, especificamente, à medição de temperatura na interface ferramenta/cavaco.

A compreensão do mecanismo de formação do cavaco é de importância fundamental no estudo de fenômenos relacionados à interação peça/ferramenta/cavaco na usinagem, pois o desenvolvimento das ações nessa interação é essencialmente idêntico em todos os processos de corte dos metais. Por isso, independentemente da escolha desse processo - tipo de operação, características e recursos da máquina-ferramenta, matéria-prima, material e geometria da ferramenta de corte, condições e parâmetros de corte, essa interação peça/ferramenta/cavaco representa o foco da investigação em usinagem, pois ela fornece uma base comum a todas as operações de corte (TRENT e WRIGHT, 2000). Assim, essa região de interação, denominada por *interface peça/ferramenta/cavaco*, desde o início dos estudos sobre usinagem dos metais há mais de cem anos, é motivo de contínuas pesquisas que visam à compreensão dos mecanismos e fenômenos envolvidos nessas interfaces.

## **2.1 - Breve histórico sobre os estudos da formação do cavaco em usinagem**

Os primeiros registros de estudos sobre a interface peça/ferramenta/cavaco são atribuídos a Time (1870) e Tresca (1873), citados por Boothroyd e Knight (1989) onde, essencialmente, trataram do *mecanismo da formação do cavaco*. No entanto, foi Mallock (1881), citado por Boothroyd e Knight (1989) e Childs et. al. (2000) quem sugeriu que, nos processos de corte, o cavaco se forma por cisalhamento do material. Além disso, Mallock propôs, também, que o atrito existente entre o cavaco e a ferramenta seria de grande importância na determinação da deformação do cavaco e que esse atrito poderia ser reduzido com o uso de lubrificantes, embora ele achasse difícil imaginar como esse lubrificante atingiria essa interface (citado por Childs et al., 2000).

As conclusões apresentadas por Mallock foram baseadas na observação de cavacos de materiais ferrosos e não ferrosos em microscópio com ampliação de cinco vezes (citado por Childs et al., 2000).

As Figura 2.1 (a) e (b) são reproduções de ilustrações de formação do cavaco atribuídas a Mallock (1881-1882), citado por Stephenson e Agapiou (2006). A Figura 2.1c é uma imagem de ensaio *quick-stop* realizado em usinagem de ferro puro em velocidade de corte menor que 1 m/min (Childs et al., 2000, citando Childs, 1972). Comparando as imagens das Figuras 2.1, pode-se concluir que os recursos usados por Mallock já permitiam a visualização dos aspectos da formação do cavaco de forma semelhante aos recursos mais recentes. Segundo Childs et al. (2000), as conclusões de Mallock estavam próximas da lei de formação do cavaco apresentadas por Ernest e Merchant, na década de 1940.

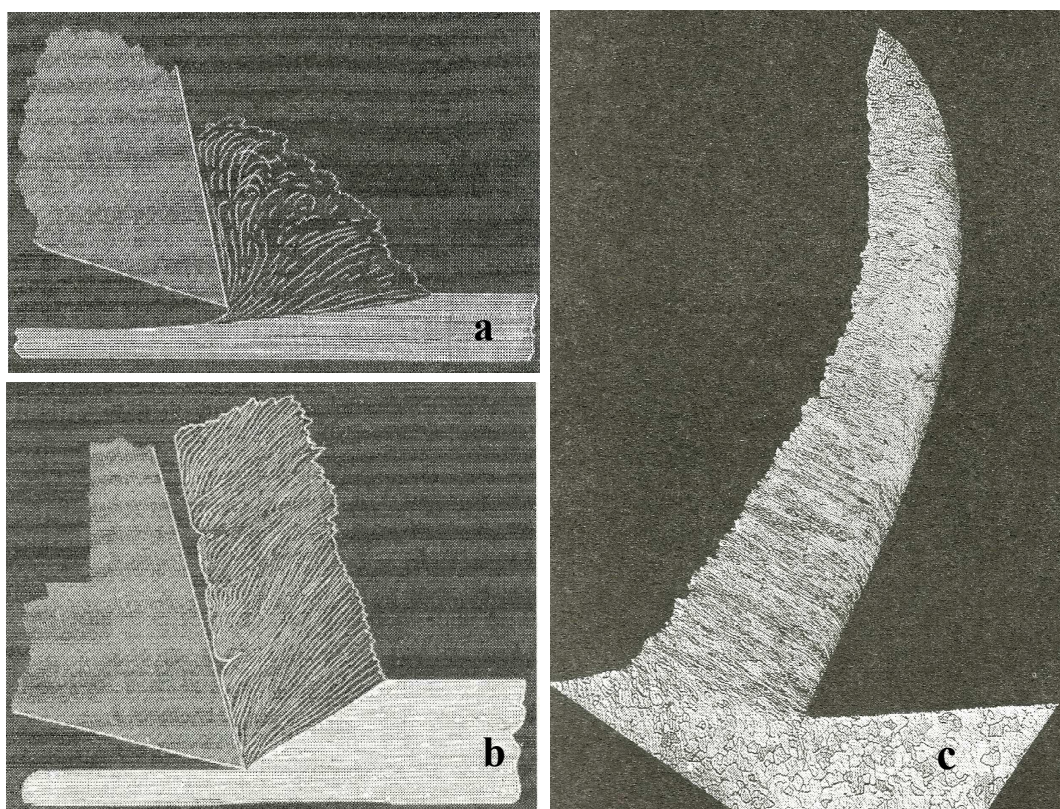


Figura 2.1 - Ilustrações da formação do cavaco elaborados por Mallock (1881-1882) a partir de observações em microscópio óptico, citado por Stephenson e Agapiou (2006): (a) início de usinagem de cobre e (b) usinagem de ferro forjado; Imagem obtida de ensaio *quick-stop* da usinagem de ferro puro em baixa velocidade de corte em (c) (CHILDS, 1972, citado por Childs et al. 2000).

Segundo Childs et. al. (2000), os trabalhos de Tresca e Mallock introduziram dois dos principais elementos da teoria da usinagem - a plasticidade e o atrito na interação

ferramenta/cavaco. Além disso, embora o interesse de Tresca estivesse no forjamento a quente, ele conhecia sobre o aquecimento provocado pela deformação plástica e, num trabalho de 1878, descreveu que cerca de 94 % do trabalho consumido no forjamento se convertia em calor. Portanto, ele contribuiu, também, com outro elemento importante para a teoria da usinagem que é conversão do trabalho ou energia de deformação plástica em calor.

A complexidade que envolve o mecanismo de formação do cavaco, mesmo considerando a forma mais simplificada do cavaco reto e do cisalhamento ocorrendo em um plano, limitou o avanço da teoria de usinagem e, embora os fundamentos da teoria da usinagem tenham sido estabelecidos entre os anos 1870 e 1905, somente a partir da década de 1940 houve novos avanços mais significativos quanto à interação ferramenta/cavaco (CHILDS et al., 2000). Nesse mesmo período, houve grande impulso da tecnologia de usinagem com o desenvolvimento de ferramentas de aço rápido por Taylor e White por volta de 1900 - citado por Boothroyd e Knight (1989); Childs et al (2000) e Stephenson e Agapiou (2006).- e, posteriormente, um novo impulso com a descoberta do metal duro em 1925 por Karl Schöter (MACHADO et. al., 2011). A partir dos anos 80, o uso de métodos numéricos como o Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos permitiram grandes avanços no estudo da formação do cavaco.

## **2.2 - Mecanismos de formação do cavaco**

Os estudos sobre a formação do cavaco consideram que esse processo acontece em etapas distintas, ciclicamente e em velocidades e deformações muito elevadas (FERRARESI, 1977). Essas etapas podem ser descritas considerando-se o movimento do material da peça em relação à aresta de corte da ferramenta (MACHADO et. al., 2011):

- *recalque inicial do material*: ao iniciar o processo de corte, o material da peça se aproxima da ferramenta e é pressionado contra a aresta de corte, passando a sofrer um esforço de compressão na correspondente área de contato. A continuidade do movimento da peça provoca a deformação elástica da porção de material que entra em contato com a superfície de saída da ferramenta, pressionando a ferramenta nesse contato.

- *deformação plástica e ruptura do material*: devido à continuidade do processo, a porção de material que comprime a superfície de saída da ferramenta em regime de deformação elástica, passa ao regime de deformação plástica. Essa deformação plástica aumenta progressivamente até que ocorre a formação de um estado de tensões no material à frente da aresta de corte, na região localizada entre a peça e a porção de material

pressionada contra a superfície de saída da ferramenta, que favorece a iniciação e propagação de uma trinca no material deformado, levando-o à ruptura. Essa ruptura normalmente acontece sob um estado de tensões de cisalhamento ou resultante da combinação de tensões de compressão ou tração e de cisalhamento, que está relacionado à natureza dúctil ou frágil do material. A região onde ocorre ruptura é denominada *zona de cisalhamento primário* e para simplificar o tratamento matemático em análises da formação do cavaco, usa-se modelos em que essa região é considerada um *plano de cisalhamento*. Nesses modelos, a ruptura ocorre segundo esse plano de cisalhamento. A Figura 2.2 apresenta uma ilustração da seção longitudinal da formação do cavaco, mostrando a localização da *zona de cisalhamento primário* e a *projeção do plano de cisalhamento*. Nessa figura, o plano de cisalhamento é perpendicular à página do texto e a direção da sua projeção em relação à direção de corte é dada pelo *ângulo de cisalhamento*  $\phi$ .

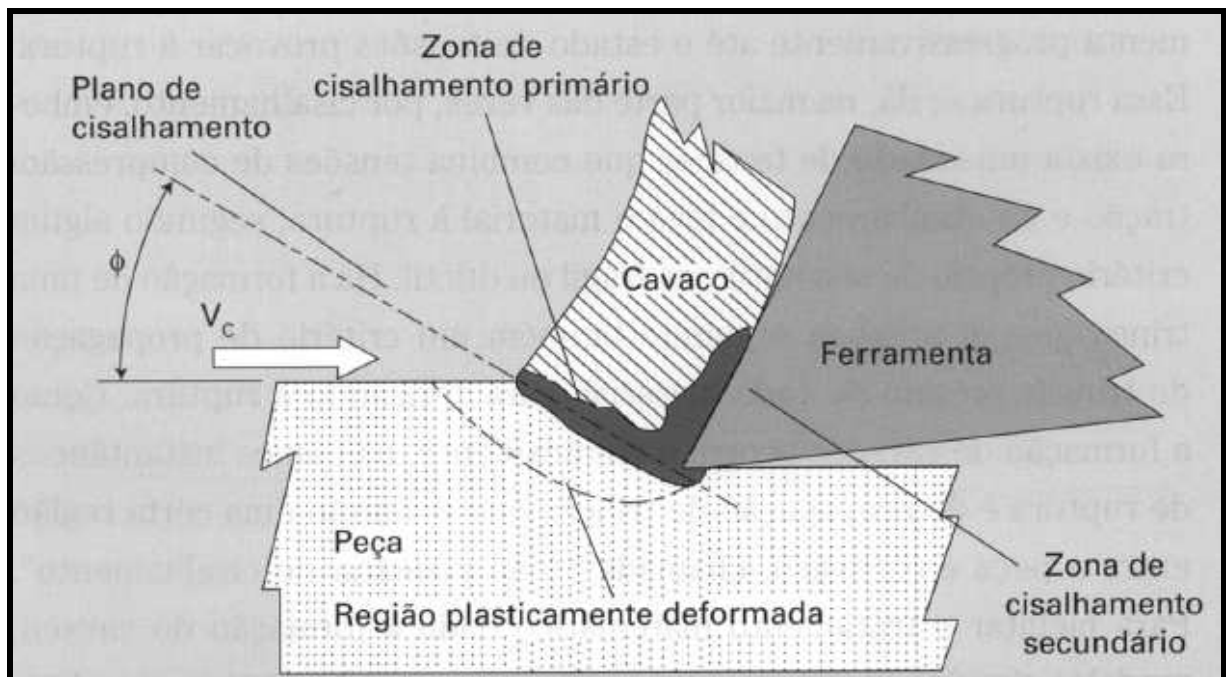


Figura 2.2 - Representação esquemática do mecanismo de formação do cavaco (MACHADO et. al., 2011)

- *Deslizamento das lamelas*: à medida que o material continua a avançar contra a ferramenta, a trinca originada no plano de cisalhamento se propaga e haverá a ruptura parcial ou a ruptura completa do material determinando a formação da lamela de cavaco. O tipo da ruptura entre parcial ou completa dependerá das propriedades do material e das condições de avanço e de velocidade de corte. Quando a ruptura é parcial, a trinca é interrompida nas imediações da aresta de corte, as lamelas são conectadas umas a outras e

dão origem a cavacos do tipo contínuo. Isso ocorre com materiais altamente deformáveis e é favorecido pelo uso de pequenos avanços e velocidades de corte mais elevadas. Se a ruptura se estende para a totalidade do plano de cisalhamento, as conexões entre as lamelas são rompidas ou são fracas e ocorre a formação de cavacos descontínuos. Esse tipo de ruptura é próprio de materiais frágeis, sendo favorecido, também, pelo uso de grandes avanços e baixas velocidades de corte.

- *Saída do cavaco*: a continuidade do movimento da peça contra a ferramenta provoca o escorregamento da porção de material que passou por deformação plástica e posterior ruptura sobre a superfície de saída da ferramenta. Essa porção de material constitui uma lamela do cavaco e a sua remoção é promovida por esse escorregamento sobre a superfície de saída, representando o encerramento do seu ciclo. Nesse ínterim, uma nova lamela adjacente à porção recém removida está sendo formada, iniciando um novo ciclo.

Deve-se observar que na maioria dos processos de corte, não há o referido escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta conforme os conceitos do Modelo de Coulomb (MACHADO et. al., 2011). Na prática, as pesquisas demonstram que, o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta é caracterizado por altíssimas deformações plásticas cisalhantes e elevadas temperaturas que ocorrem na região de contato entre o cavaco e a ferramenta, conhecida como *zona de cisalhamento secundário*. Na Figura 2.2 é ilustrada a localização da *zona de cisalhamento secundário* na região de formação do cavaco.

### 2.3 - Temperatura na interface ferramenta/cavaco

A medida mais intuitiva para se buscar a redução da temperatura da ferramenta em uma determinada situação de usinagem é o uso de meios que possam arrefecer a região de formação do cavaco onde ocorre a geração da maior parte do calor responsável pelo aquecimento dessa ferramenta. Há métodos tecnologicamente sofisticados de arrefecimento que utilizam a criogenia, a aplicação de fluidos de corte a alta pressão ou uma combinação entre fluidos criogênicos e injeção a alta pressão (AHMED et. al., 2007), (YILDIZ e NALBANT, 2008), (KAMINSKI e ALVELID, 2000), (AHMAD-YAZID et. al., 2010). Além desses, há outros métodos mais simples de aplicação de fluidos de corte que conseguem reduzir a temperatura da ferramenta, preservando a aresta de corte e reduzindo o seu desgaste, além de outros benefícios como a redução da força de corte. No entanto, as metodologias utilizadas não têm efeito importante diretamente na redução da temperatura



da interface ferramenta/cavaco (TRENT, 1984).

Segundo Trent (1984), a aplicação de fluidos de corte pode mudar a distribuição de calor na periferia da interface ferramenta/cavaco - com o arrefecimento do cavaco e da ferramenta (da aresta de corte), porém, a ação desses fluidos não pode alterar significativamente a temperatura máxima naquela região. Especialmente em presença de uma zona fluxo, que representa a principal fonte de aquecimento da ferramenta, os fluidos de corte não podem atingir a interface ferramenta/cavaco porque essa se torna uma região de intensa deformação plástica cisalhante e elevadas temperaturas, onde ocorre a junção dos materiais da peça e da ferramenta em escala atômica, num contato contínuo com duração de milésimos de segundo. O cavaco se move sobre a superfície de saída da ferramenta num movimento relativo resultante da ruptura do material do cavaco, por cisalhamento termoplástico. Nessas condições, a zona fluxo se comporta como um fluido viscoso em escoamento sob altíssimas tensões cisalhantes e de compressão que impedem a penetração de outros elementos nessa região. Por isso, a aplicação de fluidos de corte é ineficiente para a redução significativa da temperatura na interface ferramenta/cavaco e, conseqüentemente, na eliminação dos mecanismos de desgaste da ferramenta especialmente aqueles que ocorrem em presença de zona de fluxo (*cisalhamento plástico a altas temperaturas, abrasão, adesão ou attrition, difusão e oxidação*). Deve-se observar, no entanto, que a utilização de fluidos de corte promove a alteração da forma ou o mecanismo de desgaste, contribuindo para o aumento da vida da ferramenta, como está amplamente difundido na literatura.

Apesar das características da interface ferramenta/cavaco, principalmente, em presença de zona de aderência que impossibilitam a penetração de outros elementos durante a usinagem nessas condições, a temperatura na interface ferramenta/cavaco pode ser influenciada pela perda de calor por condução da zona de fluxo para o cavaco e para o interior da ferramenta (TRENT, 1984). Esse autor argumenta que uma parcela do calor total gerado na zona de fluxo é transportada pelo *material da zona de fluxo* que é levado pelo cavaco e o restante desse calor fica retido na fina camada de material da zona de fluxo que permanece aderida à superfície da ferramenta.

Como a geração de calor na zona de fluxo ocorre continuamente enquanto durar o processo, o contato ferramenta/cavaco representa uma fonte de calor contínua que estabelece um gradiente de temperatura na ferramenta na medida em que o calor é dissipado para o volume da ferramenta e para o meio que circunda o sistema.

Trent (1984) afirma que a transferência de calor entre a zona de fluxo e a ferramenta depende da condutividade térmica e da forma ou geometria da ferramenta, além do método de arrefecimento usado para abaixar as temperaturas da ferramenta. No entanto, afirma,

também, que a temperatura da ferramenta na superfície do contato com a zona de fluxo, é a mesma do material dessa zona de fluxo, ou seja, que a interface ferramenta/cavaco atinge a mesma temperatura da zona de fluxo. Em um trabalho experimental usando o método do termopar ferramenta-peça, Chen e Ho (1976) verificaram que as diferenças na condutividade térmica das ferramentas de metal duro geometricamente idênticas, afetaram as temperaturas na interface ferramenta/cavaco, obtidas nas operações de torneamento de aço inoxidável realizado sob as mesmas condições de corte. Portanto, a análise anterior indica que a temperatura da ferramenta na interface ferramenta/cavaco é a temperatura máxima que ocorre na ferramenta, pois o seu valor é determinado pela geração de calor na zona de fluxo, no contato ferramenta-peça. E que as elevadas temperaturas que ocorrem nessa interface são provocadas pela inexistência de uma técnica capaz de produzir uma elevada taxa de transferência de calor dessa região.

#### **2.4 - Medição de Temperatura na interface peça-ferramenta/cavaco**

Como já mencionado, a literatura reconhece que mecanismos ativados pelas altas temperaturas que ocorrem durante a usinagem são responsáveis pelos desgastes das ferramentas de corte. Este é um dos principais motivos para que se monitore ou se controle a temperatura na interface de corte durante testes de usinagem (STEPHENSON, 1993). Observa-se, entretanto, que nenhuma técnica existente em laboratório é simples e confiável o suficiente para o uso de forma rotineira, como observaram Yeo e Ong (2000) e Abukhshim; Mativenga e Sheikh (2006).

Os métodos que utilizam radiação infravermelha (STEPHENSON, 1991a), (LIN, LEE e WENG, 1992), (LIN e LIU, 2001) apresentam certa dificuldade de utilização devido à interferência da saída de cavacos quentes que prejudicam as imagens de interesse. Esses métodos permitem determinar a temperatura de corte baseando-se na radiação térmica que é emitida na zona de corte. Outra desvantagem deste método deve-se a medições não pontuais, uma vez que representam o valor médio da temperatura na área de focalização ou área de sensibilidade do instrumento. Além disso, a dependência do conhecimento da emissividade térmica da superfície analisada é fator limitante, principalmente devido à variação de temperatura dos materiais (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Os métodos que empregam termopares remotos ou inseridos na peça como descritos por Yen e Wright (1986), Chen; Tsao; Liang (1997) e Kitagawa; Kubo; Maekawa (1997) também apresentam dificuldades devido aos altos gradientes presentes na ferramenta e ao tempo de resposta devido a distância da interface. Normalmente



extrapolações a partir de modelos térmicos são usadas para estimativas das temperaturas de interface. Nos trabalhos de Trent (1984) e Eu-Gené (1995) verifica-se o uso dessa técnica para medir a temperatura durante o processo de torneamento e há aplicações dessa técnica na medição de temperatura em processos de furação (AGAPIOU e DEVRIES, 1990); (AGAPIOU e STEPHENSON, 1994) e no fresamento (LONGBOTTOM e LANHAM, 2005).

Do ponto de vista de medição direta de temperatura, a técnica do termopar ferramenta-peça se apresenta como uma boa alternativa quando se deseja apenas a medição da temperatura média da interface de corte (STEPHENSON, 1993).

## **2.5 - Técnica do termopar ferramenta-peça: fundamentos e aplicações**

Segundo Stephenson (1993), a técnica do termopar ferramenta-peça foi desenvolvida por Gottwein (1925), Shore (1925), e Herbert (1926). É uma técnica bastante usada, embora ela possua algumas limitações que devem ser consideradas no seu uso (MELO, 1998). Pode-se citar, por exemplo: o par ferramenta-peça deve ser sempre formado por materiais condutores de eletricidade – o que impede o uso de ferramentas de cerâmica e peças de materiais não metálicos; a temperatura medida representa uma média das temperaturas que ocorrem na região de corte; o contato da ferramenta com o cavaco não é estável; a junção quente pode ser considerada como um termopar finito; existem várias termojunções secundárias que podem influenciar o sinal da força eletromotriz do termopar; e, ainda, a calibração do sistema deve considerar todos os elementos presentes na cadeia de medição.

Como a técnica termopar ferramenta-peça mede somente a temperatura na interface de corte, vários trabalhos são encontrados na literatura onde a técnica é usada para validação de modelos térmicos numéricos ou analíticos que visam a obtenção do campo de temperatura na ferramenta. Nesse caso, pode-se citar Bartoszuik e Grzesik (2011), Childs e Otieno (2012), Grzesik et. al. (2009), Grzesik (2006a), Wan et. al. (2004), Anagonye e Stephenson (2002) e Leshock e Shin (1995, 1997).

Bartoszuik e Grzesik (2011) investigaram o problema de transferência de calor que ocorre em um corte ortogonal a seco de um aço carbono C45 que foi usinado com ferramentas de metal duro sem revestimento. A técnica das diferenças finitas foi aplicada na realização da estimativa da distribuição de temperatura e da obtenção das temperaturas máxima e médias da interface peça-cavaco-ferramenta. Usou-se o método termopar

ferramenta-peça como informação experimental para a obtenção do campo de temperatura na ferramenta.

Childs e Otieno (2012) fizeram simulações com o método dos elementos finitos a partir da usinagem de ligas de aço de baixo carbono com velocidades entre 50 a 300 m/min e avanço entre 0,125 a 0,3mm/rot. As predições teóricas foram comparadas a medições experimentais de temperatura usando o método termopar ferramenta-peça e a medições de força de usinagem.

Grzesik et. al. (2009) pesquisaram os fundamentos de usinagem no torneamento de ferro fundido nodular usinado com ferramentas de metal duro com revestimento simples (TiAlN) e múltiplas camadas (TiC/Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN). A análise do comportamento do processo incluiu a leitura de forças de corte, o número de *Peclet*, o coeficiente de atrito, o comprimento de contato e a temperatura na interface de corte em função das condições de usinagem. Novamente, as temperaturas de corte foram obtidas usando-se o método termopar ferramenta-peça.

Grzesik (2006a) estudou o problema térmico em corte ortogonal de aço carbono C45 usinados por ferramentas revestidas com camada simples e com multicamadas intermediárias de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ele usou modelos térmicos híbridos para a estimativa da quantidade de calor conduzida ao o cavaco e à interface ferramenta cavaco. As estimativas foram comparadas com dados experimentais provenientes do termopar ferramenta-peça e da literatura.

Grzesik (2006b) determinou a distribuição de temperatura na zona de corte integrando modelos térmicos analíticos e simulados numericamente usando elementos finitos, durante a usinagem com ferramentas de metal duro com e sem revestimento. Simulações bidimensionais foram usadas. Os modelos térmicos foram validados com a técnica do termopar ferramenta-peça e dados da literatura.

Wan et. al. (2004) apresentam uma revisão de diferentes métodos de medição obtenção da temperatura de corte os quais incluem termopar ferramenta-peça, termopares inseridos, pirômetros óticos, fotografia infravermelha, tintas térmicas e observações de microestrutura e micro dureza. Os princípios fundamentais e campo de aplicação de cada um deles são apresentados como o objetivo de selecionar a técnica para a aplicação em medições de temperatura de corte durante torneamento com alta velocidade de corte.

Anagonye e Stephenson (2002) empregaram a técnica do termopar ferramenta-peça para a validação de modelos térmicos que consideram as geometrias e o os efeitos de ruído das ferramentas para o estabelecimento do desgaste de ferramentas. Eles usaram o método dos elementos finitos na modelagem da ferramenta de corte incluindo o efeito dos

ângulos da ferramenta. As respostas de temperatura foram calculadas em regime permanente usando o programa comercial *Nastran*®.

Leshock e Shin (1997) analisaram a temperatura de interface durante o torneamento do aço liga SAE 4140 e *Inconel* 718 com ferramentas de metal duro, usando uma técnica de termopar ferramenta-peça. Os resultados experimentais foram comparados com dados analíticos de Loewen e Shaw (1954). Com base nos resultados experimentais, um modelo empírico que relaciona a temperatura à superfície para condições de corte foi estabelecido para ligas de aço SAE 4140 com ferramentas de metal duro. Finalmente, a interface da ferramenta foi investigada para se determinar os mecanismos de desgaste da ferramenta em função da temperatura.

Um ponto em comum em todos estes trabalhos é a ausência de descrição do processo de calibração do sistema termopar-peça ferramenta.

O trabalho de Stephenson (1993) é pioneiro na abordagem dos principais problemas presentes na técnica do termopar ferramenta-peça. Neste trabalho ele aborda tanto a compreensão teórica quanto a gama de aplicações do método termopar ferramenta de trabalho. Considera, por exemplo, que, em geral, a temperatura do termopar ferramenta-peça é diferente da temperatura média interfacial, mas que, para as ferramentas de metal duro a diferença é geralmente pequena.

Stephenson (1993), analisando o circuito ferramenta-peça, concluiu que a *f.e.m.* gerada na interface ferramenta/cavaco somente representa a temperatura média interfacial se esta temperatura média for uniforme, ou se a relação temperatura-*f.e.m.* da combinação de material ferramenta-peça for linear. O isolamento do circuito do termopar ferramenta-peça é também considerado. Ele apresenta algumas soluções para a medição de sinais sem introduzir isolamento entre o mandril e a peça que, por sua vez, reduz a rigidez do sistema de usinagem e limitam o seu uso sob altas velocidades devido à trepidação. Finalmente, discute de forma superficial o efeito das termojunções secundárias presentes entre os diversos elementos da cadeia de medição.

A proposta de calibração de Stephenson (1991a) é o aquecimento da junção quente do termopar por uma chama de maçarico a gás oxi-acetileno. A grande vantagem é a execução da calibração usando uma montagem semelhante ao sistema de usinagem. Dessa maneira, os resultados dessa calibração incluem as *f.e.m.* provenientes das termojunções secundárias. Leshock e Shin (1997) e Gökkaya et. al. (2006) também relatam o uso de procedimentos semelhantes para a calibração de sistemas termopar ferramenta-peça.

Durante a calibração do sistema, Stephenson (1991a) manteve a temperatura das termojunções formadas na peça e na ferramenta usando arrefecimento com toalhas

molhadas, conseguindo que a elevação de temperatura dessas *junções frias* se mantivesse em 5 °C durante o aquecimento. Gökkaya et. al. (2006) apresentaram uma técnica para estabilizar a junção fria do termopar que afetam negativamente o método termopar ferramenta-peça usando um sistema de resfriamento com água através do desenvolvimento de um suporte específico. Neste trabalho, os autores encontraram um coeficiente de calibração 15% maior do que sistemas sem resfriamento indicando a grande influência da temperatura de compensação (*junta fria*). Embora, nesses procedimentos, se tenham adotados algumas medidas para se manter as temperaturas das termojunções constantes, tais termojunções continuaram presentes nos respectivos sistemas.

Outra aplicação do método do termopar ferramenta-peça é apresentada por Abhang e Hameedullah (2010b) mostrando os resultados de medições de temperatura na interface ferramenta-peça durante um processo de usinagem. A temperatura de corte na interface é analisada em várias condições de usinagem durante torneamento a seco de uma liga de aço EN-31 com ferramenta de metal duro. Modelos de primeira ordem e de segunda ordem em termos de parâmetros de corte são estabelecidos a partir de dados experimentais. O objetivo do trabalho é o de proporcionar um melhor entendimento dos efeitos dos parâmetros de usinagem na temperatura de interface cavaco-peça durante o torneamento de aço EN-31.

Abhang e Hameedullah (2010a) afirmam que a maior dificuldade no uso da técnica do termopar ferramenta-peça reside na sua calibração. Embora seja uma técnica muito usada, um cuidado deve ser tomado para evitar-se a geração de *f.e.m.* parasitas e curtos circuitos elétricos. Segundo esses autores, essas tensões podem existir principalmente devido diferenças de temperaturas entre os vários contatos térmicos. Eles apresentaram uma montagem experimental cujo objetivo é o de calibrar e medir a temperatura de corte durante a usinagem e para evitar o ruído nos sinais desse sistema, a peça e a ferramenta foram isoladas do resto do centro de usinagem.

A proposta de calibração do sistema termopar ferramenta-peça é o desenvolvimento de uma relação termoelétrica entre o material da ferramenta de usinagem e o material da peça e muitos métodos têm sido desenvolvidos para encontrar esta relação. Por exemplo, Bus et. al. (1971) e Byrne (1987) usaram um forno para calibração; Shaw (1982) imergiu a junção quente em um banho aquecido para a calibração e um termopar padrão para a obtenção da temperatura de referência; no trabalho de Abhang e Hameedullah (2010b) a calibração do termopar ferramenta-peça foi conduzida com aquecimento por uma chama externa. Essa montagem é similar àquela usada por Stephenson (1993) na qual a ferramenta foi calibrada diretamente com a peça de trabalho.

No trabalho de Abhang e Hameedullah (2010b) a junção quente foi construída com cavaco contínuo e longo do material da peça e com ferramentas de metal duro usadas no torneamento. Essa junção quente foi fixada a uma placa de cobre. Um termopar padrão tipo K (*chromel-Alumel*) foi montado próximo a região de contato peça-ferramenta. Uma chama do maçarico a gás oxiacetileno foi usada para aquecer, então, a placa de cobre e assim um comportamento térmico de usinagem foi simulado através do aumento da temperatura da junção quente. Os termopares padrão tipo K foram usados para monitorar a temperatura da junção quente enquanto a *f.e.m.* devido à junção quente foi adquirida com um voltímetro. Uma ótima correlação (0,988) foi obtida entre estes sinais, embora nenhuma ação tenha sido feita para compensar uma eventual elevação de temperatura da junção fria e nem os efeitos secundários dos diversos contatos térmicos. O uso da extensão feita com o material contínuo do cavaco é um fator limitante a materiais dúcteis.

Esta breve revisão indica que a técnica do termopar ferramenta-peça é um método bastante usado tanto para a obtenção direta da temperatura média de interface de corte quanto como informação valiosa para a validação de modelos térmicos que buscam a obtenção do campo de temperatura na ferramenta de corte. Embora existam limitações em seu uso, a técnica é bastante confiável. Todavia, as dificuldades inerentes à calibração do sistema devem ser abordadas com cuidado. Como existe uma complexidade de elementos na cadeia de medição com influência direta no sinal da força eletromotriz a calibração do termopar deve considerar o próprio sistema de usinagem não usando fornos auxiliares e ainda considerando os efeitos nocivos de pares termoelétricos secundários e de altas variações de temperatura da junção fria, chamada junção de compensação.

Uma das contribuições deste trabalho é a proposta de um sistema de calibração que minimize esses efeitos e aumente a confiabilidade da técnica. A outra contribuição consiste na investigação de um possível efeito dos materiais do porta-ferramenta na temperatura da interface de corte e no campo de temperatura da ferramenta, como já mencionado no início dessa seção.

## CAPÍTULO III

### MÉTODO DO TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA COM COMPENSAÇÃO FÍSICA

#### 3.1 - Introdução

O termopar ferramenta-peça é uma técnica experimental usada na medição da temperatura de usinagem, geralmente, na operação de torneamento e com menor frequência nas operações de furação (AGAPIOU e STEPHENSON, 1994) e no fresamento. É usado, também, no monitoramento de desgaste de ferramenta (LESHOCK e SHIN, 1997), (INGRACI NETO et. al., 2011) e no monitoramento da temperatura entre componentes de diversos processos (SEIREG e HSUE, 1981), (DINÇ et. al., 1093), (ITO; YANG e NEGISLII, 2001). É um método amplamente difundido por se tratar de uma técnica com implantação relativamente simples e de baixo custo (LESHOCK e SHIN, 1997).

Essa técnica considera o efeito termopar que ocorre entre as junções de dois materiais condutores distintos quando estas são expostas a temperaturas diferentes. Nessa situação, é gerada uma diferença de potencial elétrico no circuito formado pelos dois materiais a qual é proporcional à diferença de temperatura entre as junções (Figura 3.1a). A junção de medição (ou junta quente) é a conexão entre os materiais do termopar submetida à temperatura a ser medida e a junção de referência (ou junta fria) é a outra extremidade que pode ser conectada ao sistema de medição (voltímetro).

Uma vez conhecida a temperatura de referência,  $T_R$ , a diferença de potencial no circuito termopar (*f.e.m.*) torna-se função, apenas, da temperatura da junção de medição  $T_1$ .

Esse princípio pode então ser usado para a medição de temperatura em processos de usinagem onde a interface cavaco-ferramenta represente um par termoelétrico. Nesse caso, obtém-se a variação de temperatura que ocorre na interface ferramenta-peça, através da conversão da diferença de potencial elétrico determinada por um sistema de calibração.

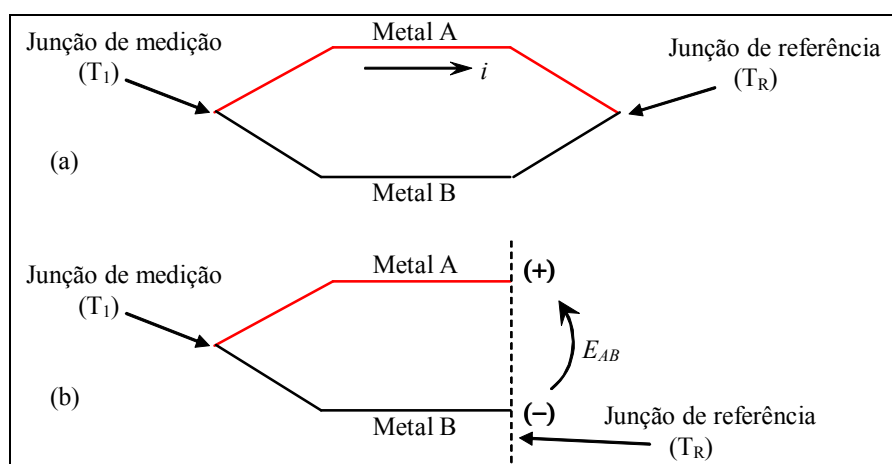


Figura 3.1 – Representações esquemáticas (a) de um circuito termopar genérico e (b) do circuito com a conexão do sistema de medição do potencial elétrico  $E_{AB}$ .

Essa técnica, apesar de simples, possui uma série de particularidades que devem ser consideradas (MELO, 1998). Dentre elas citam-se: i) o par ferramenta-peça deve ser formado por materiais condutores – ferramentas de cerâmica e peças de materiais não metálicos não podem ser usados; ii) a temperatura medida sempre representa uma média das temperaturas que ocorrem na região de corte; iii) a junção quente pode ser considerada como um termopar finito com um número infinitamente grande de fontes interligadas num circuito em paralelo (QURESHI e KOENIGSBERGER, 1996) citado por Melo (1998).

As principais fontes de erro desse método são relacionadas, principalmente, à falta de homogeneidade dos materiais da ferramenta e da peça e à diferença de temperatura entre as junções dos materiais introduzidos no circuito (ocorrência de várias junções de referência submetidas a diferentes temperaturas), (STEPHENSON, 1993). No entanto, a grande dificuldade do método é a dificuldade de execução de uma calibração precisa (ABHANG e HAMEEDULLAH, 2010a).

A aplicação desta metodologia para a obtenção da temperatura na interface cavaco-ferramenta no processo de torneamento pode ser encontrada nos trabalhos de Shore (1925), Trigger et al. (1948), Arndt e Brown (1966), Trent (1984), Byrne (1987), Stephenson (1991a), Stephenson e Ali (1992), Eu-Gene (1995), Stephenson et al. (1997), Leshock e Shin (1997), entre outros.

### 3.2 - Aparato experimental do sistema termopar ferramenta-peça no torneamento

A Figura 3.2 apresenta uma ilustração com os principais componentes do sistema termopar ferramenta-peça para a medição da temperatura de usinagem, no torneamento.

Nessa representação,  $T_1$  é a temperatura de usinagem, medida na interface de corte, e  $T_R$  é a temperatura da junção de referência. Pode-se observar nessa ilustração, além da junção de medição formada pelos materiais da peça (A) e da ferramenta (B), a existência de três outras junções (A e D; D e C; B e C). Estas junções devem ser mantidas à mesma temperatura  $T_R$  para, assim, configurarem as junções de referência ou juntas frias. Dessa forma, a influência de cada uma dessas juntas frias, à temperatura  $T_R$ , sobre a *f.e.m.* do sistema é minimizada (BYRNE, 1987).

A existência de diversos materiais na composição do sistema termopar determina a quantidade de junções entre os mesmos; se forem muitas, pode haver dificuldade em se manter essas junções a uma temperatura  $T_R$  constante.

O aparato experimental de um sistema termopar ferramenta-peça, no torneamento, difere da montagem usual dessa operação em dois quesitos fundamentais, como pode ser verificado na Figura 3.2: o estabelecimento do circuito elétrico físico para a medição da diferença de potencial elétrico; e a aplicação de isolamento elétrico na ferramenta e na peça em relação ao torno. Há, ainda, a necessidade de se manter a temperatura das junções de referência  $T_R$  constante.

O circuito elétrico desse sistema pode ser visualizado na ilustração simplificada da Fig. 3.2. De modo geral, as conexões elétricas entre um voltímetro (V) e os demais elementos do sistema são feitas com fios ou cabos elétricos (de cobre)

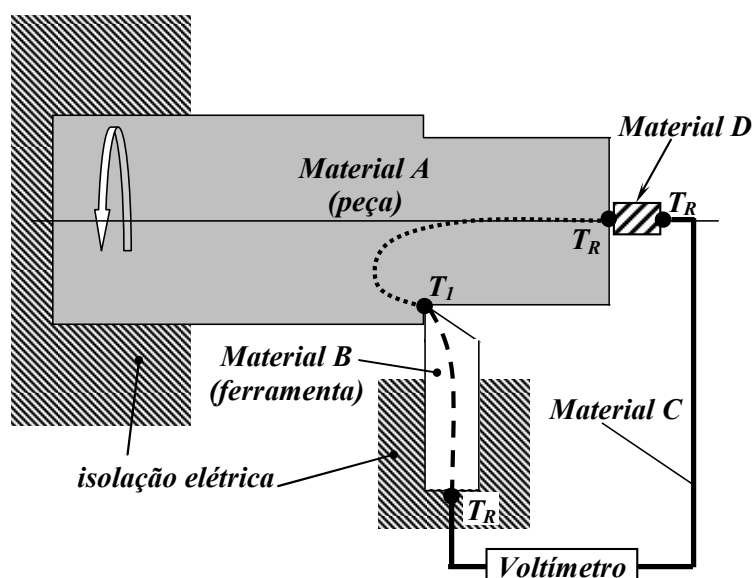


Figura 3.2 – Ilustração esquemática de um sistema termopar ferramenta-peça no torneamento (DAVIES et al., 2007).



Verifica-se na Figura 3.2 que o circuito elétrico desse sistema é constituído pelo material da peça (material A), da ferramenta (material B), pelos condutores elétricos (material C) e por um elemento genericamente denominado por *material D*. O material D representa aqui diversas aplicações para a condução do sinal elétrico entre a peça (material A), em movimento, e o condutor elétrico (material C) que é estacionário. A conexão entre a peça A e o condutor C é de suma importância na aplicação dessa técnica (ALVELID, 1970).

As soluções mais eficientes para a condução do sinal elétrico da peça em rotação até o condutor estacionário usam um mancal de mercúrio. Nesses sistemas, um elemento rotativo (compondo D), acoplado à peça, é conectado a um condutor elétrico através de “um banho” em mercúrio. O movimento relativo entre o elemento rotativo e o mercúrio não provoca a elevação significativa da temperatura nesse contato elétrico que, assim, pode ser uma das junções de referência do sistema, à temperatura  $T_R$ .

Há duas configurações para realização da referida transferência do sinal elétrico no mancal de mercúrio: através de um eixo apropriado conectado à peça por dentro do eixo árvore do torno ou por meio da ponta rotativa do contra ponta.

Na primeira configuração, um eixo contendo um disco em uma das suas extremidades, é conectado concentricamente à extremidade da peça, presa pela placa do torno. A instalação desse eixo é feita com isolamento elétrico, por dentro do eixo árvore do torno, de forma que o disco fica exposto externamente à máquina. Assim, o disco e o fio condutor elétrico são alojados no interior de uma cuba e o contato elétrico é estabelecido com mercúrio, como está ilustrado na Figura 3.3a. Diversos trabalhos foram desenvolvidos com esse sistema, por exemplo, Byrne (1987), Stephenson (1991a, 1991b, 1993), Grzesik (1999, 2003), Gökkaya (2006), Ingraci Neto et. al. (2011), dentre outros.

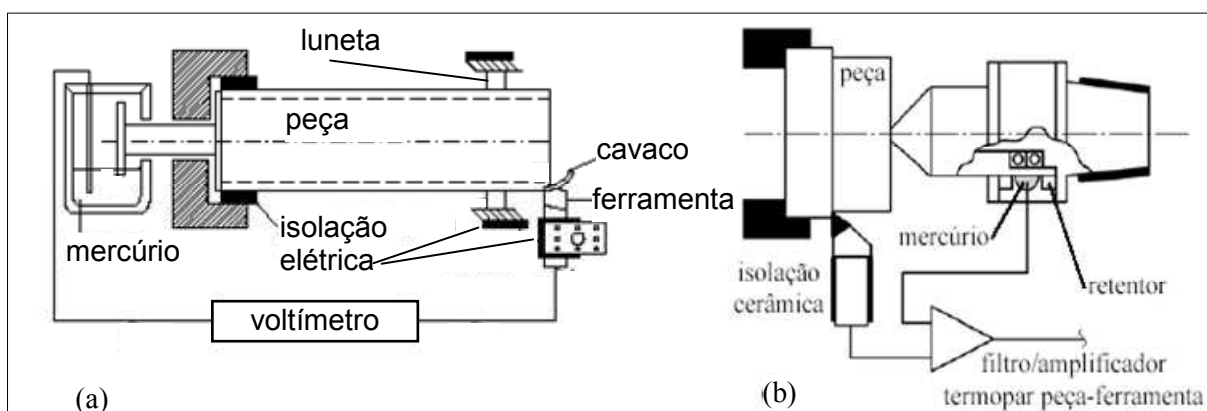


Figura 3.3 – Ilustrações de aplicações de mancal de mercúrio: (a) através do eixo árvore do torno (GÖKKAYA, 2006); (b) através da ponta rotativa da contra ponta (INGRACI NETO et. al., 2011).

Na segunda configuração, o mancal de mercúrio pode ser agregado a uma contra ponta rotativa especialmente projetada para promover rigidez e estabilidade da peça e para servir de condutor elétrico no termopar ferramenta-peça. O contato elétrico entre a ponta rotativa, conectada à peça, e o condutor é feito com mercúrio em uma câmara existente no corpo da contra ponta, como ilustra a Figura 3.3b. A vedação ao vazamento de mercúrio é feito com elementos de vedação (retentores ou anéis *O-ring*).

Outra forma de se utilizar a própria contra ponta para se estabelecer o contato elétrico é apresentada em Alvelid (1970), conforme mostra a Figura 3.4. Nesse caso, uma contra ponta rotativa comercial foi modificada para que a transferência do sinal elétrico entre a ponta rotativa e o condutor elétrico fosse feita em uma câmara de mercúrio instalada no seu cone *Morse*. Fez-se o contato elétrico com um pino de aço instalado concentricamente na ponta rotativa e o invólucro da câmara de mercúrio foi confeccionado em material isolante com o objetivo de se manter a temperatura constante  $T_R$  da junta fria, no contato elétrico do mercúrio.

A transferência do sinal elétrico entre a peça e ramo estacionário do circuito pode ser feita, também, com o uso de escovas de grafite e anéis de escorregamento do próprio material da peça (TRIGGER et al., 1948). Mas esses métodos podem introduzir *f.e.m.* prejudiciais (MACHADO e DA SILVA, 2004) que causam distorções na *f.e.m.* resultante do termopar ferramenta-peça.

Quanto à isolamento elétrica da peça e da ferramenta, como ilustrado na Figura 3.2, STEPHENSON (1993) argumenta que não é necessário a isolamento de ambas simultaneamente, mas apenas de uma delas. No entanto, embora seja necessário o aterramento da máquina, a isolamento de ambas, peça e ferramenta, significa a isolamento do circuito do termopar e tem o objetivo de evitar os efeitos de possíveis *f.e.m.* externas.

A isolamento da peça é realizada com a aplicação de revestimentos isolantes nas castanhas da placa do torno ou na forma de uma luva de material isolante, ajustada à peça na região da sua fixação pela placa. A isolamento do cone *Morse* da contra ponta ou o uso de um acoplamento isolante colocado entre a ponta rotativa da contra ponta e a peça são métodos que completam a isolamento da peça. As castanhas da placa podem ser isoladas com revestimento cerâmico (FIOCHI; SANCHEZ e MELLO, 2008) e o cone *Morse* pode ser isolado com revestimento cerâmico ou à base de tinta *epoxy* (STEPHENSON, 1993), (FIOCHI; SANCHEZ e MELLO, 2008).

A isolamento do inserto pode ser feita com lâminas finas de mica colocadas no alojamento do suporte porta ferramenta (STEPHENSON, 1993) e, no caso da isolamento suporte, pode-se usar placas ou lâminas de materiais isolantes como fórmica, baquelite, *Celeron®* ou mica, no seu entorno.

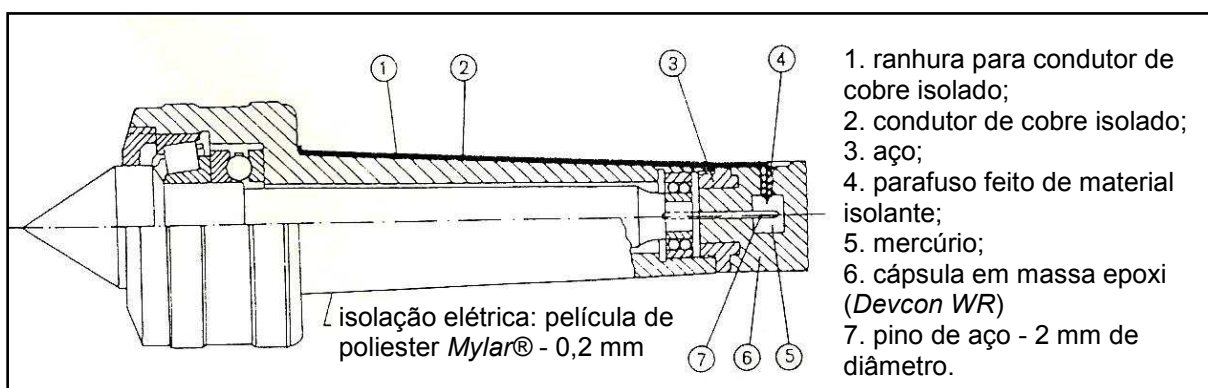


Figura 3.4 – Ilustração da implantação do mancal de mercúrio em uma contra ponta rotativa convencional para uso no método do termopar ferramenta-peça (ALVELID, 1970).

### 3.3 - Análise do circuito termoelétrico do termopar ferramenta-peça – aparato experimental

A análise do circuito elétrico do sistema termopar ferramenta-peça constituído na montagem experimental é fundamental para a determinação dos elementos que compõem esse circuito e para verificar se as junções formadas entre esses elementos exercem influência sobre a *f.e.m.* medida. Neste trabalho, esse diagnóstico determinou a adoção de procedimentos voltados à redução da quantidade de materiais (e de junções diferentes) e à implantação de modificações no circuito com a introdução de novos elementos feitos dos materiais dos elementos básicos (materiais A, B e D, na Figura 3.2). Essas ações simplificaram o circuito elétrico do sistema real e, através de um procedimento de calibração realizado no próprio aparato experimental, viabilizou a aplicação das teorias termoelétricas para a obtenção de uma função de correlação entre a *f.e.m.* medida e a obtenção da temperatura  $T_f$ .

Antes de analisarmos o circuito elétrico correspondente ao aparato experimental (Fig. 3.2) torna-se necessário uma revisão dos conceitos e definições sobre termopares para o conseqüente uso correto da técnica. Essa análise teórica é essencial no planejamento e execução dos procedimentos de calibração do sistema, usando o aparato experimental real que inclui toda a cadeia de medição, os materiais elétricos, as termojunções e os equipamentos de medição (voltímetro).

Para o desenvolvimento dessa análise teórica, o aparato experimental é representado na Figura 3.5 em um esquema que ressalta os contatos termoelétricos presentes na sua montagem.

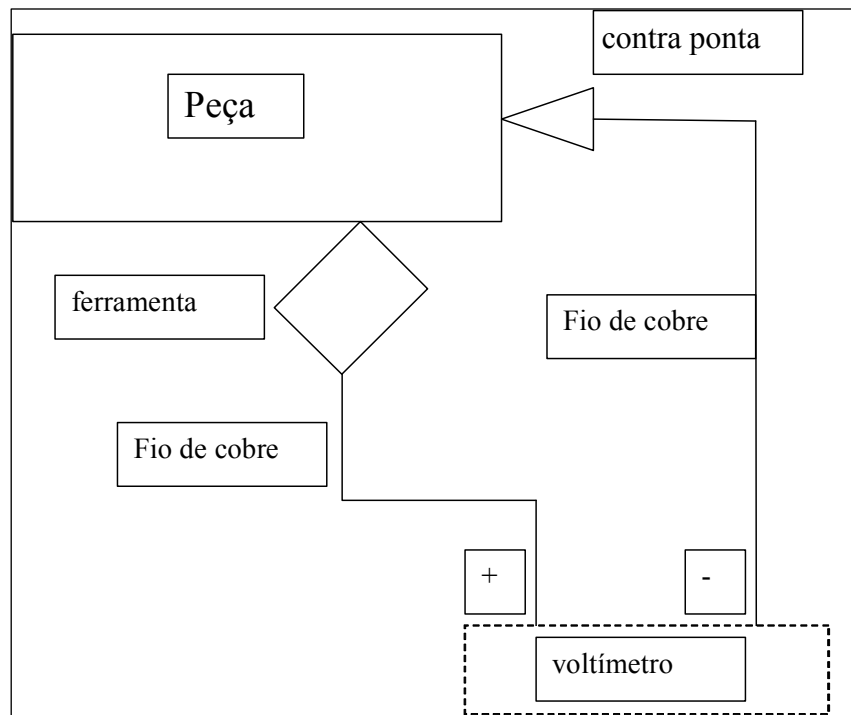


Figura 3.5 – Esquema para medição da temperatura de corte usando o método do termopar ferramenta-peça ressaltando os contatos termoeletrônicos.

### 3.3.1 Conceitos e definições de termopares

Quando dois materiais diferentes A e B são conectados em um circuito como mostrado na Figura 3.6, com uma junção em uma temperatura  $T_1$  e a outra na temperatura  $T_2$ , uma força eletromotriz  $\Delta E$  é gerada no circuito elétrico correspondente (Lei de Seebeck), podendo-se escrever a Equação (3.1) como:

$$\Delta E = E_{BA}(T_1) - E_{BA}(T_2) = K (T_1 - T_2) \quad (3.1)$$

onde a força eletromotriz  $\Delta E$  é proporcional à diferença de temperatura entre as duas termojunções. Caso a temperatura a ser medida seja  $T_1$ , basta obter ou medir a temperatura  $T_2$  da outra junção (denominada junção de referência) ou submeter esta junção de referência a uma fonte de temperatura conhecida (fonte fria). Esta última alternativa é um procedimento bastante comum em que se impõe a junta de referência a um banho de água e gelo em equilíbrio.

Fazendo-se as simplificações adequadas na Eq. (3.1), obtém-se a Equação (3.2):

$$T_1 = T_2 + \frac{\Delta E}{K} \quad (3.2)$$

Observa-se na Equação (3.2) que  $K$  é uma constante de proporcionalidade a qual pode ser

obtida através de um sistema de calibração.

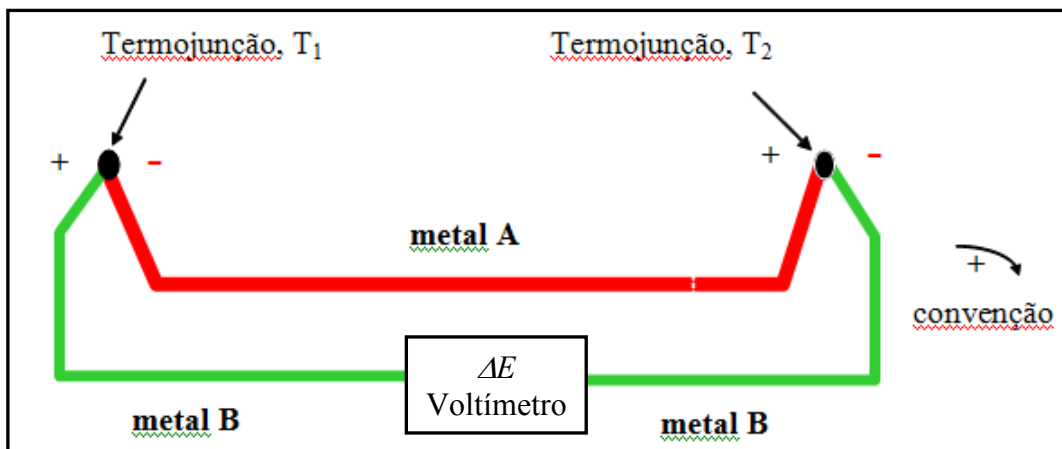


Figura 3.6 - Representação esquemática de um circuito termopar básico.

### 3.3.2 – Leis dos termopares

O desenvolvimento de qualquer técnica de medição que use o efeito termopar deve basear-se nas cinco leis dos termopares descritas a seguir (DOEBELIN, 1990; TAYLOR, 1988):

*1ª Lei* – A força eletromotriz (*f.e.m.*) de um termopar com as junções submetidas às temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente, é totalmente independente de outras temperaturas ao longo do circuito, desde que os dois materiais A e B sejam homogêneos, como ilustra a Figura 3.7.

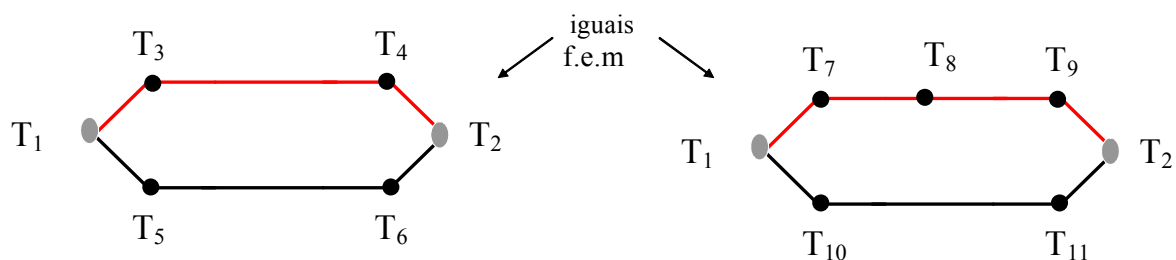


Figura 3.7 – Ilustração mostrando a equivalência entre dois circuitos termopares submetidos internamente a diferentes temperaturas – 1ª lei dos termopares.

*2ª Lei* – Se um terceiro metal C é inserido em um dos ramos do termopar e se as junções com esse metal C estiverem sujeitas à mesma temperatura  $T_3$ , a *f.e.m.* do circuito

permanece inalterada independentemente do comprimento e da variação da temperatura ao longo de C (Figura 3.8).

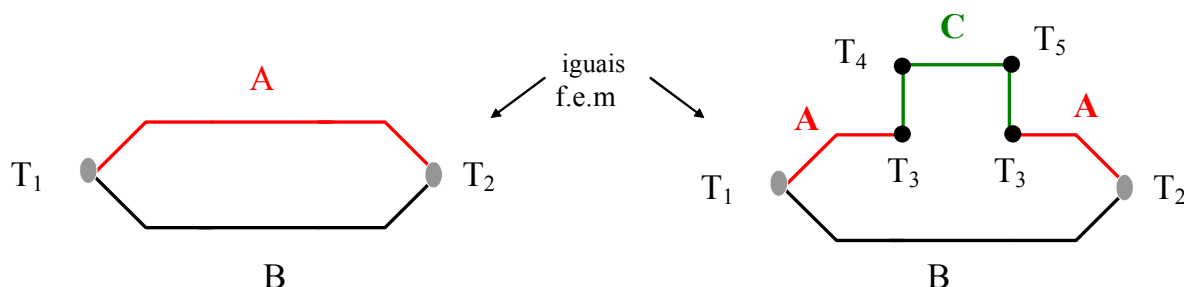


Figura 3.8 – Ilustração do efeito da inserção de um material C em um dos ramos do termopar – 2ª lei dos termopares.

3ª Lei – Se um metal C é inserido em uma das junções, entre A e B, e se existir uma variação de temperatura em C a qualquer distância das junções AC e BC, essa temperatura em C não influi na *f.e.m.* do circuito desde que a temperatura nas junções AC e BC sejam iguais a  $T_1$  (Figura 3.9). A *f.e.m.* resultante é igual à *f.e.m.* do circuito correspondente, sem a presença de C.

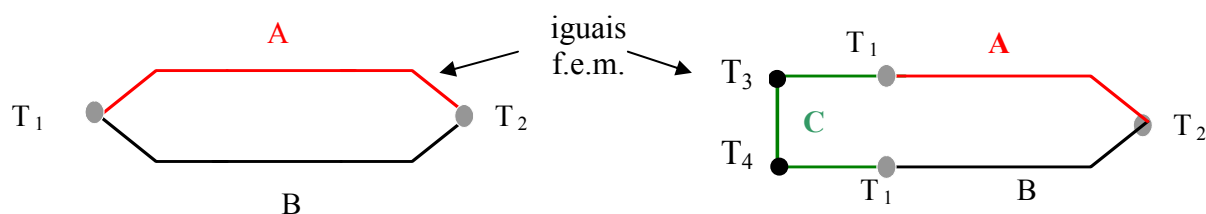


Figura 3.9 – Ilustração do efeito da inserção de um material C em uma das junções, entre os ramos A e B de um termopar – 3ª lei dos termopares.

4ª Lei – Se a *f.e.m.* térmica dos metais A e C é  $E_{ac}$  e dos metais B e C é  $E_{bc}$ , então, a *f.e.m.* térmica dos metais A e B é igual a  $E_{ac} + E_{bc}$  (Figura 3.10).

5ª Lei – Se o termopar produz uma *f.e.m.*  $E_1$  quando suas junções estão às temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  e se produz  $E_2$  quando elas estiverem às temperaturas  $T_2$  e  $T_3$ , então ele produzirá  $E_1$  e  $E_2$  quando as junções estiverem a  $T_1$  e  $T_3$ , respectivamente (Figura 3.11).

A presença de vários metais diferentes e conseqüentemente de várias termojunções na cadeia de medição da montagem termopar ferramenta-peça impedem a aplicação direta

do conceito de termopar. As leis dos termopares que preveem a presença de um terceiro material no circuito são, nesse sentido, imprescindíveis.

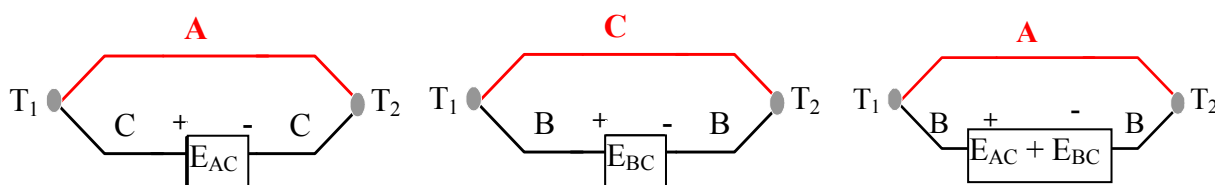


Figura 3.10 – Ilustração da propriedade associativa da *f.e.m.* entre materiais de um termopar

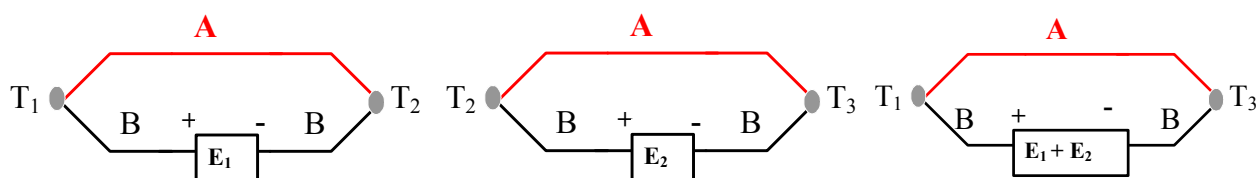


Figura 3.11 – Ilustração da propriedade associativa da *f.e.m.* entre diferentes temperaturas das junções do termopar – 5ª lei dos termopares.

### 3.3.3 - Circuito termoelétrico do sistema termopar ferramenta-peça obtido do aparato experimental

O aparato experimental do sistema termopar ferramenta-peça produz um circuito termoelétrico que contém diversos elementos e, conseqüentemente, com a formação de outras termojunções além daquela formada entre a ferramenta e o material da peça. Na Figura 3.12 é apresentado um esquema do circuito termoelétrico produzido pelo aparato experimental representado nas Figuras 3.2 e 3.5. Nessa figura, o ramo representado entre  $T_3$  e  $T_4$  corresponde ao elemento D (Figura 3.2) ou à contra ponta (Figura 3.5).

Observa-se que várias termojunções surgem no circuito, mas, especificamente, as termojunções formadas no contato entre o contraponto e a peça ( $T_3$ ) e entre a ferramenta e o fio de cobre (fio de extensão,  $T_2$ ) são aquelas que exigem uma maior atenção. Observa-se, por exemplo, que o contraponto pode ser construído com mais de um material metálico e, portanto, pode possuir várias junções internamente. Nota-se, ainda, que de acordo com as 3ª e 4ª lei dos termopares, um terceiro metal somente não afetará os resultados se as suas termojunções estiverem a uma mesma temperatura.

Ao se observar o aparato experimental (Fig. 3.2 e 3.5), conclui-se que as temperaturas das termojunções  $T_3$ ,  $T_4$  e  $T_5$  (Fig. 3.12) podem ser mantidas em temperatura

próxima a ambiente, sem a influência térmica do processo de usinagem. Todavia, a temperatura  $T_2$ , por representar o contato entre a ferramenta e o fio de extensão, pode sofrer influência térmica do processo, principalmente, nos casos de uso de pastilhas de metal duro em operações onde o tempo de usinagem é suficiente para o seu aquecimento (STEPHENSON, 1993), como se caracterizaram os experimentos deste trabalho.

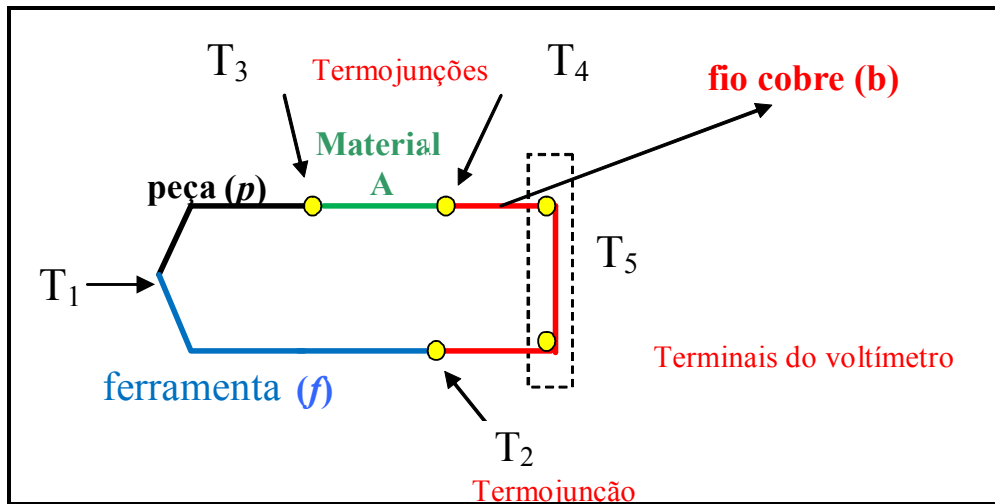


Figura 3.12 – Representação esquemática do circuito termoeletrico do aparato experimental.

Assim, considerando a Figura 3.12 juntamente com a 4ª e a 5ª leis dos termopares pode-se escrever a Equação (3.3):

$$\Delta E = E_{fp}(T_1) + E_{bf}(T_2) + E_{pa}(T_3) + E_{ab}(T_4) \quad (3.3)$$

onde  $E_{fp}$  é a *f.e.m.* gerada na junção de medição entre a ferramenta (*f*) e a peça (*p*), à temperatura  $T_1$ ;  $E_{bf}$  é a *f.e.m.* da termojunção formada entre o fio de cobre (*b*) e a ferramenta (*f*), à temperatura  $T_2$ ;  $E_{pa}$  é a *f.e.m.* da termojunção entre a peça e o material A (*a*), à temperatura  $T_3$  e  $E_{ab}$  é a *f.e.m.* da termojunção entre o material A e o fio de cobre, à temperatura  $T_4$ .

Analogamente, se o interesse está na determinação de  $T_1$ , então se conclui da Eq. (3.3) que a força eletromotriz  $\Delta E$  é função das várias forças eletromotrizes que podem surgir no circuito. Essas *f.e.m.*, por sua vez, dependem das temperaturas de suas respectivas junções, denominadas por *junções secundárias* (STEPHENSON, 1993). Essas são, portanto, junções formadas no circuito por diferentes materiais, submetidas a temperaturas relativas que levam a geração de *f.e.m.* próprias que são prejudiciais à *f.e.m.* do sistema.



Pode-se concluir da Eq. (3.3) que as junções secundárias formadas pelos vários elementos da montagem de um sistema termopar ferramenta-peça exercem influência no  $\Delta E$  do sistema. Assim, se a intenção for usar essa *f.e.m.* como o único sinal proporcional à temperatura  $T_1$ , as diversas termojunções e suas respectivas temperaturas devem ser considerados.

### 3.3.4 - Circuito termoelétrico do sistema termopar ferramenta-peça com compensação física

Propõe-se, a seguir, um sistema alternativo para o aparato do termopar ferramenta-peça que produza um sinal de força eletromotriz proporcional, apenas, à temperatura  $T_1$  verificada na interface de medição peça ferramenta. O sistema proposto, não só deve minimizar a influência das *junções secundárias* formadas entre os vários elementos que aparecem na cadeia de medição, simplificando o circuito elétrico correspondente, como também irá completar a proposta de calibração usando sistema real de medição com vistas a uma função de correlação mais fiel ao comportamento desse sistema. Neste caso, o sistema uma vez calibrado (após a obtenção da constante de calibração) está pronto para ser executado sem a adição de qualquer outro elemento no aparato. Na Figura 3.13 apresenta-se um esquema do circuito desta proposta.

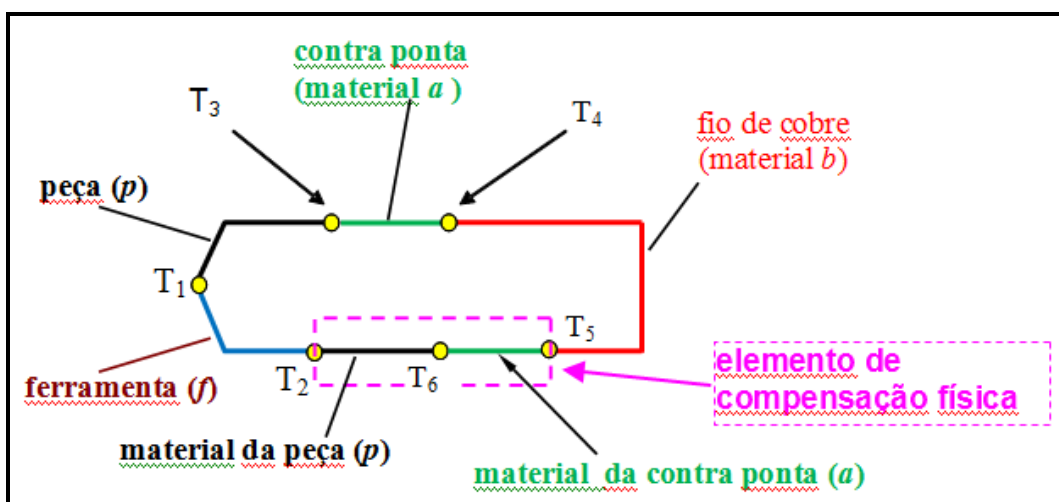


Figura 3.13 - Circuito elétrico do sistema termopar ferramenta-peça usando o conceito de compensação física.

Observa-se, na Figura 3.13, que foram acrescentados dois materiais à cadeia original de medição (aparato experimental representado na Figura 3.2): o material da peça e o material A, denominados aqui por materiais de *compensação física*, entre  $T_2$  e  $T_5$ .

O conceito de compensação física foi usado no sentido literal de compensar a *f.e.m.* produzida pelas junções secundárias verificadas no circuito. De outra forma, TRIGGER et.

al. (1958), citado por STEPHENSON (1993), usaram um sistema de compensação com objetivos semelhantes, através do monitoramento da temperatura da junção formada entre o fio condutor e a ferramenta e da adição da *f.e.m.* correspondente.

A análise do circuito elétrico do sistema mostrado na Figura 3.13 e a soma das diversas *f.e.m.* desse circuito elétrico produzem a expressão mostrada na Equação (3.4).

$$\Delta E = E_{fp}(T_1) + E_{pa}(T_3) + E_{ab}(T_4) - E_{ab}(T_5) - E_{pa}(T_6) - E_{fp}(T_2) \quad (3.4)$$

Considerando que as temperaturas nas termojunções afastadas da região de corte não sofrem influência térmica do processo de usinagem, ou seja, que  $T_3 = T_4 = T_5 = T_6$  tem-se, então, as igualdades:

$$E_{pa}(T_3) = E_{pa}(T_6) \text{ e } E_{ab}(T_4) = E_{ab}(T_5)$$

Logo, a Eq. (3.4) pode ser simplificada para a Equação (3.5):

$$\Delta E = E_{fp}(T_1) - E_{fp}(T_2) = K (T_1 - T_2) \quad (3.5)$$

E, portanto, obtém-se a Equação (3.6):

$$T_1 = T_2 + \frac{\Delta E}{K} \quad (3.6)$$

A Equação (3.6) apresenta um resultado equivalente à Eq.(3.2). Assim, a temperatura  $T_1$  pode ser estimada a partir da medição da *f.e.m.* (voltímetro), da medição da temperatura  $T_2$  na junção entre a ferramenta e o elemento de compensação física (Figura 3.13), usando-se de um termopar padrão, e da obtenção da constante de calibração **K**.

### 3.4 - Estudo da viabilidade de compensação física da junção secundária formada na ferramenta de corte

Antes de se realizar a calibração do sistema, desenvolveu-se uma análise em laboratório visando à minimização dos efeitos prejudiciais da junção formada entre a ferramenta e o fio condutor elétrico, sobre a temperatura da junta quente  $T_1$ , com o uso de um sistema de compensação física. Essa verificação foi realizada especificamente para essa junta pelo fato de se tratar da junção secundária mais significativa devido à elevação

da temperatura  $T_2$  causada pelo aquecimento da ferramenta. Os resultados obtidos conduziram a elaboração de uma proposta de calibração usando-se o próprio aparato experimental.

Desenvolveu-se este estudo em laboratório, numa montagem equivalente ao circuito elétrico que aparece na montagem termopar ferramenta-peça (Figura 3.13). Justifica-se essa montagem em laboratório pelo fato de se permitir um maior controle entre os elementos de calibração: materiais, temperatura (fontes) e equipamentos de medição (termômetros padrão e voltímetro).

Reproduziu-se o circuito elétrico correspondente à montagem experimental, representado na Figura 3.13 em uma bancada experimental conforme o esquema ilustrado na Figura 3.14. Observa-se que os materiais da ferramenta, da peça e da contra ponta foram substituídos, respectivamente, por fios de metais *alumel*, *cromel* e *constantan*. As temperaturas das junções  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$  e  $T_6$  são mantidas sempre à mesma temperatura e são controladas por um banho termostático. A temperatura  $T_2$  que representa a termojunção entre a ferramenta e o material da peça, pertencente ao elemento de compensação física (Figura 3.13), é medida por um termopar extra do tipo *K*. A calibração desse modelo, representando o termopar (junção) ferramenta-peça, é feita usando-se um bloco isotérmico através da comparação do seu sinal com a temperatura de um sensor de resistência de alta precisão do tipo *PT100*. Os equipamentos de medição que aparecem na cadeia do sistema de medição/calibração são descritos a seguir:

- Bloco isotérmico da *Ertica*, com faixa de operação entre 0 a 90 °C e 0,1 °C de estabilização;
  - Voltímetro *Agilent 3592*, resolução 1  $\mu$ V e incerteza de medição de 0,3 °C ;
  - Termômetro de precisão *Omega* com faixa de operação entre 0 a 200 °C, resolução 0,01 °C e incerteza de medição de 0,1 °C;
  - Bloco isotérmico *Omega* com faixa de variação de 0 a 400 °C e resolução de 1 °C.
- A temperatura de referência do bloco foi medida pelo termômetro de precisão *Omega*;
- *PT100 Omega* com faixa de operação 0 a 200 °C, resolução 1 °C.
  - Fios de *alumel*, *cromel* e *constantan* de diâmetro 32 AWG

A Figura 3.15 apresenta a calibração (qualitativa) do sistema. Para essa verificação, variou-se a temperatura do bloco isotérmico numa faixa de 30 °C a 250 °C. Além disso, variou-se também a temperatura da junção de referência  $T_2$ . Como, segundo as leis dos termopares, se as junções estiverem a uma mesma temperatura, o terceiro material não afeta a *f.e.m.* do sistema, a junção de referência  $T_2$  foi também inserida no banho termostático. Fez-se este procedimento apenas para simplificar a montagem experimental.

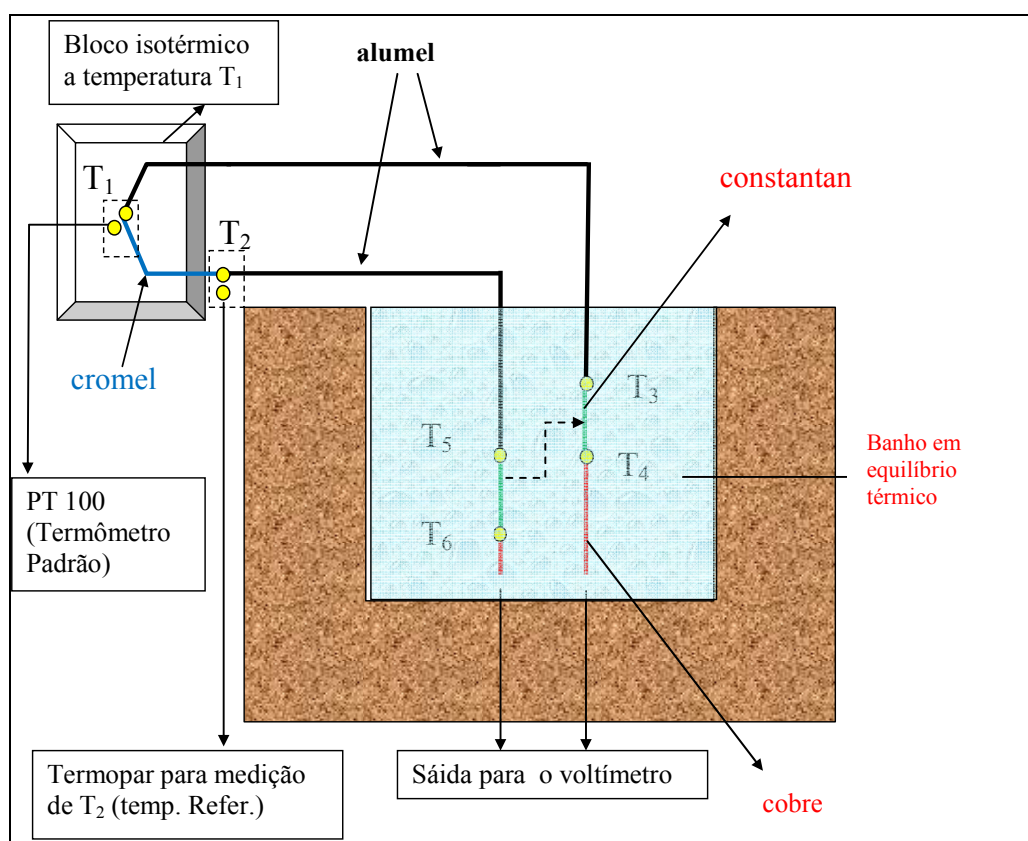


Figura 3.14 – Representação esquemática do aparato experimental construído em laboratório usando compensação física.

As temperaturas do banho variaram de 0 °C a 80 °C. Como previsto na Eq.(3.6), o efeito dessa variação de temperatura somente é sentido na junção de referência,  $T_2$ , pois há um balanceamento entre as *f.e.m.* nas junções submetidas a  $T_3$  e  $T_5$  e  $T_4$  e  $T_6$ , respectivamente (Figura 3.14).

Observa-se na Figura 3.15 que a curva de calibração da temperatura  $T_1$  só apresenta linearidade quando se considera a influência da temperatura de referência  $T_2$ . Como a temperatura da ferramenta aumenta significativamente durante o torneamento em função das condições de corte usadas, não se pode desconsiderar o aquecimento do contato entre a ferramenta e o fio de extensão do sistema, principalmente, em se tratando de inserts de metal duro (STEPHENSON, 1993).

Assim, como demonstrado pela Eq.(3.6), ao se usar o mesmo material da peça como fio extensão, o efeito da força eletromotriz adicional é compensado desde que a temperatura dessa junção seja conhecida (medida). As demais junções existentes no circuito do sistema podem ser internamente compensadas, também fisicamente, através da conveniente disposição dos materiais que constituem os elementos essenciais do sistema. Ou seja, as junções  $T_3$  e  $T_4$  formadas pelos materiais que compõem o circuito elétrico na contra ponta

devem também ser formadas no elemento de compensação física em  $T_6$  e  $T_5$ , nas posições representadas na Fig. 3.13. Portanto, o termopar ferramenta-peça constituído com essa configuração pode ser calibrado obtendo-se a constante de calibração desse sistema de forma segura e precisa. Como não há qualquer alteração (adição ou supressão) dos elementos da cadeia de medição no momento da execução dos experimentos de torneamento ou de calibração, o sistema de calibração proposto pode representar fielmente o experimento de usinagem.

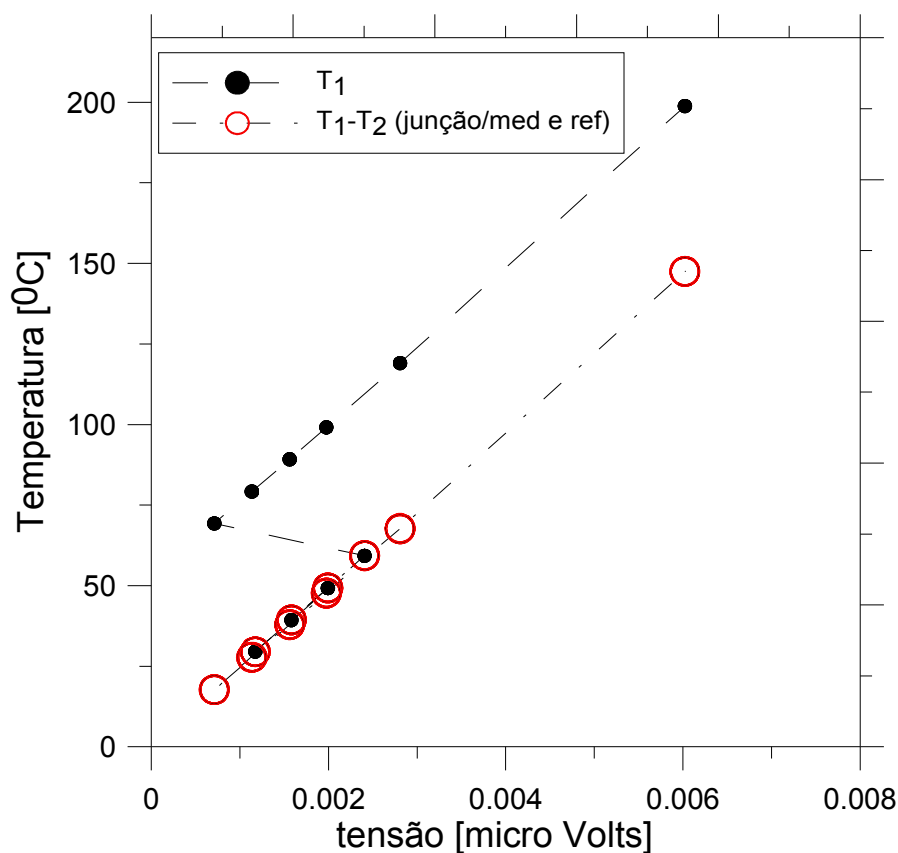


Figura 3.15 – Curva de calibração do sistema equivalente ao aparato peça-ferramenta.

### 3.5 - Descrição dos componentes do termopar ferramenta-peça com compensação física

O circuito elétrico real do sistema termopar ferramenta-peça estabelecido nos experimentos deste trabalho se caracteriza pela aplicação da compensação física da junção secundária formada na ferramenta pela necessidade de conexão elétrica e pelo uso de uma contra ponta rotativa comercial, especialmente modificada para permitir a transferência do sinal elétrico da peça para um condutor elétrico. Os elementos que compõem o circuito

elétrico no interior dessa contra ponta, correspondente ao ramo entre  $T_3$  e  $T_4$ , foram confeccionados com os mesmos materiais usados na fabricação do ramo entre  $T_5$  e  $T_6$ , visando à compensação interna dessas junções, conforme discutido acima. Nesse método usou-se isolamento elétrico da peça e do porta-ferramenta.

Apresenta-se a seguir uma descrição das modificações efetuadas na contra ponta, do elemento de compensação física, com o enfoque nos elementos metálicos usados e as suas respectivas termojunções. Apresenta-se, também, o procedimento de isolamento da peça e do porta ferramenta.

### 3.5.1 - Descrição da contra ponta rotativa adaptada com o mancal de mercúrio

As modificações na contra ponta convencional foram especialmente feitas para lhe conferir isolamento elétrico do corpo da máquina, permitir a continuidade do circuito elétrico do sistema, além de manter a sustentação rígida do corpo de prova durante a usinagem.

Na Figura 3.16 apresenta-se uma foto com os elementos da contra ponta rotativa modificada que foi usada no sistema termopar ferramenta-peça. Obteve-se a continuidade elétrica do circuito correspondente com o alojamento de uma cápsula de *Teflon*® para armazenamento de mercúrio no interior do cone *Morse* da contra ponta, baseando-se no método apresentado em Alvelid (1970).

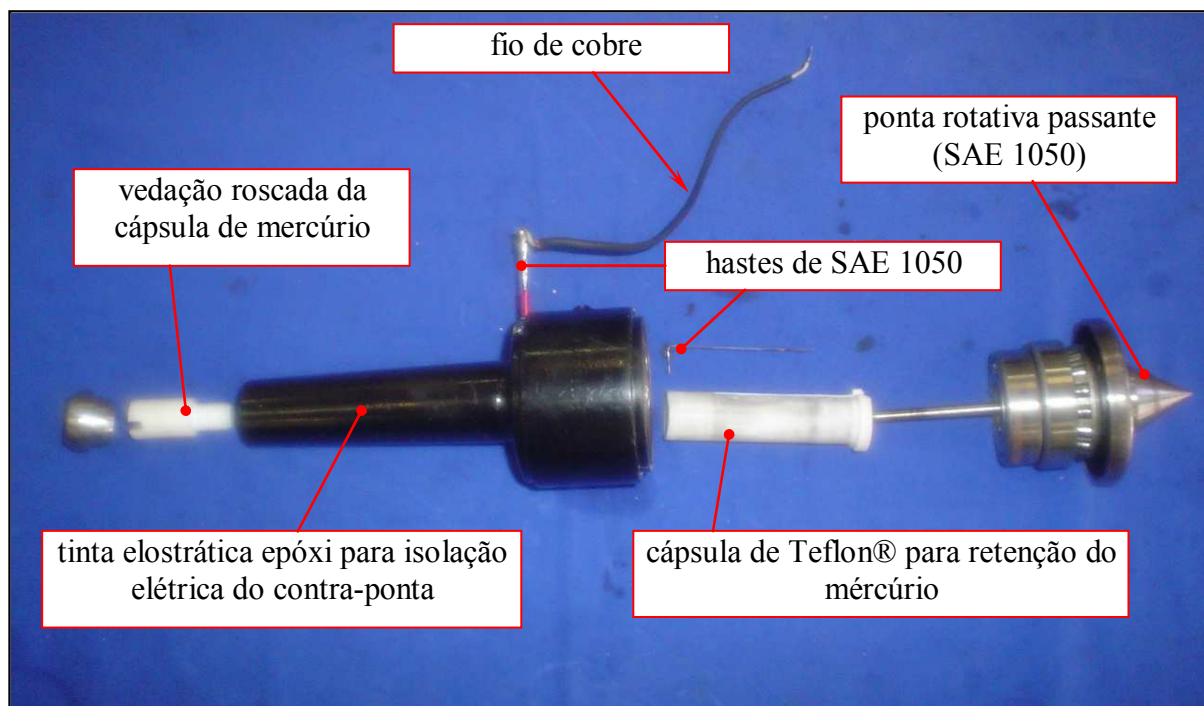


Figura 3.16 – Foto ilustrativa dos componentes da contra ponta rotativa modificada com base em Alvelid (1970), para uso no sistema termopar ferramenta-peça.

Nessa configuração, confeccionou-se a ponta rotativa com um prolongamento cilíndrico que fica inserido dentro da cápsula de *Teflon*® após a montagem final da contra ponta e, portanto, em contato contínuo com mercúrio. Dessa maneira, o circuito elétrico é mantido entre a ponta rotativa e uma haste instalada na carcaça da contra ponta com isolamento elétrico da mesma. Ambas, a ponta rotativa e a haste foram feitas de um mesmo material (SAE 1050) e, assim, formou-se a junção pelos mesmos materiais e o mercúrio sem gerar *f.e.m.* prejudicial (2ª lei dos termopares). Soldou-se um fio de cobre a essa haste, externamente à contra ponta, para fechar o circuito com o sistema de medição. Obteve-se a isolamento elétrico no cone *Morse* da contra ponta através da aplicação de pintura eletrostática à base de resina epóxi.

### 3.5.2 - Descrição do elemento de compensação física

O *elemento de compensação física* é composto de uma haste cilíndrica de aço SAE 1050 rosqueada a um conjunto geometricamente mais complexo feito do material dos corpos de prova (ferro fundido cinzento), formando a junção  $T_6$  (Fig. 3.13). Uma das extremidades desse elemento de compensação, na haste de SAE 1050, é conectada ao fio condutor formando a junta em  $T_5$ , enquanto que a outra extremidade, um pino cônico do material da peça, é pressionada contra a ferramenta para estabelecer a junta de compensação física, em  $T_2$ , como indicado na ilustração da Figura 3.13. Faz-se a conexão entre o pino do material da peça e a ferramenta usando-se um furo cego existente no vértice do alojamento da ferramenta em todos os porta-ferramentas, mostrado na Figura 3.20. Realizou-se esse contato cuidadosamente para garantir, apenas, o contato entre o material do elemento de compensação e a ferramenta. Na Figura 3.17a é reproduzida uma fotografia do *elemento de compensação física* instalado no torno e na Figura 3.17b, da sua conexão com a ferramenta

Observa-se na Figura 3.17b o uso da ferramenta na posição invertida. O objetivo foi o de eliminar o acúmulo de cavacos sobre o inserto e o sobre o porta ferramenta durante a usinagem, o que poderia produzir, em particular, o contato elétrico da junção de compensação e o material do porta ferramenta.

### 3.5.3 - Isolação elétrica do corpo do prova e do porta-ferramenta

Realizou-se a isolamento elétrica do corpo de prova, pelo lado da placa do torno, com uma cinta de *lixa ferro* envolvendo o rebaixo cilíndrico preparado nesse corpo de prova para a sua fixação pela placa (as características isolantes de folhas de lixa ferro são apresentadas no Capítulo V). Essa cinta foi interposta a uma bucha de aço fabricada com um corte longitudinal para lhe conferir o efeito mola, de tal forma que a pressão das



castanhas da placa do torno sobre essa bucha produz uma fixação rígida do corpo de prova enquanto que a cinta de lixa ferro mantém a sua isolamento elétrica.

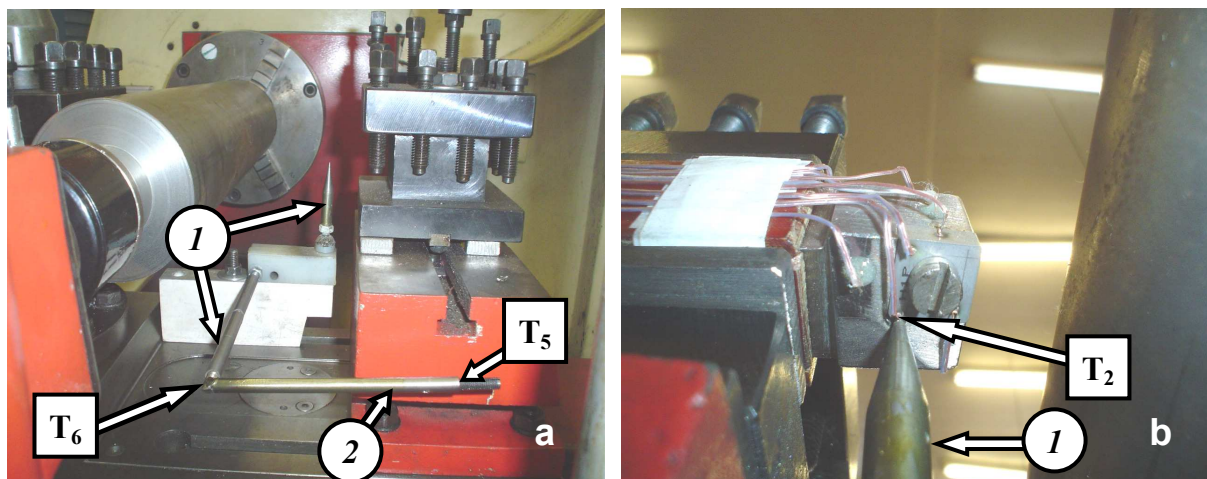


Figura 3.17 – Foto ilustrativa do *elemento de compensação física* instalado no torno em (a) e da sua conexão com a ferramenta de corte montada em posição invertida em (b): 1 - material do corpo de prova; 2 - material da ponta rotativa da contra ponta (aço SAE 1050).

Na Figura 3.18 apresenta-se dois métodos de isolamento elétrica do rebaixo feito no corpo de prova para a sua fixação pela placa do torno que precederam o sistema definitivo, que utiliza bucha elástica de aço SAE 1050. Em (a) a fixação e a isolamento são feitas com uma bucha de Technyl®. Em (b) é apresentado o 1º modelo do sistema de isolamento elétrica com lixa ferro que foi experimentado com uma bucha elástica de alumínio. Na Figura 3.19, mostra-se a aplicação de lixa ferro nessa isolamento elétrica e a fixação feita com a bucha elástica de aço.

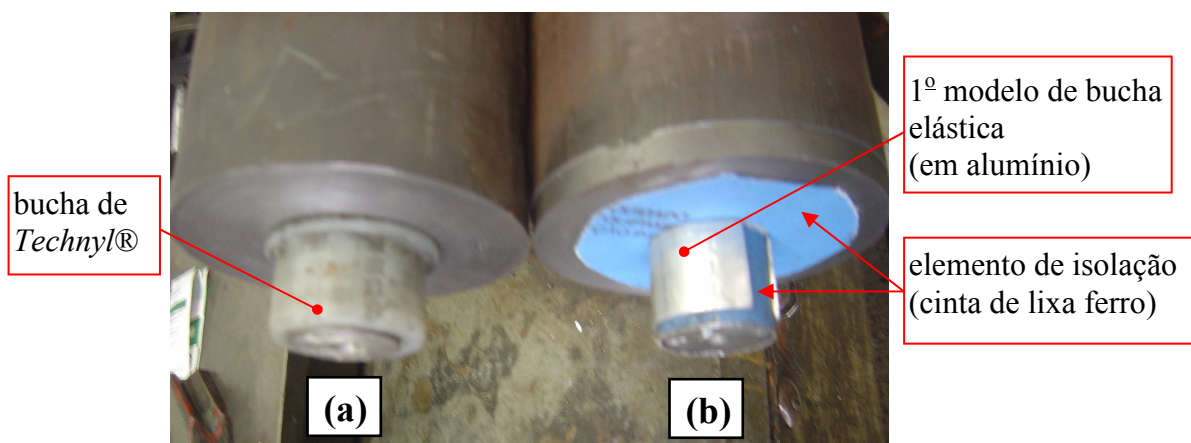


Figura 3.18 – Ilustração da isolamento elétrica do corpo de prova no rebaixo de fixação pela placa do torno: (a) com bucha de Technyl®; (b) com lixa ferro e uso de bucha de alumínio.



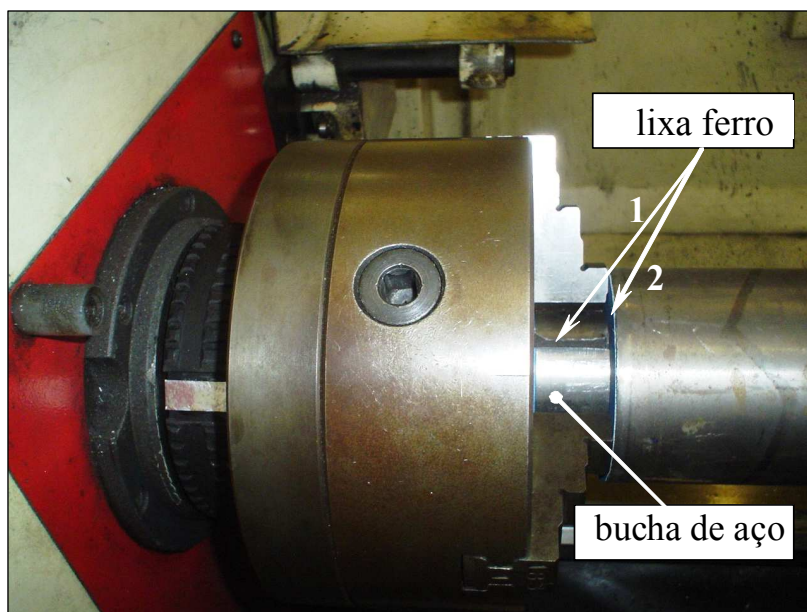


Figura 3.19 - Ilustração da fixação do corpo de prova pela placa do torno com bucha elástica de aço, utilizando-se de cinta e disco de lixa ferro para a isolamento elétrico do mesmo.

Efetuuou-se a isolação elétrica do porta-ferramenta com placas de *Celeron*® (espessura de 3,2 mm) na disposição mostrada na Figura 3.20, de maneira que não houve necessidade de se isolar a própria ferramenta.

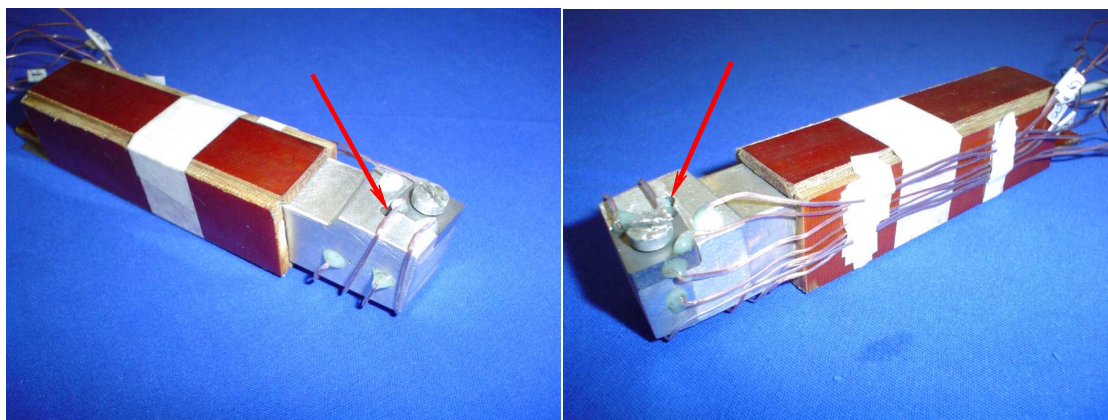


Figura 3.20 – Imagens do suporte de alumínio preparado para a execução dos ensaios, mostrando a aplicação de placas de *Celeron*® para a isolação elétrica e a indicação da posição de conexão do elemento de compensação física (setas em vermelho).

Essa isolação foi aplicada em torno do suporte para evitar o contato de fragmentos de cavacos de ferro fundido que poderiam se acumular fechando o contato com a máquina e para simplificar a geometria desse sistema, na modelagem para simulação numérica inicialmente proposta.

## CAPÍTULO IV

### CALIBRAÇÃO DO SISTEMA TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA

Como já mencionado, desenvolveu-se uma metodologia em laboratório para a calibração do sistema termopar ferramenta-peça. Entretanto, usou-se chama a gás oxi-acetileno a exemplo de Stephenson (1991a), Leshock e Shin (1997), Seker et al. (2003) para o aquecimento e conseqüente obtenção das altas temperaturas presentes nos processos de usinagem. No método proposto, o sistema termopar ferramenta-peça é constituído com os mesmos elementos usados nos experimentos – elemento de compensação física, inserto, porta ferramenta, corpo de prova de usinagem e a contra ponta modificada. A aplicação do elemento de compensação física foi bem discutida no Capítulo III. O aparato experimental da calibração foi montado no mesmo torno em que se realizam os testes, com o objetivo de se realizar a calibração usando-se uma configuração idêntica ao sistema experimental, para que as mesmas junções secundárias estivessem presentes e a temperatura de referência (da junta fria) fosse a temperatura ambiente (ALVELID, 1970), (LESHOCK e SHIN, 1997). Usou-se o porta-ferramenta de titânio em todos os ensaios de calibração considerando-se que esse elemento não compõe o circuito elétrico ferramenta-peça devido a *compensação física*.

#### 4.1 - Descrição do sistema termopar ferramenta-peça utilizado na calibração

A diferença fundamental entre a montagem utilizada nos experimentos e a montagem de calibração foi a inserção de um *dispositivo de aquecimento* entre o inserto de metal duro e o corpo de prova de usinagem, como está ilustrado na Figura 4.1.

Esse *dispositivo de aquecimento* foi usado para a obtenção das temperaturas de calibração sem a aplicação da chama do maçarico diretamente sobre a região de formação



O *elemento de aquecimento* é o corpo onde se forma a junta quente no sistema termopar ferramenta-peça. Além disso, esse elemento atua como uma extensão física do corpo de prova no circuito elétrico desse sistema e, devido às suas características construtivas, há necessidade do *pino intermediário* para a sua instalação. Como o *elemento de aquecimento* pode atingir temperaturas elevadas, fez-se o *pino intermediário* com o mesmo material (dos corpos de prova) para se evitar a formação de junções secundárias nas conexões rosçadas desse pino, prejudiciais a *f.e.m.* resultante no circuito termopar ferramenta-peça.

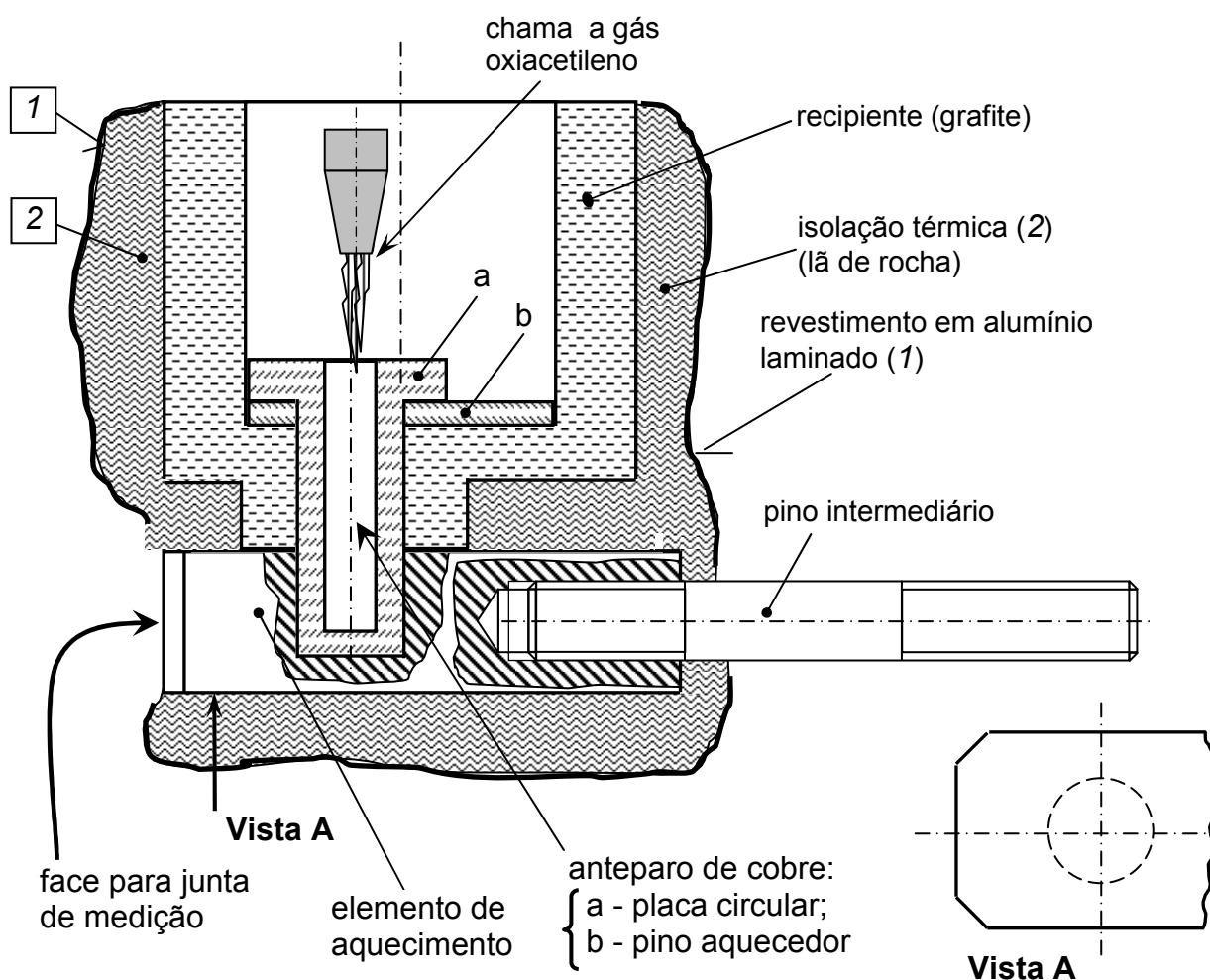


Figura 4.2 – Representação esquemática do dispositivo de aquecimento usado na calibração do sistema termopar ferramenta-peça.

Observa-se ainda na Figura 4.2 a aplicação de isolamento térmico aos componentes usados no dispositivo de aquecimento. Essa isolamento foi executada com manta de lã de rocha e um revestimento em alumínio laminado para melhorar a eficiência térmica desse sistema e evitar o aquecimento prejudicial dos outros elementos nas proximidades. Com

esses objetivos, instalou-se o anteparo de cobre por dentro de um recipiente cilíndrico visando à redução da dissipação de calor, principalmente por radiação térmica, durante o aquecimento com a chama do maçarico. Esse recipiente originalmente deveria ser fabricado em material refratário, no entanto, usou-se a grafite em função da facilidade de sua manipulação. Embora não se trate de um isolante térmico, isso foi compensado parcialmente com o uso da referida isolação térmica.

Nessa configuração, usando o *elemento de aquecimento* caracterizado acima, o calor fornecido pela chama ao *anteparo de cobre* é transmitido por condução ao *elemento de aquecimento*. Devido à proximidade entre *opino aquecedor* e a face da junta quente no *elemento de aquecimento*, há obtenção de diferentes valores de temperatura nessa face, inclusive com valores acima de 850 °C, suficientes para se proceder a calibração do sistema. Com exceção da junção de compensação formada no contato direto com a ferramenta, o restante do sistema fica submetido a temperaturas próximas à temperatura ambiente apesar do uso do aquecimento com chama de maçarico. Dessa forma, o sistema termopar ferramenta-peça usado na calibração tem uma configuração semelhante ao sistema resultante nos experimentos.

#### 4.1.2 - Medição da temperatura de calibração

Para a determinação da temperatura de calibração, dois termopares padrão *chromel/alumel* (ou tipo K) foram instalados aproximadamente numa mesma posição da superfície do *elemento de aquecimento* em que se forma a junta quente, como mostra a fotografia reproduzida na Figura 4.3.

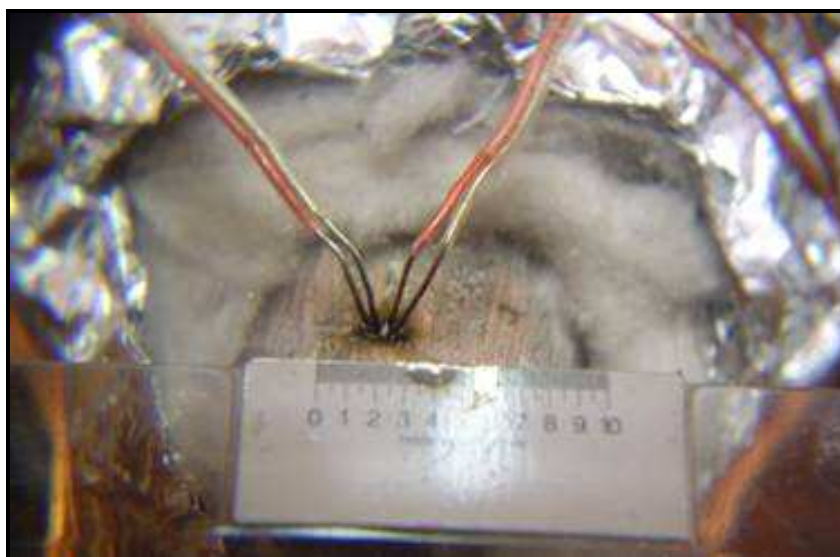


Figura 4.3 – Reprodução de fotografia mostrando os dois termopares tipo K instalados no *elemento de aquecimento* para a medição da temperatura de calibração (ampliação: 10 x).



Esses termopares foram fixados por solda a descarga capacitiva, antes da montagem do *dispositivo de aquecimento* no sistema (no corpo de prova). O uso de dois termopares foi opção preventiva para diminuir a possibilidade de perda de resultados causada por avaria durante o experimento, além de permitir a verificação da coerência da temperatura de calibração obtida através da comparação entre duas medições.

A Figura 4.4 apresenta a reprodução de uma fotografia do *dispositivo de aquecimento*, feita após a realização de ensaios de calibração. Nessa figura, pode-se observar a região deformada pela ferramenta durante estabelecimento da junta quente e a sua proximidade com a posição de fixação dos termopares padrão.



Figura 4.4 – Imagem do dispositivo de aquecimento após ensaios de calibração, apresentando a marca deixada pela ferramenta durante a formação da junta quente e a proximidade desta para os termopares padrão (indicação da seta).

#### 4.1.3 - Medição da temperatura de compensação

A temperatura de compensação foi determinada através do uso de dois termopares padrão tipo T instalados nas proximidades da junção de compensação como mostrado na Figura 4.5.

O uso de dois termopares padrão nessa medição também tem os objetivos de garantir a validade do ensaio, conforme considerações feitas para a medição da temperatura de calibração.



Figura 4.5 – Reprodução de fotografia mostrando os dois termopares tipo T instalados para medição da temperatura de compensação (ampliação: 10x).

#### 4.1.4 - Instalação do elemento de compensação física

Durante a realização dos experimentos, montou-se a ferramenta na posição invertida para se evitar o acúmulo de cavacos sobre o suporte e a ferramenta, como mostra a Figura 4.6a.

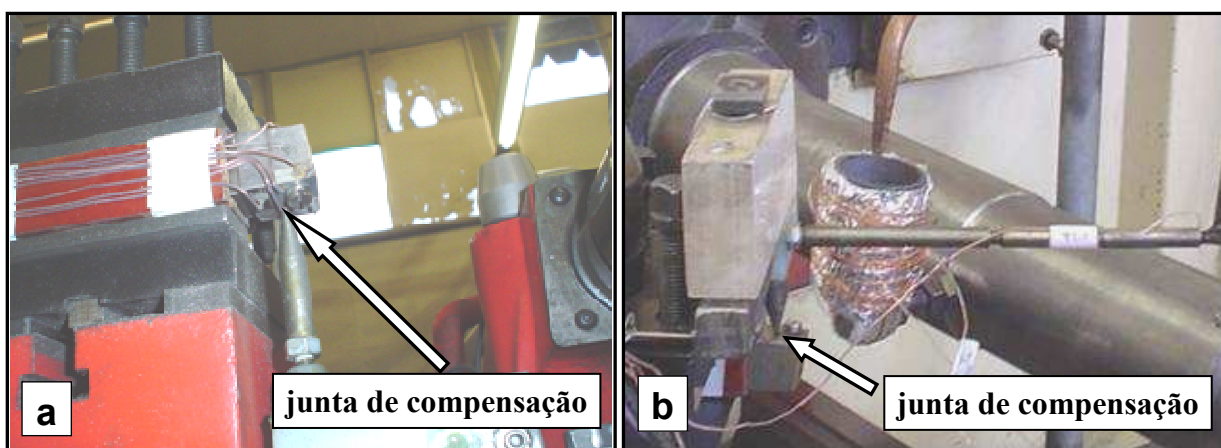


Figura 4.6 – Ilustrações da montagem do elemento de compensação no torno: (a) para a realização dos experimentos; (b) para a realização dos ensaios de calibração.

Nessa posição instalou-se o elemento de compensação física sobre o carro transversal do torno. No entanto, para a realização dos ensaios de calibração, esse elemento de compensação foi fixado ao castelo porta-ferramenta do torno na configuração mostrada na Figura 4.6b. Dessa maneira, colocou-se a ferramenta na posição normal de usinagem, permitindo-se o controle da sua aproximação para o estabelecimento da junta

quente com o *elemento de aquecimento*. A Figura 4.7 mostra uma fotografia do sistema após o estabelecimento da *junta quente*, num dos ensaios de calibração. Pode-se observar em primeiro plano, os termopares tipo T na *junta de compensação* e, em segundo plano, os termopares tipo K de medição da temperatura de calibração junto à ponta da ferramenta. Essa imagem sugere a proximidade entre o contato da ferramenta e as posições de instalação desses termopares, o que foi confirmada na Figura 4.5.

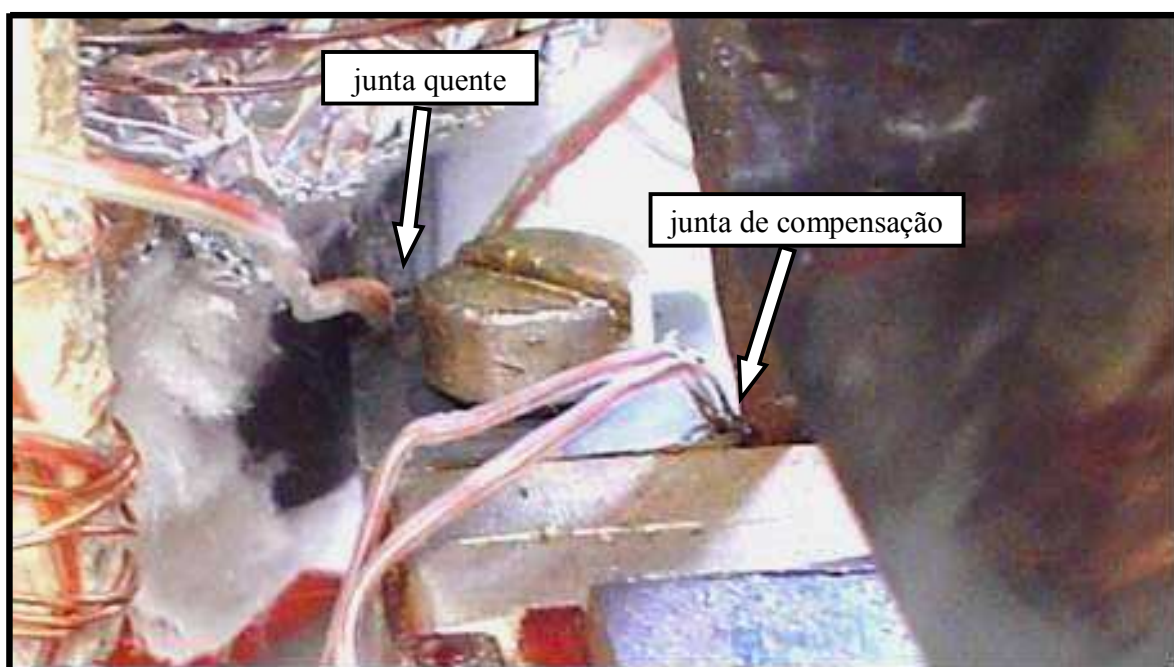


Figura 4.7 – Reprodução de fotografia mostrando o estabelecimento da *junta quente* e da *junta de compensação* durante os ensaios de calibração.

#### 4.1.5 - Aquecimento com chama a gás oxi-acetileno

O aquecimento do sistema termopar ferramenta-peça para a calibração foi feito com chama de maçarico a gás oxi-acetileno. Para isso, usou-se a *caneta do maçarico* em um suporte fixado no torno, como mostra a Figura 4.8. Esse suporte permite o ajuste no posicionamento da chama, tanto da sua centralização em relação ao *recipiente cilíndrico* quanto da sua altura em relação ao *pino aquecedor* do dispositivo de aquecimento. Assim, ajustando o tamanho da chama com a regulagem de vazão dos gases do próprio maçarico foi possível variar a quantidade de calor fornecido ao pino aquecedor, para se obter diferentes temperaturas na junção de medição. A altura (maior ou menor aproximação) da chama em relação ao pino aquecedor contribuiu para ajustar o aquecimento sem provocar a fusão dos elementos submetidos diretamente à chama.



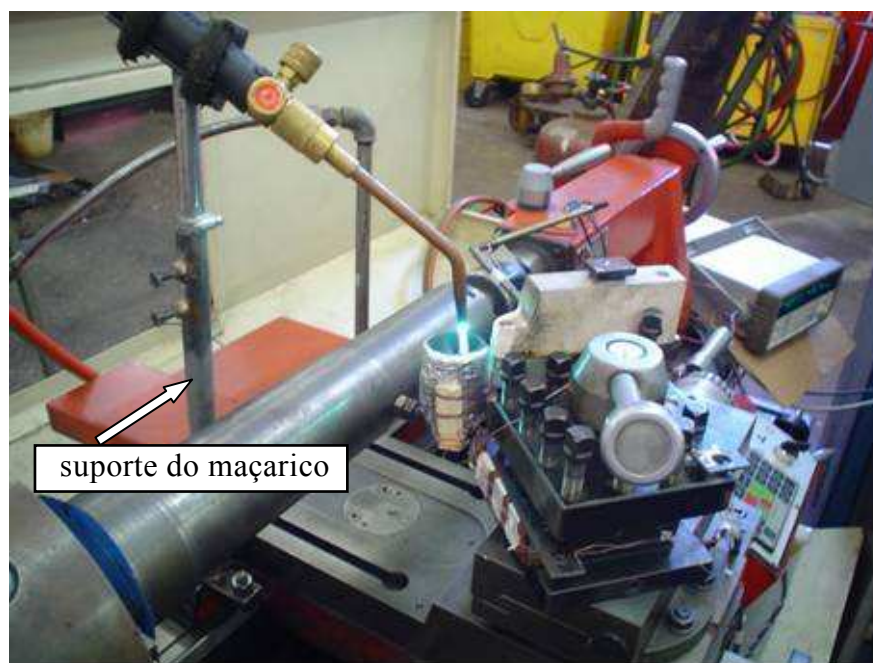


Figura 4.8 – Imagem do sistema de calibração destacando o uso do aquecimento com maçarico.

#### 4.2 - Execução dos ensaios de calibração

Os ensaios da calibração foram realizados através de dois procedimentos denominados aqui por Métodos I e II. Os procedimentos do Método I são caracterizados pela realização dos ensaios durante o aquecimento do sistema, nos regimes transiente e permanente. No Método II, os ensaios são realizados a partir do sistema aquecido em regime permanente, estendendo-se ao seu resfriamento (regime transiente).

Foram realizados oito ensaios com os procedimentos do Método I e sete com o Método II, sendo que onze experimentos foram considerados úteis. Em ambos os Métodos, a posição da junta quente foi previamente determinada considerando a localização dos termopares a mais próxima possível do contato entre a ferramenta e o elemento a ser aquecido (mesmo material da peça) como mostrado na Figura 4.4. A seguir, com a ferramenta posicionada no contato da junta quente, fez-se o travamento dos movimentos do torno para se evitar o desalinhamento entre esses componentes. O deslocamento transversal da ferramenta foi o único movimento previsto dentro do sistema, sendo necessário para o seu afastamento ou a sua aproximação ao elemento de aquecimento durante os preparativos para a realização dos ensaios e foi efetuado com mecanismo de movimentação do carro transversal do torno.

Executou-se os testes do Método I com o circuito elétrico do sistema termopar

ferramenta-peça previamente estabelecido e todos os seus elementos à temperatura inicial do ambiente. Forneceu-se o calor a partir dessa configuração até se verificar a estabilização da temperatura de calibração pelo monitoramento dos termopares padrão tipo K. As aquisições foram feitas desde o início do aquecimento até o resfriamento parcial do sistema. Os resultados obtidos nessa etapa, correspondente à fase inicial da calibração do sistema, foram avaliados como insuficientes e inadequados para representar a correlação entre as variáveis experimentais porque os valores da *f.e.m.* obtidos nesses ensaios estavam numa faixa muito inferior aos valores verificados nos testes. Observou-se nesses resultados o intervalo de 70 °C e 300 °C para a temperatura de compensação e 370 °C e 800 °C para a temperatura de calibração ao final dos ensaios, enquanto que a *f.e.m.* correspondente apresentou valores aproximados de 2,0 mV e 4,5 mV, respectivamente.

Na Figura 4.9 apresenta-se os gráficos dos resultados de três ensaios de calibração executados com os procedimentos do Método I. As posições de medição de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_5$ ,  $T_6$  e  $T_{\text{ambiente}}$  são ilustradas na Figura 4.11.

Testes experimentais obtidos com o suporte de titânio produziram *f.e.m.* entre 7,0 mV e 8,0 mV para a temperatura de compensação correspondente com valores em torno de 190 °C. Verificou-se assim a necessidade da realização de novos ensaios na calibração do sistema. Observando especialmente que a temperatura de compensação apresentou valores muito elevados em relação aos resultados experimentais, decidiu-se modificar os procedimentos usados no Método I para buscar resultados de calibração na faixa de sinais de tensão encontrada experimentalmente.

O Método II de calibração é resultado das alterações feitas nos procedimentos do Método I para se obter a *f.e.m.* em um intervalo mais amplo contendo os resultados da *f.e.m.* experimental. Dessa forma, a curva de calibração correspondente pode ser usada para expressar a correlação entre as variáveis experimentais - *f.e.m.* e temperatura de compensação - e o valor calculado da temperatura na interface. Em outras palavras, o objetivo foi o de garantir matematicamente que os resultados experimentais pudessem ser interpolados aos resultados da calibração. Caso contrário, não existindo a interseção entre os intervalos de *f.e.m.* verificados nos experimentos e nos ensaios de calibração, as estimativas da temperatura na interface seriam feitas por extrapolação dos resultados da calibração, num procedimento que pode conduzir a conclusões equivocadas.

Nos experimentos realizados com o Método II, o circuito elétrico do sistema foi inicialmente aberto através do recuo máximo do carro transversal do torno. Assim, a ferramenta e o elemento de compensação física foram mantidos à temperatura do ambiente. O aquecimento foi realizado até se verificar a estabilização da temperatura de calibração. Nessa condição, a aquisição de dados foi iniciada em instantes antes do contato entre a

ferramenta e o elemento de aquecimento. As aquisições foram interrompidas durante o resfriamento, quando o monitoramento da *f.e.m.* indicou valores próximos a 5,0 mV. Na Figura 4.10 são apresentados os resultados do 2º, 5º e 6º testes realizados com o Método II (correspondentes, respectivamente, ao 10º, 13º e 14º ensaios da calibração).

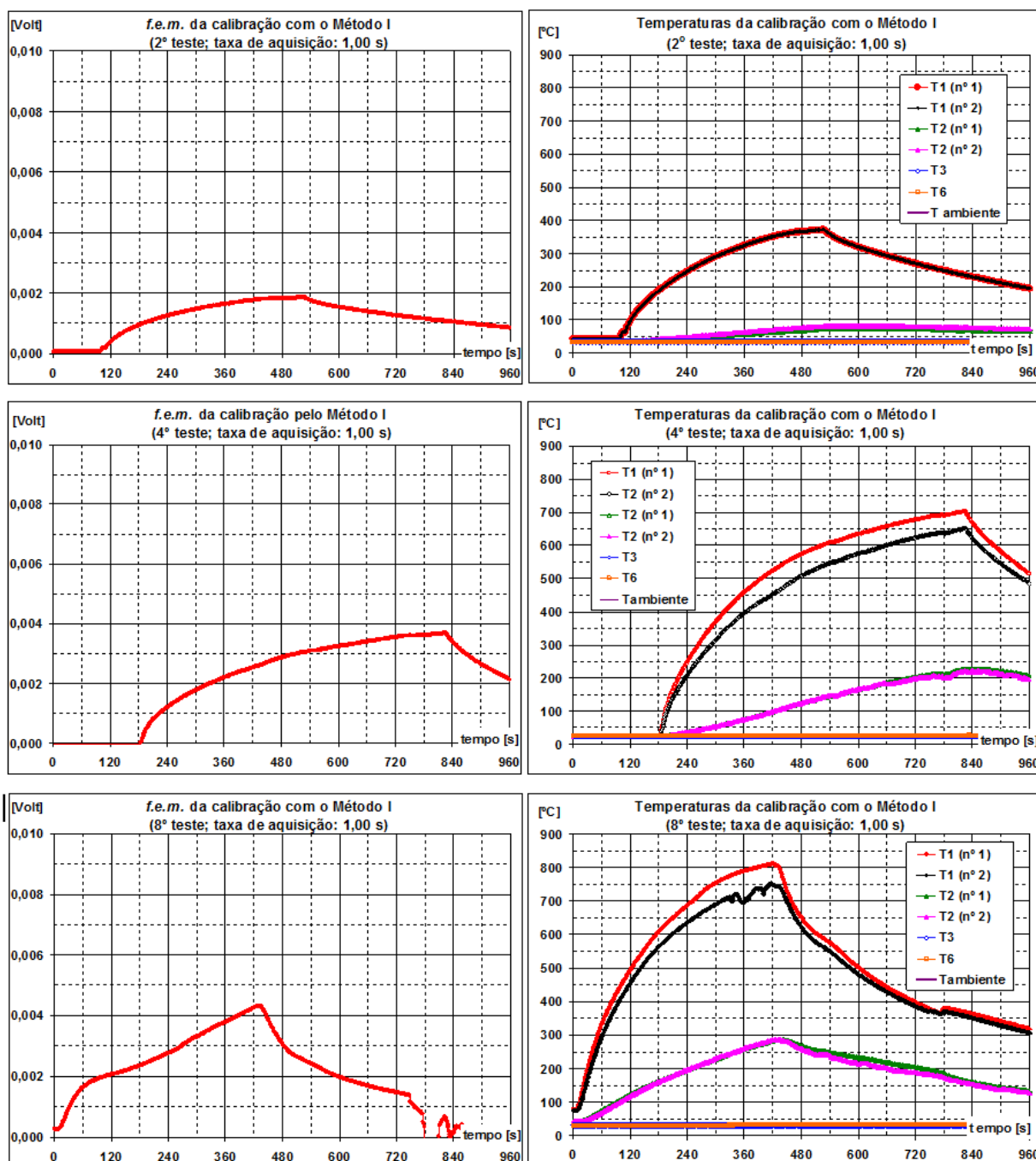


Figura 4.9 – Representação gráfica dos resultados de três ensaios de calibração realizados com o Método I.

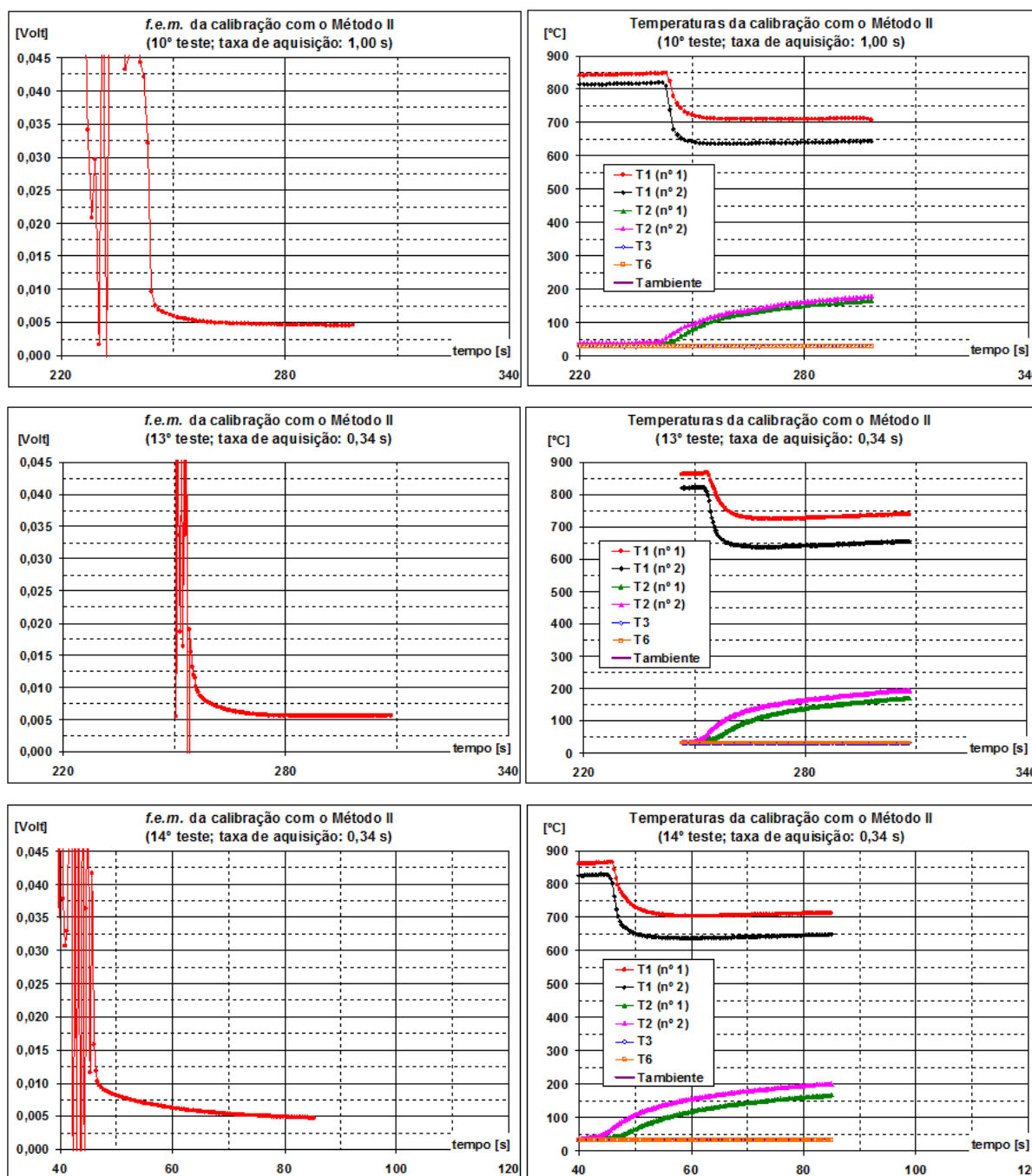


Figura 4.10 - Representação gráfica dos resultados de três ensaios de calibração realizados com o Método II (10º, 13º e 14º ensaios).

Pode-se observar na Figura 4.10, que os valores da *f.e.m.* são significativamente superiores aos valores encontrados nos ensaios com o Método I, embora as temperaturas de calibração máximas não tenham ultrapassado em 10 % as correspondentes temperaturas daqueles ensaios. Verificou-se, também, que as temperaturas de compensação atingiram valores inferiores aos obtidos na primeira metodologia e os valores da força eletromotriz ocuparam uma faixa encontrada nos testes experimentais. Portanto, os

resultados dessa metodologia se mostraram adequados à realização de um tratamento matemático para ajuste de uma curva de calibração expressando o comportamento do sistema, pois os valores obtidos da *f.e.m.* e da temperatura de compensação são compatíveis com os resultados experimentais.

Durante a realização dos ensaios fez-se o monitoramento das temperaturas das conexões das juntas frias do termopar ferramenta-peça, situadas mais próximas do dispositivo de aquecimento. Essas junções são o acoplamento da contra ponta com o corpo de prova e a conexão roscada entre os componentes do elemento de compensação. Esse monitoramento e a medição dessas temperaturas, inclusive a medição da temperatura do ambiente em torno do sistema foram realizadas com termopares padrão tipo T. As localizações dessas junções e dos respectivos termopares padrão estão ilustradas na Figura 4.11. Nessa ilustração, o elemento de compensação física é composto pelos materiais A e B que correspondem ao material da ponta rotativa da contra ponta modificada (ABNT 1050) e do corpo de prova (ferro fundido cinzento), respectivamente.

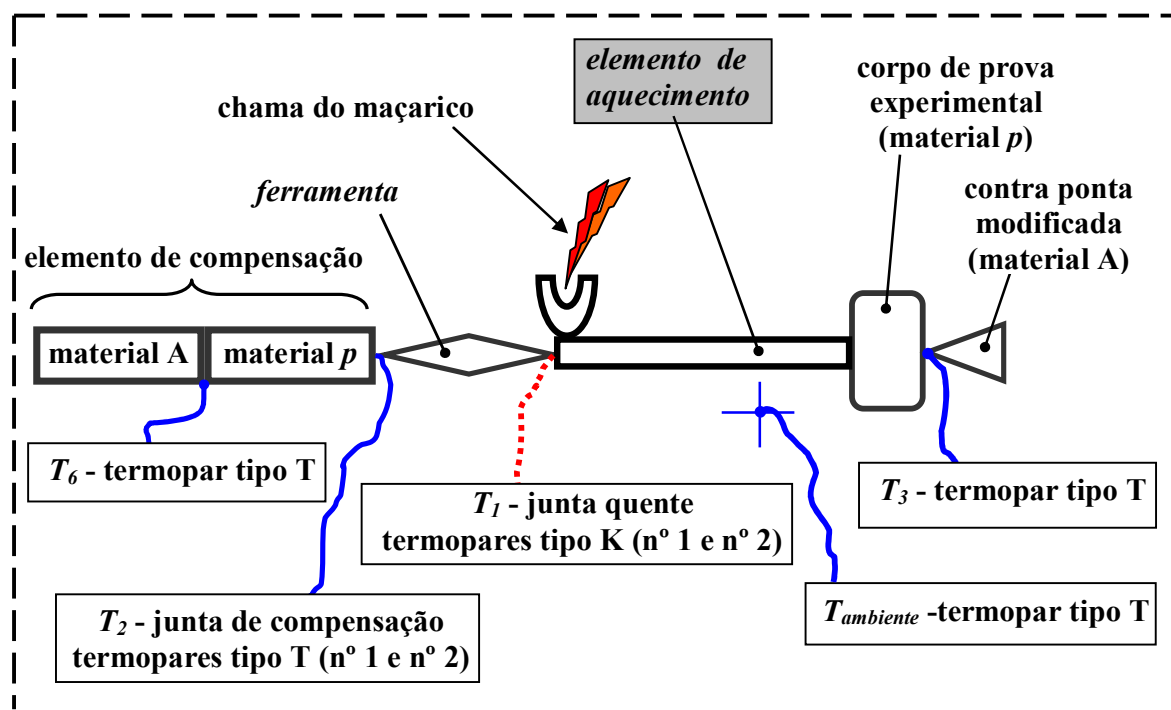
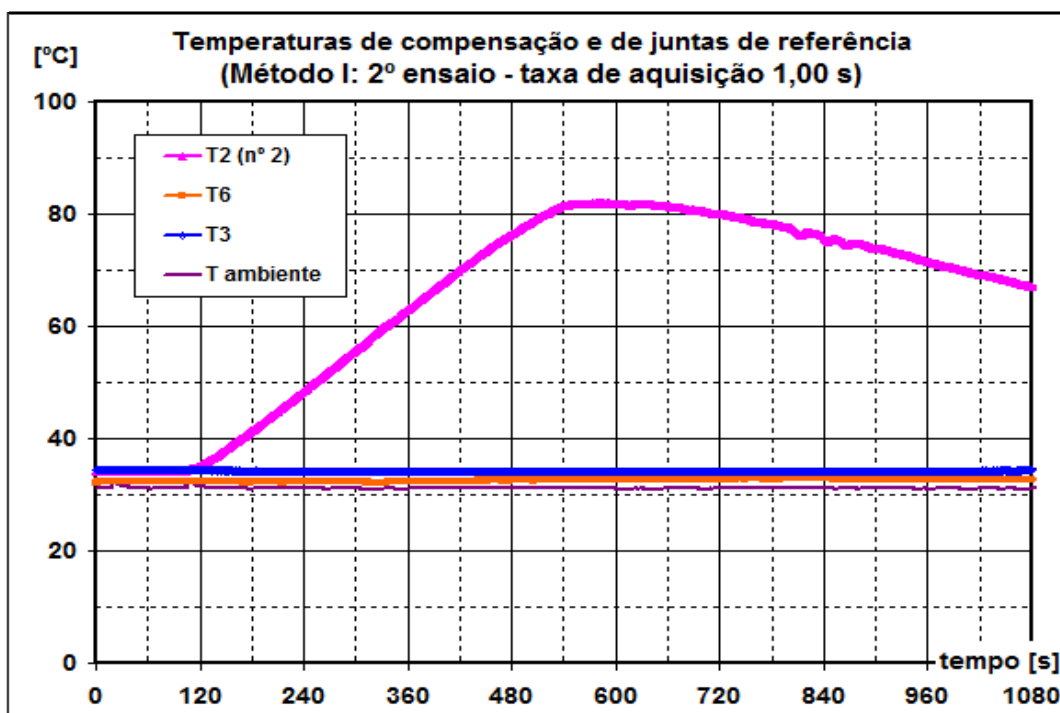
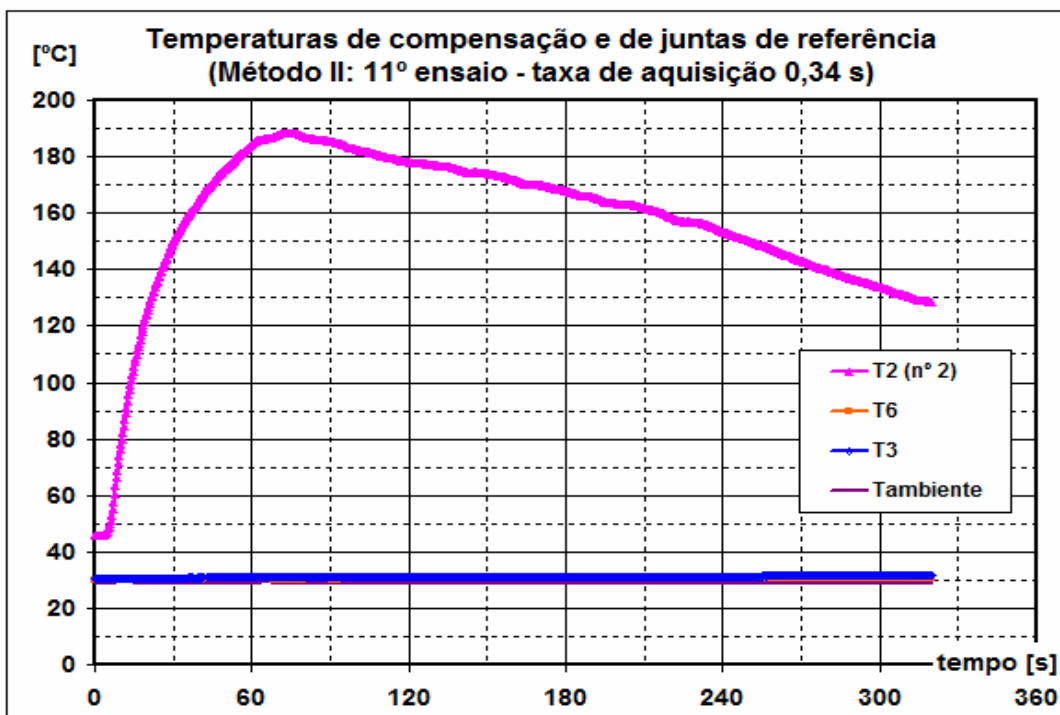


Figura 4.11 – Ilustração do posicionamento dos termopares padrão usados na calibração do sistema termopar ferramenta-peça.

Na Figura 4.12 são apresentados os gráficos da temperatura ambiente, da temperatura de compensação, da temperatura no contato entre a contra ponta e o corpo de prova e da temperatura na conexão interna do elemento de compensação.



(a) resultados do 2º ensaio - Método I



(b) resultados do 3º ensaio - Método II

Figura 4.12 – Representações gráficas das temperaturas no ambiente, da junta de compensação ( $T_2$ ), da junção peça e contra ponta ( $T_3$ ) e da conexão entre os componentes do elemento de aquecimento ( $T_6$ ): (a) 2º ensaio com o Método I e (b) 3º ensaio com o Método II (11º ensaio na ordem geral).

Essas temperaturas foram medidas nas posições indicadas na Figura 4.11 durante a realização do 2º ensaio do Método I e do 3º ensaio do Método II (correspondente ao 11º ensaio do total).

Observa-se nesses gráficos que as temperaturas das junções entre a peça e a contra ponta e entre os materiais do elemento de compensação se mantiveram em valores próximos à temperatura do ambiente. Esse comportamento foi verificado em todos os ensaios e, portanto, a temperatura ambiente foi usada como a temperatura de referência de junta fria, tanto nos procedimentos experimentais quanto na calibração.

#### 4.3 - Efeito da temperatura da junta de compensação física sobre a *f.e.m.* resultante

As diferenças entre o Método I e Método II estão essencialmente relacionadas à temperatura de compensação inicial. Nos procedimentos do Método I, essa temperatura se eleva durante todo o aquecimento, pois a ferramenta é mantida em contato contínuo com o *elemento de aquecimento* durante todo o ensaio. Realizou-se o aquecimento do sistema com uma fonte constante de calor (tamanho fixo da chama) até a verificação da estabilização da temperatura de calibração. Nessa condição, a gradiente de temperatura na ferramenta é atenuado devido a difusão de calor (duração do aquecimento no ensaio), numa tendência de homogeneização da temperatura em toda a ferramenta. Embora o pino de ferro fundido do elemento de compensação possa ter um comportamento de aleta e provocar a redução da temperatura na junta de compensação, essa temperatura atinge valores elevados, superiores aos verificados experimentalmente e em torno de 300 °C nesses ensaios.

O fato da temperatura de compensação atingir valores elevados contribui para a obtenção de menores valores da *f.e.m.* resultante, pois o efeito termoelétrico do termopar secundário formado pelos materiais da junta de compensação se torna mais significativo à medida que há elevação da temperatura dessa junção. Assim, a *f.e.m.* do termopar principal formado na junção quente é prejudicada pela *f.e.m.* contrária do termopar secundário da junta de compensação porque há uma inversão na disposição dos materiais nessas juntas. Enquanto a formação da junta quente pode ser considerada na ordem metal duro/ferro fundido, na junta de compensação essa ordem é inversa, ferro fundido/metal duro.

No equacionamento do circuito elétrico do sistema termopar ferramenta-peça específico desse experimento, realizado no Capítulo III, obteve-se a Equação (3.5) adequadamente expressa aqui pela Equação (4.1). Podemos verificar na Eq. (4.1), o efeito negativo da elevação da temperatura de compensação na *f.e.m.* resultante.

$$\Delta E = E_{fp1}(T_1) - E_{fp2}(T_2) \quad (4.1)$$

onde,  $\Delta E$  é a força eletromotriz (f.e.m.);  $T_1$  é temperatura da junta quente ou temperatura de calibração ( $T_{calibração}$ );  $T_2$  é temperatura da junta de compensação ( $T_{compensação}$ );  $E_{fp1}$  e  $E_{fp2}$  é o coeficiente termoelétrico relativo de *Seebeck*, entre os materiais da ferramenta e o da peça e  $K$  é a constante de calibração do sistema.

Observa-se nessa equação que, na hipótese da temperatura de compensação  $T_2$  se aproximar da temperatura de calibração  $T_1$ , a f.e.m. tende a se anular. Como ambas as junções são constituídas dos mesmos materiais, as forças eletromotrizes são idênticas e portanto a Eq. (4.1) pode ser re-escrita na forma da Equação (4.2):

$$\Delta E = K (T_{calibração} - T_{compensação}) \quad (4.2)$$

A sensibilidade do termopar ou coeficiente relativo de *Seebeck*,  $E_{fp}$ , pode ser alterada pelo efeito da elevação da temperatura sobre os materiais que compõem a junção. Nesse sistema termopar ferramenta-peça, a junta quente sujeita ao aquecimento pelo calor da chama, vai estar a uma temperatura sempre mais elevada do que a junção de compensação. O material do elemento de aquecimento (ferro fundido cinzento) pode passar por transformações metalúrgicas devido às elevadas temperaturas (acima de 700 °C) e resfriamento lento (devido à isolamento). Isso pode alterar as propriedades termoelétricas que influenciarão na f.e.m. resultante.

#### 4.4 - Resultados experimentais da calibração do sistema

Na Figura 4.13 apresenta-se os gráficos das diferenças entre as temperaturas de calibração e de compensação ( $\Delta T = T_{calibração} - T_{compensação}$ ) em função de f.e.m., para os ensaios realizados pelos procedimentos do Método I. Na Figura 4.14 são apresentados os mesmos gráficos do Método I e os gráficos correspondentes aos ensaios do Método II. Essa forma de apresentação gráfica visa à verificação do comportamento das grandezas experimentais durante esses ensaios quanto ao ajuste das curvas de calibração conforme a Eq. (4.2).

Na Figura 4.13, relacionada aos ensaios do Método I, podemos observar que entre o intervalo 250 °C a 300 °C, de modo geral,  $\Delta T$  tem uma resposta linear com a f.e.m. No intervalo entre 300 °C e 450 °C, a f.e.m. não aumenta na mesma proporção em que há o crescimento de  $\Delta T$ . Por fim, entre 450 °C e 550 °C, os resultados sugerem a estagnação e



até recuo de  $\Delta T$  enquanto há aumento discreto da *f.e.m.* (ensaios 4º, 6º, 7º e 8º ensaios).

Esses dois comportamentos distintos que ocorrem quando a diferença  $\Delta T$  ultrapassa 300 °C podem estar relacionados à transição entre crescimento do efeito negativo do termopar secundário da junção de compensação, devido à elevação da temperatura nessa junta, e posteriormente, à sobreposição da variação das propriedades termoeletricas do material do elemento de aquecimento, provocada pela elevada temperatura de calibração (4º, 6º, 7º e 8º ensaios).

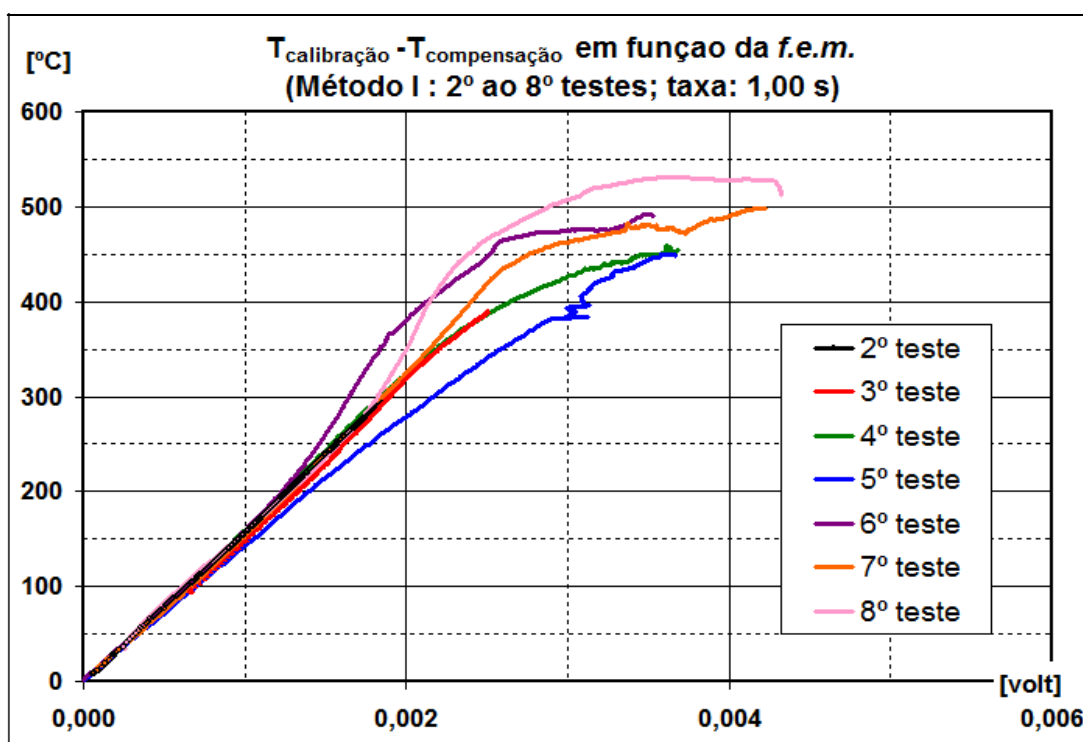


Figura 4.13 – Representação gráfica das curvas de calibração correspondentes aos ensaios realizados com o Método I.

Verifica-se na Figura 4.14 (método II, 10º ao 14º) que a *f.e.m.* é superior a 7,0 mV para valores de  $\Delta T$  acima de 700 °C. Portanto, os valores da *f.e.m.* obtidos no Método II são muito mais elevados do que do Método I. Observa-se nessa figura que entre 700 °C e 800 °C, correspondente ao início dos ensaios do Método II, há variação significativa da *f.e.m.*, o que é verificado, também, na Figura 4.10. Os resultados do 10º, 13º e 14º ensaios apontam a *f.e.m.* com valores máximos entre 15,0 mV a 18,0 mV.

Observa-se, ainda, na Figura 4.10, que há queda brusca nos valores da *f.e.m.* e da temperatura de calibração imediatamente após o contato da ferramenta formando a junta quente (simultaneamente, há o início da elevação da temperatura de compensação). No entanto, a variação da *f.e.m.* é mais acentuada e ocorre durante um pequeno intervalo de

tempo depois do estabelecimento do circuito elétrico. No caso do 10º ensaio, onde a taxa de aquisição usada foi de 1/segundo, verificamos a variação da *f.e.m.* de 22,5 mV entre as duas primeiras aquisições significativas. Da mesma maneira, no 14º ensaio a variação da *f.e.m.* foi de 25,8 mV, a uma taxa de 1 aquisição em 0,34 segundos.

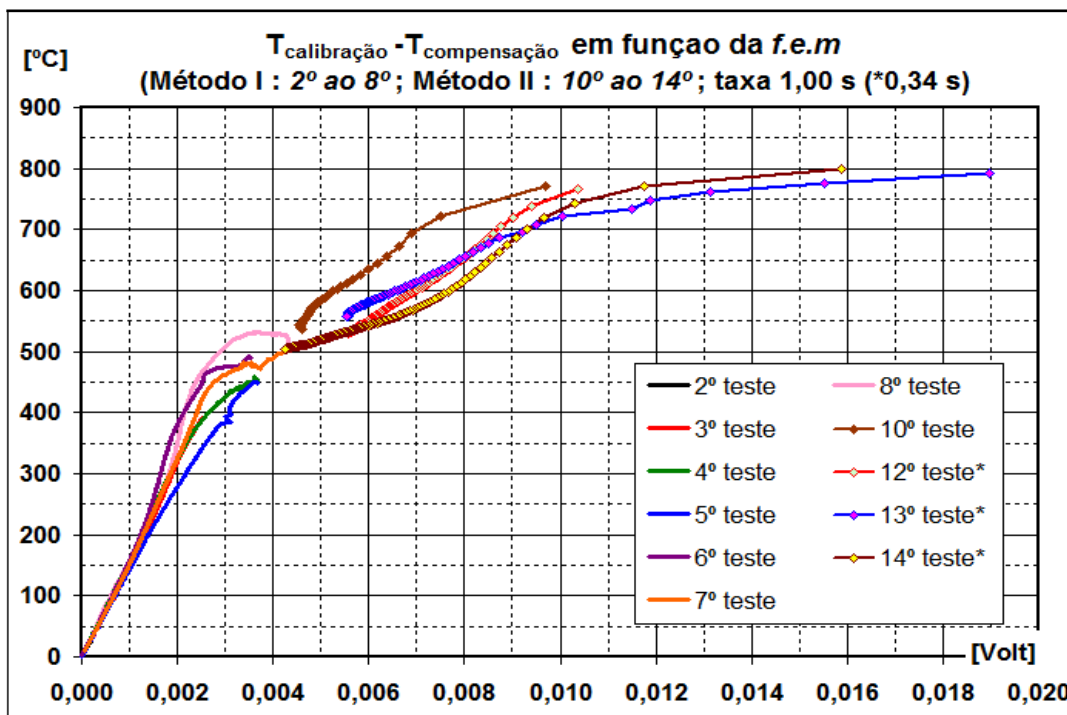


Figura 4.14 – Representação gráfica das curvas de calibração correspondentes aos ensaios realizados com os Métodos I e II.

Na Figura 4.14, observa-se nos gráficos dos ensaios do Método II (10º ao 14º), que as respectivas curvas são aparentemente assintóticas a uma reta horizontal, correspondente a  $\Delta T$  máximo de 800 °C. No entanto, verifica-se na Figura 4.10 que a temperatura de calibração atingiu valores próximos a 850 °C em todos esses ensaios enquanto que a temperatura de compensação esteve entre 25 °C e 50 °C. Esse fato justifica o limite máximo para  $\Delta T$  em torno de 800 °C.

Observa-se na Figura 4.14, entre 450 °C e 550 °C, uma faixa de transição entre os domínios dos dois métodos de calibração. De fato, para a obtenção de uma curva de calibração que abranja a faixa de *f.e.m.* encontrada experimentalmente, somente o método II deve ser empregado. No entanto, para valores de *f.e.m.* onde temperaturas inferiores a 400 °C são presentes, qualquer uma das técnicas pode ser usada.

#### 4.5 - Ajuste da curva de calibração

O equacionamento do sistema termopar ferramenta-peça apresentado anteriormente é dado pela Equação (4.2). Nessa equação, a força eletromotriz  $\Delta E$  é relacionada à diferença de temperaturas ( $T_{\text{calibração}} - T_{\text{compensação}}$ ), conforme a lei de Seebeck, porém, o termopar ferramenta-peça é usado especificamente para se estimar a temperatura na interface cavaco ferramenta  $T_{\text{interface}}$  através dos resultados experimentais de  $\Delta E$  e  $T_{\text{compensação}}$ .

Com essa finalidade, a curva de calibração ajustada aos resultados experimentais da calibração é análoga à Eq. (4.2), mas pode ser manipulada para que a temperatura média da interface  $T_{\text{interface}}$  fique em função dos resultados experimentais conforme a Eq. (4.3).

$$(T_{\text{interface}} - T_{\text{compensação}}) = \Delta E \cdot K' \quad (4.3)$$

onde se fez a transformação  $K' = 1/K$ . Dessa forma, a temperatura da interface  $T_{\text{interface}}$  é estimada através da Equação (4.4):

$$T_{\text{interface}} = \Delta E \cdot K' + T_{\text{compensação}} \quad (4.4)$$

##### 4.5.1 - Determinação da curva de regressão com a função de correlação de melhor ajuste para os valores experimentais de f.e.m., temperatura de compensação e de calibração.

Os ensaios de calibração foram realizados para a determinação de uma equação matemática que expresse a relação entre os valores experimentais da f.e.m., a temperatura de compensação e o valor calculado da temperatura da interface cavaco ferramenta, de acordo com a Equação (4.4). Observando essa equação, verifica-se que o objetivo principal na calibração do sistema é a determinação da constante  $K'$ , pois as demais variáveis envolvidas são determinadas experimentalmente. A calibração do sistema visa, portanto, uma expressão matemática representativa do sistema, Equação (4.4), de acordo com as leis dos termopares, apresentadas no Capítulo III.

A curva de regressão que apresentou o melhor ajuste aos resultados da calibração do sistema é dada pela Equação (4.5). É um polinômio de 5º grau e o coeficiente de correlação  $R^2$  tem o valor de 0,9616:

A Figura 4.15 contém uma representação gráfica dos resultados da calibração do sistema termopar ferramenta-peça, colocados na forma  $(\Delta E, T_{\text{calibração}} - T_{\text{compensação}})$  e a correspondente curva de regressão de melhor ajuste obtida.

$$y = -4,929 \times 10^{13} \cdot x^5 + 1,214 \times 10^{12} \cdot x^4 - 8,688 \times 10^9 \cdot x^3 + 3,717 \times 10^6 \cdot x^2 + 1,896 \times 10^5 \cdot x - 1,797 \times 10 \quad (4.5)$$

Observa-se da Eq. (4.4) que o sistema termopar ferramenta-peça deve apresentar um comportamento linear entre  $\Delta E$  e  $T_{interface}$ . Portanto, um polinômio de 5º grau não pode, a princípio, ser usado como a curva de calibração para expressar matematicamente o comportamento desse sistema. Todavia, o polinômio na realidade representa apenas um ajuste matemático da curva *f.e.m.* e temperatura o que de fato implica que para cada faixa de temperatura obtém-se um determinado valor para a constante de calibração. Este fato é descrito mais adequadamente na próxima seção.

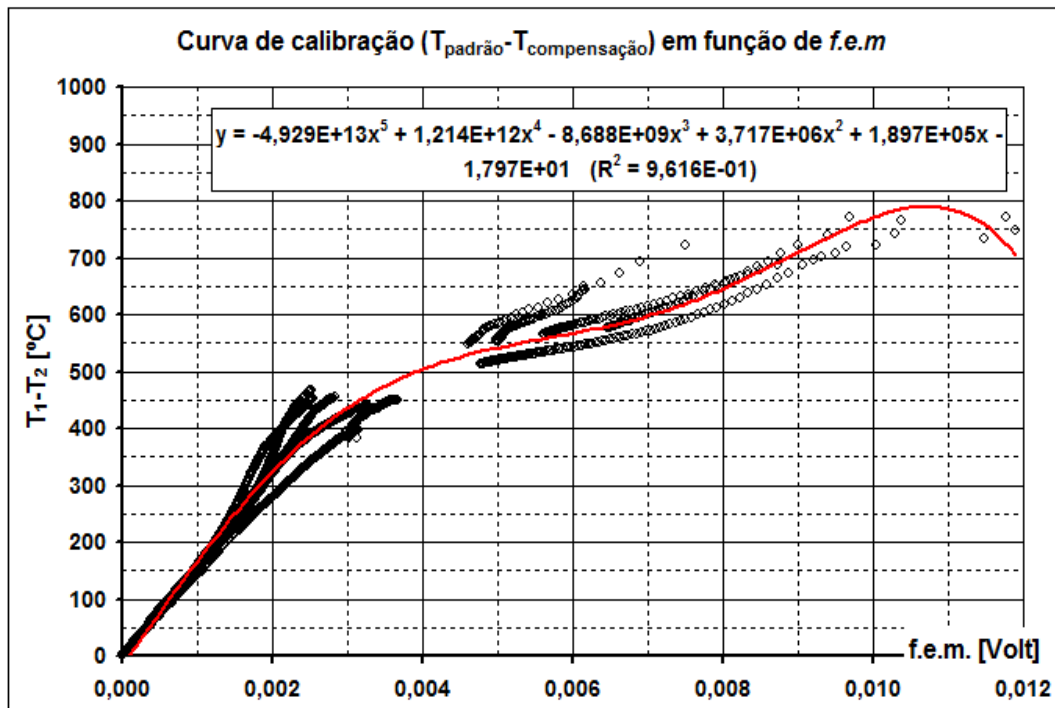


Figura 4.15 – Representação gráfica dos resultados dos ensaios de calibração e a respectiva curva de calibração de melhor ajuste.

#### 4.5.2 - Segmentação do intervalo de dados experimentais para forçar o ajuste de equações de retas nos respectivos segmentos, utilizando resultados da curva de regressão

Uma alternativa ao uso do polinômio de 5º grau como a função de correlação da calibração do sistema é a segmentação da curva desse polinômio em pequenos intervalos. A curva do polinômio é gerada com os próprios dados da calibração, ou seja, usando os valores experimentais de  $\Delta E$  para estimar  $\Delta T$  com a Eq. (4.5). Assim, em cada intervalo

dessa segmentação  $[(\Delta E_i, \Delta T_i); (\Delta E_{i+1}, \Delta T_{i+1})]$  ajusta-se uma correspondente reta de regressão análoga à Equação (4.4). Cada  $\Delta T$  calculado pelo polinômio de calibração corresponde a  $\Delta T = T_{interface} - T_{compensação}$ , onde  $T_{interface}$  é o valor da temperatura na interface a ser estimada e  $T_{compensação}$  é o valor da temperatura de compensação medida na calibração juntamente com a *f.e.m.* ( $\Delta E$ ).

Dessa forma, e usando recursos computacionais, podemos verificar a localização de cada uma das leituras experimentais  $\Delta E$  em relação a um dos intervalos  $[(\Delta E_i, \Delta T_i); (\Delta E_{i+1}, \Delta T_{i+1})]$  obtidos da segmentação da curva do polinômio de calibração. A temperatura na interface  $T_{interface}$  é, então, calculada pela equação da reta de regressão ajustada a esse intervalo, usando o valor de  $\Delta E$  em questão e a correspondente temperatura de compensação, conforme expressa a Equação (4.6).

$$T_{interface} = T_{compensação} + (\Delta E . a_i + b_i), \quad i = 1, \text{ número de segmentos} \quad (4.6)$$

onde o termo entre parênteses corresponde à reta de regressão de um dos segmentos do polinômio de calibração.

Usando-se o procedimento de segmentação do polinômio de calibração descrito acima, elaborou-se um conjunto de 98 segmentos no intervalo entre 4,0 mV e 10 mV. Apresenta-se na Figura 4.16 o gráfico dos pontos gerados com o polinômio de 5º grau resultante dessa calibração.

Na mesma figura é mostrado outro gráfico construído com as retas de regressão ajustadas aos 98 intervalos desse polinômio. O intervalo de *f.e.m.* entre 4,0 mV e 10,0 mV foi utilizado nessa análise porque contem os valores verificados nos testes experimentais.

Observa-se na Fig. 4.16 que os valores de  $(T_{calibração} - T_{compensação})$  calculados com as retas de regressão dos segmentos do polinômio de calibração se sobrepõem aos pontos produzidos pelo próprio polinômio de calibração.

#### 4.5.3 - Comparação entre os resultados das estimativas de $T_{interface}$ feitas com o polinômio de calibração e com a segmentação dos resultados desse polinômio

A Figura 4.17 mostra uma representação gráfica das diferenças entre valores de  $T_{interface}$  calculados com o polinômio de calibração e com as retas de regressão da segmentação desse polinômio.

Observa-se na Fig. 4.17 que a diferença efetiva entre os valores calculados para  $(T_{calibração} - T_{compensação})$  no intervalo de  $\Delta E$  de 4mV a 10 mV através dos dois procedimentos em questão é insignificante, apresentando a diferença máxima inferior a 0,015 °C. Verifica-

se, também, que o intervalo experimental de *f.e.m.*, compreendido entre 7,0 mV e 8,5 mV, produz diferenças absolutas máximas em torno de 0,010 °C entre os resultados dos cálculos com o polinômio e com as referidas retas dos segmentos desse polinômio. Isso comprova que ambos os métodos produzem resultados semelhantes no intervalo de *f.e.m.* verificado experimentalmente.

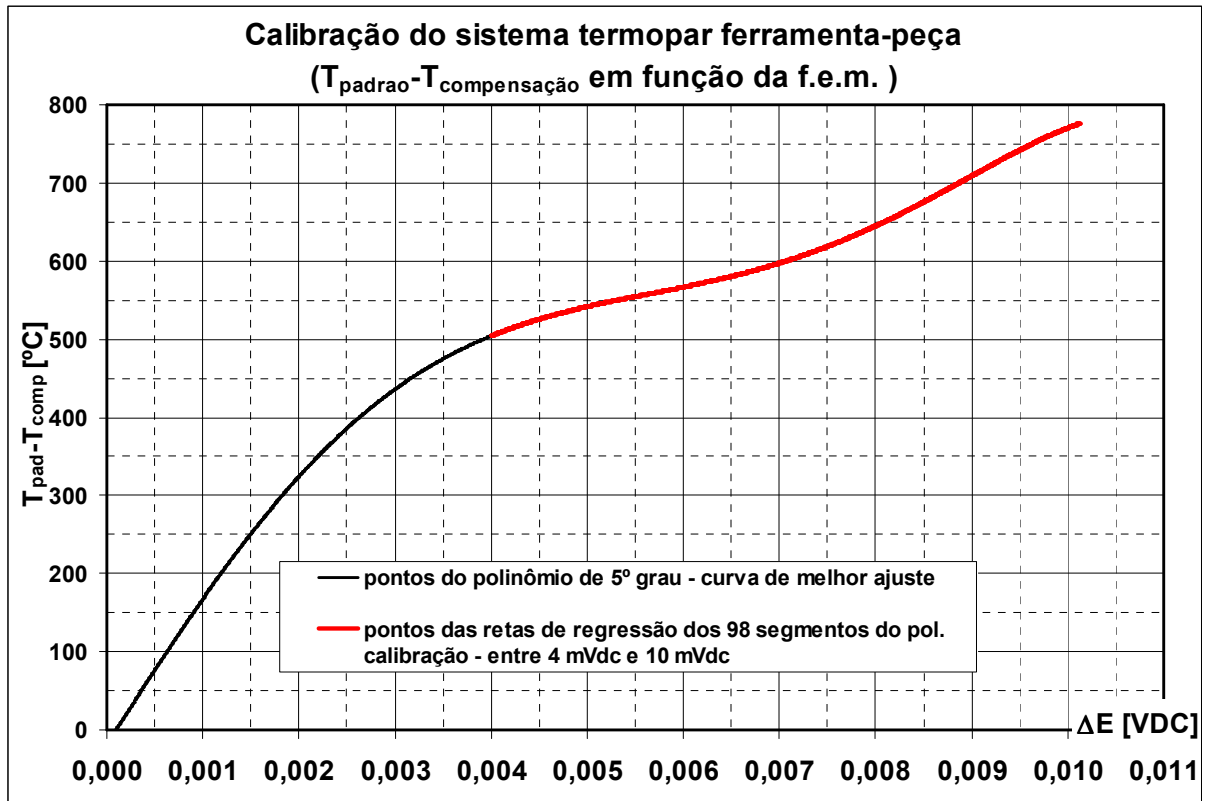


Figura 4.16 – Representação gráfica do polinômio de calibração de 5º grau e das retas de regressão ajustadas a 98 segmentos da sua curva, no intervalo entre 4,0 e 10,0 mV.

A comparação entre os valores da temperatura  $T_{\text{interface}}$  calculados através desses dois métodos de ajuste de curva de calibração, usando os dados dos experimentos feitos com os suportes de titânio, aço inoxidável, latão, alumínio e cobre, mostra que ambos proporcionam resultados idênticos. Nessa comparação, os cálculos de  $T_{\text{interface}}$  foram realizados com as Equações (4.7) e (4.8), respectivamente, correspondentes ao uso do polinômio de calibração (Eq. 4.5) e das equações das retas dos seus segmentos (Eq. 4.6).

$$T_{\text{interface}} - T_{\text{compensação}} = \sum a_i \cdot (\Delta E)^{i-1}, i = 1,6 \quad (4.7)$$

$$T_{\text{interface}} = T_{\text{compensação}} + (\Delta E \cdot a_i + b_i), i = 1, 98 \quad (4.8)$$

Na Equação (4.7), o polinômio de calibração foi usado para expressar a relação entre  $(T_{interface} - T_{compensação})$  e  $\Delta E$  e seus resultados estão representados na Figura 4.18. Na equação (4.8), a correlação entre  $(T_{interface} - T_{compensação})$  e  $\Delta E$  foi realizada através das retas de regressão do polinômio de calibração, com resultados representados na Figura 4.19.

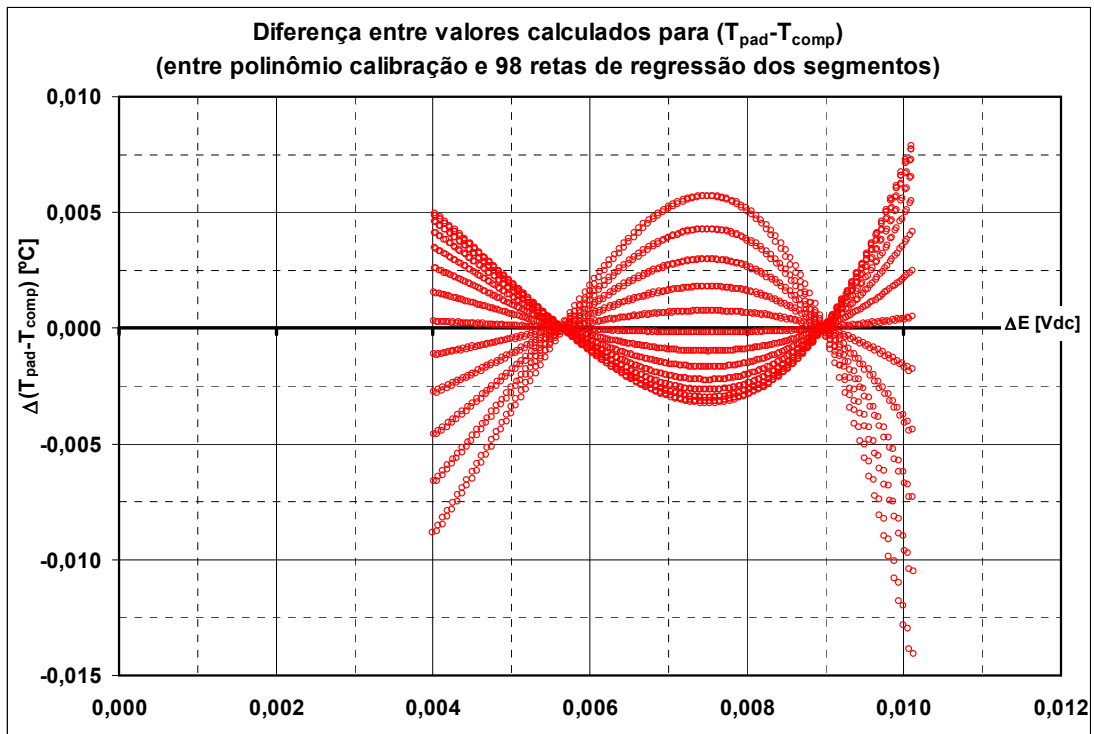


Figura 4.17 – Representação gráfica da diferença entre os valores calculados pelo polinômio de calibração e pelas retas de regressão dos seus segmentos, no intervalo 4 a 10 mV.

Observa-se nas Fig. 4.18 e Fig. 4.19 que os dois métodos em questão produzem valores idênticos para a estimativa da temperatura da interface  $T_{interface}$  a partir dos dados experimentais. Essa semelhança de resultados é enfatizada na representação gráfica da diferença entre os valores de  $T_{interface}$  calculados pelos dois métodos, mostrada na Figura 4.20.

As diferenças absolutas máximas entre os valores de  $T_{interface}$  calculados com as Equações (4.7) e (4.8), respectivamente, para todos os experimentos, são de aproximadamente 0,010 °C, como se observa na Figura 4.20. No entanto, verifica-se maior densidade de pontos representando essa diferença em torno do intervalo  $-2,5 \times 10^{-3}$  °C e 0°C, ou seja, com diferença absoluta aproximada de 0,0025 °C indicando a semelhança entre os dois métodos.

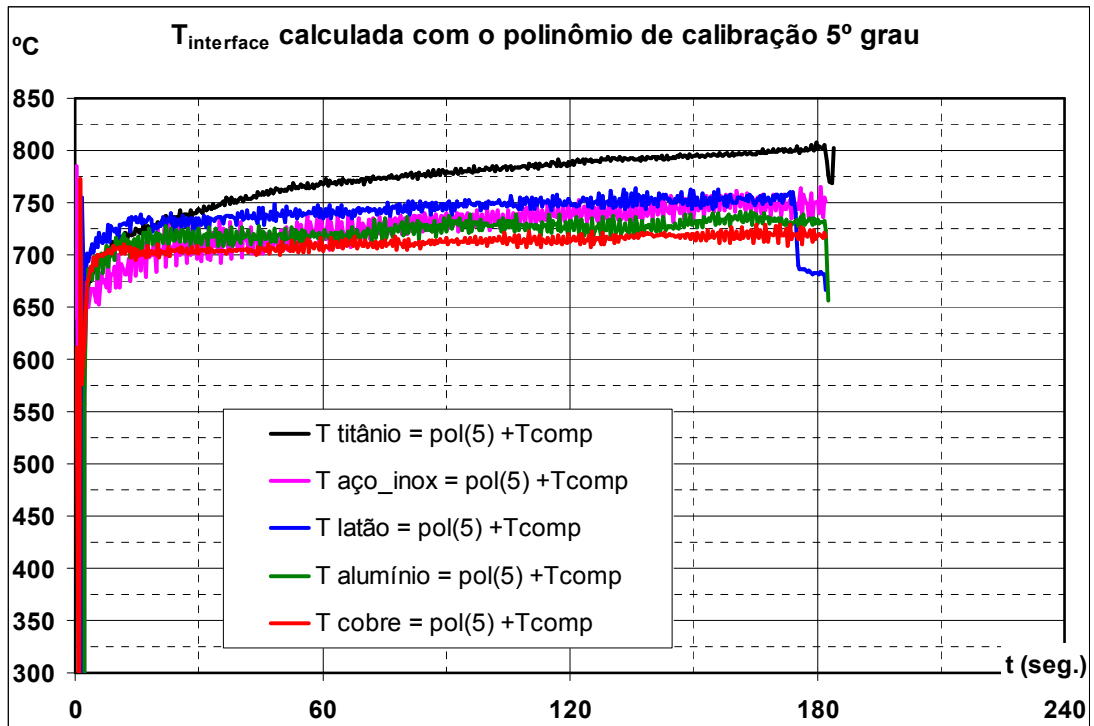


Figura 4.18 – Gráficos da temperatura na interface  $T_{interface}$  calculada com o polinômio de calibração.

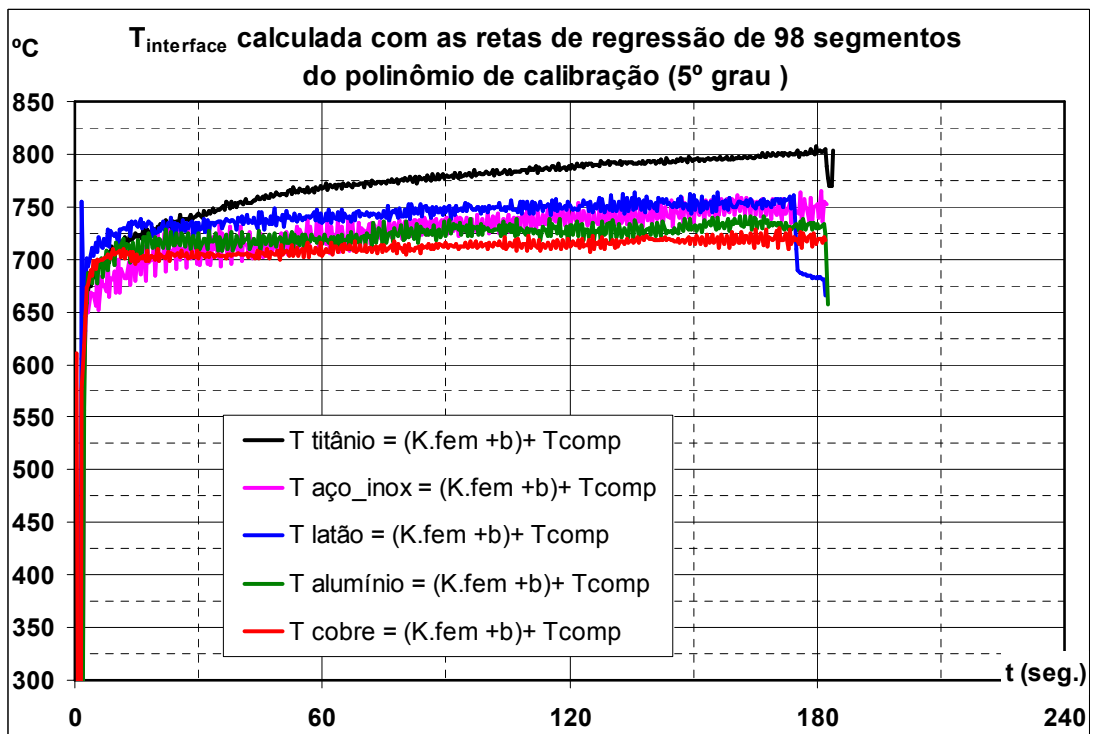


Figura 4.19 – Gráficos da temperatura na interface  $T_{interface}$  calculada com 98 segmentos do polinômio de calibração.



As diferenças absolutas máximas entre os valores de  $T_{interface}$  calculados com as Equações (4.7) e (4.8), respectivamente, para todos os experimentos, são de aproximadamente 0,010 °C, como se observa na Figura 4.20. No entanto, verifica-se maior densidade de pontos representando essa diferença em torno do intervalo  $-2,5 \times 10^{-3}$  °C e 0°C, ou seja, com diferença absoluta aproximada de 0,0025 °C indicando a semelhança entre os dois métodos.

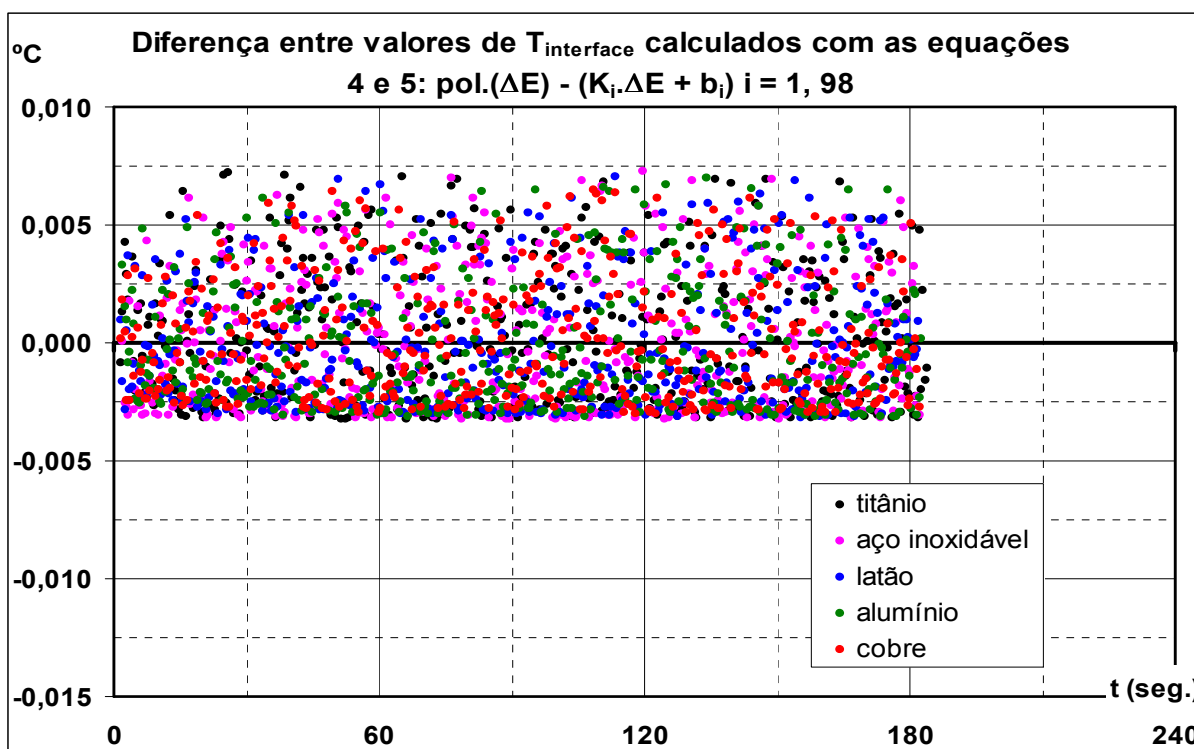


Figura 4.20 – Diferença entre os valores de  $T_{interface}$  estimados com o polinômio de calibração e com as equações lineares ajustadas aos 98 segmentos desse polinômio.

Portanto essa análise mostra que o polinômio de calibração, obtido através do ajuste com o aplicativo *Excel*®, pode ser usado como expressão da calibração do sistema termopar ferramenta-peça, como expressa genericamente a equação (4.7), pelo fato dos resultados desse polinômio e das retas de regressão (ajustadas aos segmentos do polinômio) serem numericamente idênticos.

## CAPÍTULO V

### PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram realizados no *Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem* (LEPU) da FEMEC/UFU. Os testes de usinagem foram de torneamento cilíndrico externo de ferro fundido cinzento, a seco, usando ferramentas de metal duro sem revestimento, com cada um dos portas-ferramentas fabricados em liga de titânio, aço inoxidável, latão, alumínio e cobre, cumprindo o planejamento experimental proposto. Mediram-se as temperaturas da ferramenta e do porta-ferramenta com termopares tipo T e da interface com o método termopar ferramenta-peça.

Executou-se diversos pré-testes que conduziram à determinação dos parâmetros de corte, ao posicionamento dos termopares na ferramenta e no porta-ferramenta, à opção por executar os testes com a ferramenta invertida e a modificações nos componentes e na concepção do sistema termopar ferramenta-peça.

#### 5.1 - Planejamento experimental

Um planejamento experimental adequado à realidade da pesquisa é apresentado na Tabela 5.1. Na elaboração desse planejamento considerou-se que todos os corpos de prova (CP) são fabricados em ferro fundido cinzento de uma mesma corrida de fundição e, portanto, com as mesmas características e propriedades mecânicas. Além disso, cada porta-ferramenta será submetido a cinco testes (repetições) com um mesmo corpo de prova e com a mesma instalação dos termopares. Para manter a velocidade de corte constante diante da redução do diâmetro do corpo de prova a cada ensaio, a rotação do eixo árvore da

máquina foi incrementada proporcionalmente assim como usou-se a mesma aresta de corte nos cinco testes (repetições).

O planejamento apresentado na Tabela 5.1 favorece a ocorrência de erros sistemáticos devido ao uso do mesmo corpo de prova, da mesma instalação de termopares na ferramenta e no porta-ferramenta e da mesma montagem do sistema termopar ferramenta-peça, em cada bloco de ensaios representado pelo material do porta-ferramenta. No entanto, elaborou-se esse planejamento com vistas à viabilidade da sua execução e os respectivos testes foram criteriosamente realizados para que as suas deficiências fossem minimizadas.

Tabela 5.1 – Delineamento experimental utilizado nesse trabalho.

| Portas-ferramentas                              | Repetições (réplicas) |                  |                  |                  |                  |
|---|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|   | 1 <sup>a</sup>        | 2 <sup>a</sup>   | 3 <sup>a</sup>   | 4 <sup>a</sup>   | 5 <sup>a</sup>   |
| 1 - Liga de titânio<br>(aresta de corte única)  | CP 1<br>1º passe      | CP 1<br>2º passe | CP 1<br>3º passe | CP 1<br>4º passe | CP 1<br>5º passe |
| 2 - Aço inoxidável<br>(aresta de corte única)   | CP 2<br>1º passe      | CP 2<br>2º passe | CP 2<br>3º passe | CP 2<br>4º passe | CP 2<br>5º passe |
| 3 – Latão<br>(aresta de corte única)            | CP 3<br>1º passe      | CP 3<br>2º passe | CP 3<br>3º passe | CP 3<br>4º passe | CP 3<br>5º passe |
| 4 - Liga de alumínio<br>(aresta de corte única) | CP 4<br>1º passe      | CP 4<br>2º passe | CP 4<br>3º passe | CP 4<br>4º passe | CP 4<br>5º passe |
| 5 - Cobre<br>(aresta de corte única)            | CP 5<br>1º passe      | CP 5<br>2º passe | CP 5<br>3º passe | CP 5<br>4º passe | CP 5<br>5º passe |

Os parâmetros de corte usados no trabalho foram mantidos constantes: velocidade de corte ( $v_c$ ) de 145,0 m/min, avanço ( $f$ ) de 0,121 mm/volta e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 2,00 mm. Esses parâmetros foram selecionados durante os testes preliminares realizados em um torno mecânico (*torno universal mecânico IMOR MAX II*) e foram mantidos no planejamento da Tab. 5.1. No entanto, esse planejamento foi executado em um torno eletrônico idêntico ao mostrado na Figura 5.1 (*torno universal eletrônico REVOLUTION R220*) que permite o melhor controle sobre o ajuste de  $a_p$  e, também, disponibiliza a compensação da redução do diâmetro da peça com o incremento da rotação, ajustado eletronicamente, para manter a  $v_c$  aproximadamente constante. O ponto negativo é a necessidade de corrigir a velocidade de avanço ( $v_f$ ) a cada alteração na sua rotação, para manter  $f$  constante.

A geometria de corte foi mantida idêntica entre os testes com a montagem dos portas-ferramentas em posições controladas, usando os mesmos elementos de isolamento elétrica.



Figura 5.1 – Imagem de um torno universal eletrônico, idêntico ao usado nos experimentos (torno Diplomat, modelo Revolution RV 220, potência de 5,7 kW).

## 5.2 - Equipamentos e materiais utilizados

O material usinado nos testes foi o ferro fundido cinzento da classe FC-300 segundo norma ABNT NBR 6916, fornecido pela empresa *Tupy Fundições S.A.* na forma de três barras redondas com diâmetro nominal de aproximadamente 101,4 mm (4 polegadas) provenientes da mesma corrida, cada uma com o comprimento aproximado de 2000 mm. Identificou-se cada uma dessas barras com as letras A, B e C, respectivamente, para relacionar cada corpo de prova com a sua barra original. Esses corpos de prova foram preparados conforme as dimensões em milímetros representadas na Figura 5.2.

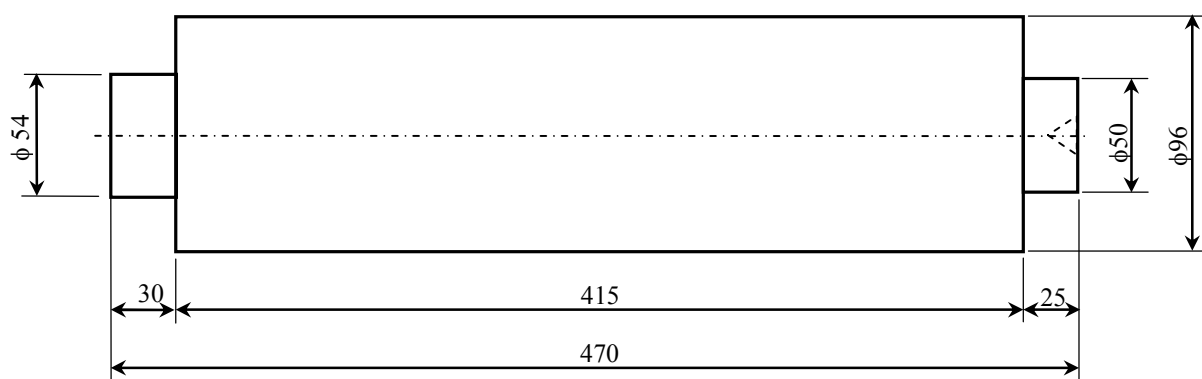


Figura 5.2 – Representação da geometria dos corpos de prova usados nos testes (cotas em mm).

O desenho da Fig. 5.2 apresenta um rebaixamento cilíndrico com diâmetro de 54 mm e comprimento de 30 mm na extremidade esquerda. Esse rebaixo foi criado para a aplicação do sistema desenvolvido para a fixação do corpo de prova pela placa do torno

com isolamento elétrica nesse local. Na extremidade à direita há outro rebaixamento cilíndrico com comprimento de 25 mm cujo objetivo é o de se evitar a interferência entre o porta-ferramenta e a contra ponta, no movimento de aproximação da ferramenta durante os preparativos dos testes.

Os testes foram realizados a seco usando-se de ferramentas de metal duro da classe K, sem revestimento e com superfície de saída plana (fabricante: *SandVik Coromant*; especificações: SNMA 12 04 08).

Os portas-ferramentas usados nos experimentos, disponibilizados pelo LTCM/FEMEC, foram fabricados sob encomenda com as seguintes características:

- 120 mm de comprimento total;
- seção transversal de 20 mm x 20 mm;
- ângulo de saída ( $\gamma_0$ ): - 6,0°;
- ângulo de folga ( $\alpha_0$ ): 6,0°;
- ângulo de posição da ferramenta ( $\chi_r$ ): 80°.

Os materiais usados na fabricação desses portas-ferramentas (liga de titânio, aço inoxidável, latão, alumínio e cobre) apresentam diferentes propriedades térmicas, sendo a mais importante nesse trabalho a condutividade térmica. Para efeito comparativo, na Tabela 5.2 mostra-se valores de condutividade térmica de materiais semelhantes aos usados na confecção dos suportes.

O método termopar ferramenta-peça foi usado para se estimar a temperatura média na interface cavaco-ferramenta. Realizou-se a calibração desse sistema com a metodologia desenvolvida nesse trabalho, conforme está descrito no Cap. III.

Tabela 5.2 – Quadro comparativo de condutividade térmica de materiais semelhantes aos utilizados na fabricação dos portas-ferramentas (GEM, 2001).

| <b>Material</b>   | <b>Condutividade térmica (W/m.K)<br/>à temperatura ambiente</b> |
|---|---|
| <b>liga de titânio (Ti-5Al-2,5Sn)</b>                     | <b>8</b>  |
| <b>titânio 99,0%</b>                                      | <b>18</b>   |
| <b>aço inoxidável (AISI 304)</b>                          | <b>16 (a 100 °C)</b>  |
| <b>aço inoxidável (AISI 314)</b>                          | <b>18 (a 100 °C)</b>  |
| <b>latão para cartucho (<i>cartridge brass</i>, 70 %)</b> | <b>121</b>  |
| <b>latão vermelho (<i>red brass</i>, 85 %)</b>            | <b>159</b>  |
| <b>alumínio (AA 1100)</b>                                 | <b>222</b>  |
| <b>alumínio (AA 2011)</b>                                 | <b>151</b>  |
| <b>alumínio (AA 6061)</b>                                 | <b>172</b>  |
| <b>cobre puro</b>   | <b>394</b>  |

As temperaturas na ferramenta de corte e no porta-ferramenta foram medidas com fios termopares tipo *T* soldados em posições pré-estabelecidas nos mesmos. Na Figura 5.3 ilustra-se as posições de instalação desses termopares.

Modificou-se uma contra ponta rotativa convencional para seu isolamento elétrico do corpo da máquina, através do revestimento do seu *cone Morse* com pintura eletrostática a base de resina epóxi (FIOCHI et al., 2008) e para permitir a continuidade do circuito elétrico do termopar ferramenta-peça com a inclusão de mancal de mercúrio no seu interior (ALVELID, 1970). A opção por executar tais modificações se deve à busca pela melhor sustentação do corpo de prova durante a usinagem, associando a rigidez de uma contra ponta convencional com o sistema de fixação da peça pela placa do torno, desenvolvido no trabalho.

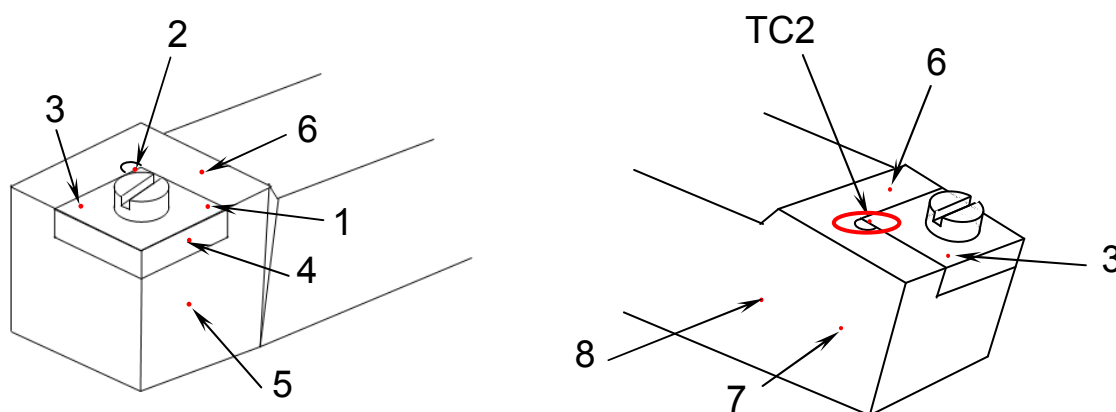


Figura 5.3 – Ilustração das posições dos termopares na ferramenta de corte (1, 2, 3 e 4), no porta-ferramenta (5, 6, 7 e 8) e da conexão do elemento de compensação física (círculo em vermelho).

A isolamento do corpo de prova em relação às castanhas da placa do torno foi realizada com o uso de uma cinta de *lixa ferro* envolvendo o rebaixo executado para a sua fixação pela placa (diâmetro de 54 mm, Figura 5.2). Uma bucha elástica de aço (que contém um corte longitudinal) foi colocada externamente a essa cinta de lixa para receber o aperto das castanhas da placa. Assim, manteve-se a integridade da cinta de lixa e, simultaneamente, a rígida fixação do corpo de prova. Um disco dessa mesma lixa foi usado para isolar o encosto do corpo de prova contra as três castanhas da placa do torno na direção do avanço, como está ilustrado no Cap. III, na Figura 3.19.

A eficiência do uso de *lixa ferro* na isolamento elétrica do sistema termopar ferramenta-peça foi verificada com testes de continuidade elétrica entre o corpo de prova e a massa do torno usando-se de um *voltímetro* digital. Esses testes também foram realizados durante os

ensaios de calibração e serviram para confirmaram a efetividade dessa aplicação na isolamento elétrica do sistema.

A propriedade isolante dessas lixas ferro se deve a sua estrutura. Elas são constituídas em tecido do tipo *pano lonita* e têm uma das faces recoberta com grãos de material abrasivo, *óxido de alumínio*, que são colados com resina sobre cola (*disponível em: <<http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?6666660Zjcf6IVs6EVs66s7p3COrrrrQ->>*; acesso em: 26/02/2013).

Um sistema de aquisição de dados (*Agilent® modelo 36970A*) comandado por um microcomputador através do software específico (*Agilent BenchLink Data Logger*) foi usado para adquirir os sinais dos termopares tipo T e da *f.e.m.* do termopar ferramenta-peça.

Um sistema de medição por imagem composto de microscópio ótico (*estéreo microscópio Olympus, modelo Evolution LC Color SZ6145TR*) equipado com uma câmera digital e usando o software de análise de imagens (*Image-Pro Express 5.1*) foi utilizado nas medições das posições efetivas dos termopares do portas-ferramentas e das suas respectivas ferramentas, além da medição da área de contato cavaco-ferramenta.

### 5.3 - Metodologia experimental

Basicamente, o procedimento experimental é composto por duas etapas distintas: (1) a preparação do porta-ferramenta a ser analisado e; (2) a realização dos seus respectivos experimentos. No entanto, os preparativos dos dispositivos usados nos experimentos e dos corpos de prova, os melhoramentos no sistema termopar ferramenta peça e o desenvolvimento da metodologia para a sua calibração foram igualmente importantes neste trabalho.

Na etapa da preparação para realizar os testes, destaca-se a instalação dos termopares *tipo T* na ferramenta e no porta-ferramenta. Na etapa da realização dos testes, são importantes as verificações da manutenção da isolamento do corpo de prova e da ferramenta para a aplicação do método termopar ferramenta-peça, do estado de conservação da aresta de corte e da manutenção da fixação dos termopares.

A preparação dos portas-ferramentas para seus testes consiste da marcação das posições de instalação dos termopares na ferramenta e no porta-ferramenta, da montagem da isolamento elétrica do porta-ferramenta, da preparação das juntas de medição em cada um dos termopares e da instalação dos mesmos na ferramenta e no porta-ferramenta. As posições de instalação dos termopares foram marcadas com um instrumento *traçador*

*calibrador* de altura em uma mesa de desempenho. Foram instalados quatro termopares na ferramenta e no porta-ferramenta, respectivamente, como foi ilustrado na Figura 5.4.

Efetuuou-se a instalação dos termopares através da soldagem das suas juntas de medição, preparadas previamente, nas suas respectivas posições da ferramenta e do porta-ferramenta usando-se um dispositivo de solda por descarga capacitiva. Um reforço com adesivo epóxi (*Araudite*®) foi utilizado para melhorar a fixação de cada termopar e evitar o rompimento da solda durante os experimentos. Observa-se na Figura 5.4 o reforço com esse adesivo sobre as soldas dos termopares e a isolamento elétrica do porta-ferramenta com placas de *Celeron*® (espessura de 3,2 mm).

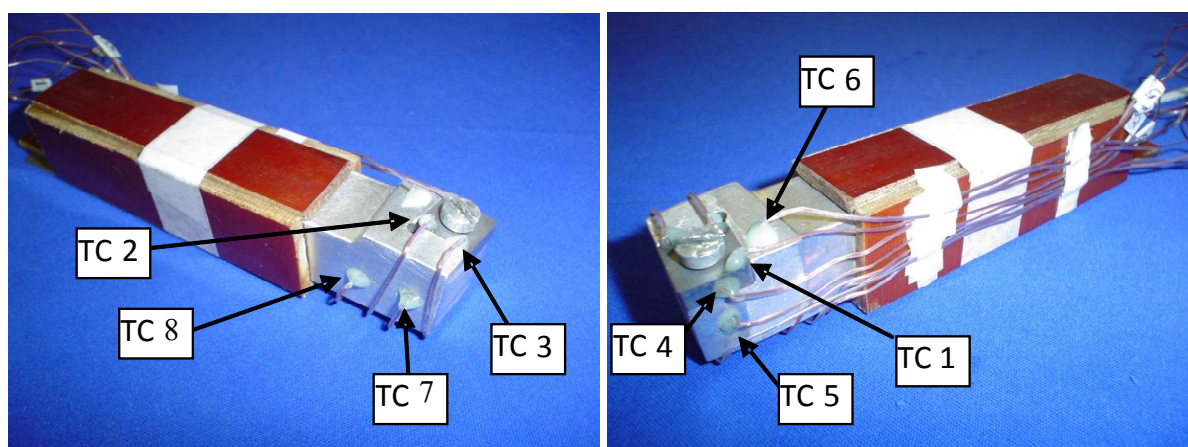


Figura 5.4 – Foto ilustrativa do porta-ferramenta de alumínio (com isolamento de *Celeron*®) contendo quatro termopares (TC) instalados na ferramenta (TC<sub>1</sub>, TC<sub>2</sub>, TC<sub>3</sub> e TC<sub>4</sub>) e no porta-ferramenta (TC<sub>5</sub>, TC<sub>6</sub>, TC<sub>7</sub> e TC<sub>8</sub>).

Os corpos de prova foram montados no torno com isolamento elétrica em relação à massa da máquina para a utilização do método termopar ferramenta-peça. Para isso, efetuou-se essa isolamento com um elemento isolante (lixa ferro) colocado entre as castanhas da placa do torno e o corpo de prova e através do revestimento isolante (tinta à base epóxi) do *cone Morse* da contra ponta. Uma bucha de aço ajustada sobre a cinta de lixa ferro efetivou a fixação do corpo de prova pela placa do torno. Essa aplicação da bucha de aço e a isolamento elétrica com elementos de lixa ferro estão ilustradas na Fig. 5.5.

Os maiores esforços para a realização deste trabalho se concentraram na aplicação do método termopar ferramenta-peça devido às dificuldades verificadas durante a sua configuração tanto na concepção e construção de alguns dos seus componentes quanto no desenvolvimento da metodologia de calibração do mesmo.

Realizou-se os testes de acordo com o planejamento experimental proposto na Tabela 5.1, embora tenham ocorrido alterações nas quantidades realizadas com dois dos



portas-ferramentas. Executou-se cinco testes com os portas-ferramentas de latão, alumínio e aço inoxidável, 15 com o porta-ferramenta de titânio (usando-se três corpos de prova e três ferramentas de corte) e nove testes com o porta-ferramenta de cobre (dois corpos de prova e duas ferramentas de corte).

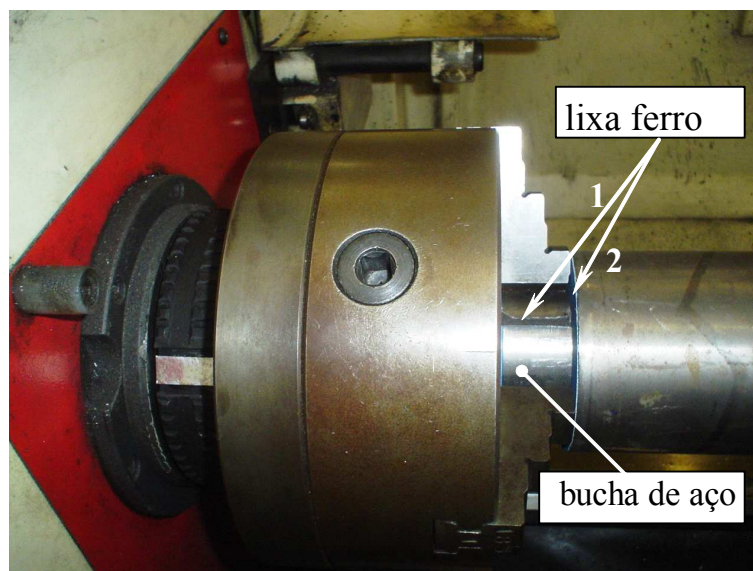


Figura 5.5 – Ilustração da fixação do corpo de prova pela placa do torno com bucha de aço elástica e da aplicação de elementos de lixa ferro para a isolamento elétrica.

As repetições executadas, além daquelas previstas no planejamento, foram necessárias devido às distorções na *f.e.m.* medida do termopar ferramenta-peça em relação a resultados de testes preliminares feitos com o suporte de titânio. Esses pré-testes foram desenvolvidos para se avaliar as modificações efetuadas nesse sistema (inclusão do elemento de compensação física e modificações na contra ponta). Usou-se os mesmos valores dos parâmetros de corte nesses testes e nos pré-testes. Assim, os experimentos com o suporte de titânio foram executados enquanto a fonte dessas distorções era investigada, sem a interrupção do planejamento proposto, estendendo-se muito além do previsto.

Como as distorções foram verificadas nos resultados da *f.e.m.*, todos os elementos que compõem o sistema termopar ferramenta-peça foram revisados e alguns melhoramentos foram executados para o aumento da rigidez mecânica dos componentes e para garantir o contínuo contato elétrico entre os elementos do termopar ferramenta-peça.

Outra modificação foi o uso de usinagem com a ferramenta invertida, como ilustra a Figura 5.6b. Na posição convencional, como se observa na Figura 5.6a, há o acúmulo de cavacos sobre a ferramenta de corte e sobre o porta-ferramenta que podem distorcer os

resultados das medições de temperatura devido ao calor que transportam logo após serem removidos da peça.

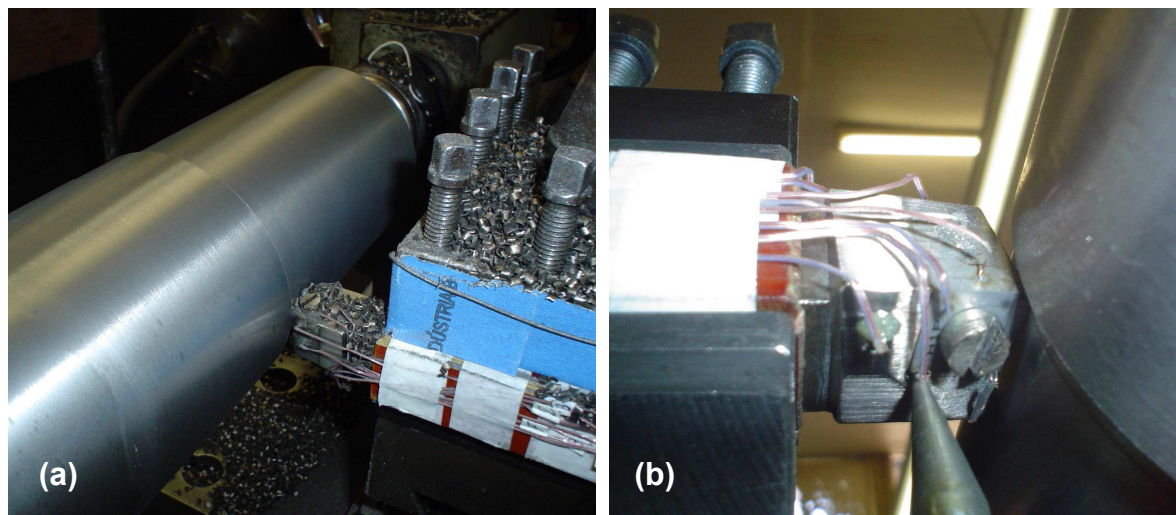


Figura 5.6 – Fotos ilustrativas da ferramenta de corte na posição convencional (a); e invertida com a superfície de saída voltada para baixo (b).

A execução de cada ensaio seguiu um roteiro adotado na tentativa de reduzir a ocorrência de erros aleatórios. Após a montagem do sistema (instalação dos termopares na ferramenta e no suporte, montagem do corpo de prova e do suporte adequadamente isolados e configuração do sistema de aquisição de dados) adotou-se a seguinte seqüência de ações:

1. torneamento superficial para ajuste do diâmetro inicial do corpo de prova;
2. medição do diâmetro inicial;
3. ajuste da profundidade de corte  $a_p = 2,00$  mm;
4. cálculo da rotação para produzir  $v_c = 145,0$  m/min;
5. acionamento do torno à rotação calculada em (4); medição da rotação efetiva, em vazio, com um tacômetro digital (mínimo de 3 medições e cálculo da rotação média);
6. cálculo da rotação corrigida, usando a rotação efetiva média obtida em (5) com uma rotina desenvolvida com o aplicativo *Excel*® durante a realização dos pré-testes,
7. cálculo da velocidade de avanço ( $v_f$ ) para conduzir a  $f = 0,121$  mm/volta com a rotação corrigida em (5);
8. ajuste da rotação e de  $v_f$  no painel do torno, usando os valores obtidos em (6) e (7), respectivamente;
9. cálculo do percurso de avanço  $L_f$ , considerando o tempo de usinagem de 180 segundos;

10. pressionamento da ferramenta contra a peça (fechando o circuito) e aquisição inicial por período mínimo de 15 segundos; armazenamento do arquivo inicial para o teste em questão;
11. verificação dos sinais dos termopares da ferramenta e do porta-ferramenta e do sinal do termopar ferramenta-peça (no caso de alguma irregularidade, o teste é interrompido para se efetuar as correções);
12. posicionamento da ferramenta a aproximadamente 2,5 mm para o início do corte;
13. ajuste do percurso de avanço adicionando-se 5 mm ao valor obtido em (9);
14. acionamento do torno e disparo da aquisição;
15. acionamento do avanço automático;
16. medições de rotação e realização de fotos, vídeos; monitoramento do percurso de avanço instantâneo no painel do torno;
17. interrupção da usinagem antes de a ferramenta atingir o percurso de usinagem ajustado em (12), aproximadamente, a 2 mm ou 3 mm antes de se completar o  $L_f$ .
18. manutenção da ferramenta em contato e do sistema em aquisição durante um período indeterminado do resfriamento do sistema;
19. interrupção da aquisição e armazenamento do arquivo correspondente ao teste realizado;
20. elaboração dos gráficos para verificação.

Como já visto, o Capítulo IV apresenta os procedimentos usados no desenvolvimento do método para a calibração de todo o sistema, usando-se o próprio aparato experimental de execução dos testes.

## **CAPÍTULO VI**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesse estudo, os experimentos foram executados de forma idêntica sob as mesmas condições de corte, onde o único fator variável foi o material do porta-ferramenta. Considera-se por mesmas condições de corte: parâmetros e geometria de corte, ferramenta, material da peça, percurso de avanço, usinagem a seco.

Os ensaios foram realizados com cinco porta-ferramentas idênticos, mas fabricados com materiais diferentes. As temperaturas superficiais medidas com termopares do tipo T e a temperatura na interface ferramenta/cavaco estimada através do Método Termopar Ferramenta-peça.

#### **6.1 - Considerações iniciais**

A geração de calor durante a usinagem ocorre na região de formação do cavaco, com a conversão da energia mecânica em energia térmica nas três regiões de deformação plástica: a zona de cisalhamento primária, a zona de cisalhamento secundária e a zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. Na zona de cisalhamento secundária, em condições de aderência, ocorre intensa deformação plástica do material do cavaco e isso consome a maior parte do trabalho mecânico necessário ao cisalhamento no processo de corte (MACHADO et.al., 2011). A energia necessária para a realização deste trabalho é praticamente toda convertida em calor e, assim, imediatamente após o início do corte na usinagem, há elevação significativa da temperatura da ferramenta na região do contato ferramenta/cavaco. Se as condições de corte forem mantidas constantes durante o processo, essa região pode representar uma fonte estável de calor o qual flui para a ferramenta após o início da usinagem. Portanto, naturalmente ocorre um gradiente de

temperatura no volume de material da ferramenta o qual depende da duração de usinagem, das propriedades térmicas do sistema (ferramenta e porta-ferramenta) e das condições do meio ambiente. Esse gradiente de temperatura é causado por fenômenos naturais de transferência de calor, ou seja, por radiação térmica entre a ferramenta, peça, cavaco e vizinhança, por convecção de calor entre ferramenta e o meio ambiente e, principalmente, por condução de calor entre as superfícies em contato da ferramenta e do porta-ferramenta.

Neste estudo, obtiveram-se diferentes gradientes de temperatura na ferramenta durante a execução dos ensaios com o uso de cinco suportes geometricamente idênticos, porém, fabricados com materiais caracterizados por condutividades térmicas diferentes. Os materiais usados nessa aplicação foram: uma liga de titânio, o aço inoxidável, o latão, o alumínio puro e o cobre eletrolítico e são similares aos materiais apresentados na Tabela 5.2, no Capítulo V. Os resultados mostram que a condutividade térmica do material determina a taxa de transferência de calor da ferramenta para o suporte e, conseqüentemente, exerce grande influência na distribuição de temperatura na ferramenta.

Todos os ensaios foram realizados sob condições de corte idênticas (como já mencionado), em ambiente fechado (sem correntes de ar ou circulação forçada), com isolamento térmica do porta-ferramenta, em usinagem a seco e usando uma montagem com a ferramenta na posição invertida, ou seja, com a superfície de saída voltada para baixo visando a evitar o acúmulo de cavacos sobre a ferramenta e porta-ferramenta (o que representaria uma fonte de calor aleatória no sistema). Cada porta-ferramenta foi submetido a cinco testes e os valores médios dos parâmetros de corte - velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) e seus respectivos desvios padrão são apresentados Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores médios e respectivos desvios padrão da velocidade de corte ( $v_c$ ), do avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) experimentais.

| ensaio                    | Parâmetros de corte - valores médios |                  |                        |                  |            |                  |
|---------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------|------------------|
|                           | $v_c$<br>(m/min)                     | desvio<br>padrão | avanço $f$<br>(mm/rot) | desvio<br>padrão | $a_p$ (mm) | desvio<br>padrão |
| titânio (5 testes)        | 144,98                               | 0,22             | 0,122                  | 2,07E-04         | 2,030      | 0,054            |
| aço inoxidável (5 testes) | 145,05                               | 0,10             | 0,121                  | 6,83E-04         | 1,988      | 0,025            |
| latão (5 testes)          | 144,86                               | 0,12             | 0,121                  | 2,49E-03         | 1,975      | 0,025            |
| alumínio (5 testes)       | 145,02                               | 0,11             | 0,122                  | 4,92E-04         | 1,955      | 0,011            |
| cobre A (5 testes)        | 145,01                               | 0,10             | 0,122                  | 5,45E-04         | 1,985      | 0,014            |

Os valores médios e os desvios padrão mostrados nessa tabela indicam que o controle sobre esses parâmetros foi satisfatório para atender a proposta do trabalho. As posições de medição das temperaturas na ferramenta e no suporte estão ilustradas na Figura 6.1.

Embora a distribuição das temperaturas na ferramenta e no porta-ferramenta em cada experimento possa ser relacionada a um *gradiente de temperatura*, em geral, o texto faz referência a essas temperaturas usando expressões como *temperaturas na ferramenta* ou *temperaturas no suporte* ou *no porta-ferramenta*. A denominação dos materiais dos porta-ferramentas é usada para referenciar os resultados dos seus respectivos testes ou discussões relacionadas a eles, por exemplo, “*ensaios – titânio*” ou “*temperaturas da ferramenta do suporte de titânio*”.

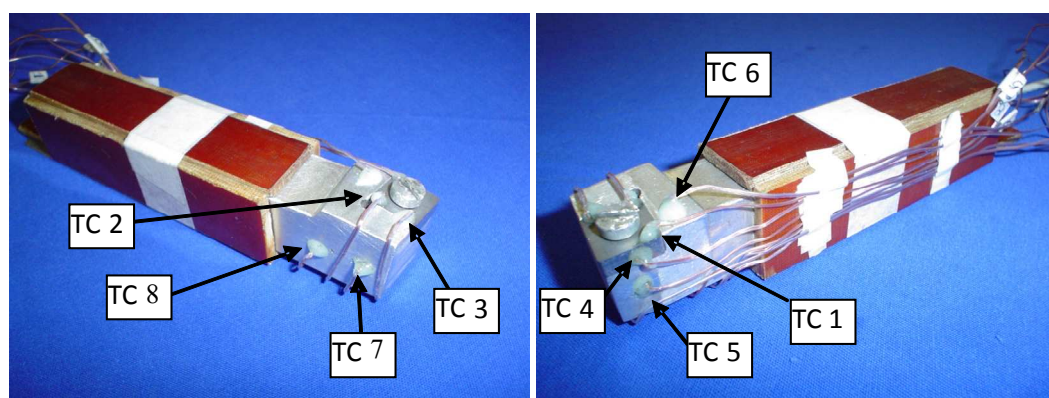


Figura 6.1 – Foto ilustrativa do porta-ferramenta de alumínio (com isolamento de *Celeron*®) contendo quatro termopares (TC) instalados na ferramenta (TC<sub>1</sub>, TC<sub>2</sub>, TC<sub>3</sub> e TC<sub>4</sub>) e no porta-ferramenta (TC<sub>5</sub>, TC<sub>6</sub>, TC<sub>7</sub> e TC<sub>8</sub>).

A seguir, apresentam-se os resultados das temperaturas medidas nos experimentos nas posições pré-determinadas das superfícies da ferramenta e do suporte e a temperatura na interface ferramenta/cavaco. A análise desses resultados mostram que o material do porta-ferramenta exerce influência sobre as temperaturas da ferramenta e do suporte, mas que não afetam significativamente as temperaturas na interface.

## 6.2 - Temperaturas superficiais nos porta-ferramentas e nas respectivas ferramentas de corte

Os resultados das medições das temperaturas no inserto e no porta-ferramenta estão representados pelas médias das réplicas dos experimentos executados nos ensaios (suportes de titânio, aço inoxidável, latão, alumínio e cobre). Na Figura 6.1 apresentou-se a distribuição das posições de medição das temperaturas na ferramenta (termopares TC<sub>1</sub>, TC<sub>2</sub>, TC<sub>3</sub> e TC<sub>4</sub>) e no respectivo porta-ferramenta (termopares TC<sub>5</sub>, TC<sub>6</sub>, TC<sub>7</sub> e TC<sub>8</sub>). As médias dessas temperaturas, agrupadas segundo cada suporte, estão representadas em



gráficos nas Figuras 6.2 a 6.6, respectivamente. Esses gráficos foram elaborados em função do tempo de usinagem, onde o intervalo de aquisição médio foi de 0,417 de segundo.

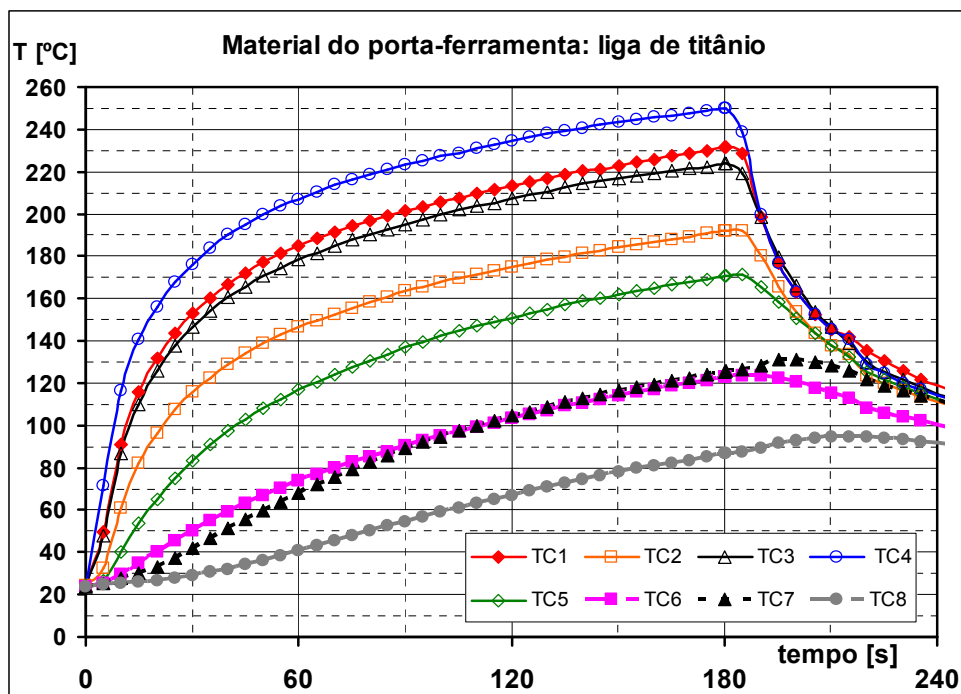


Figura 6.2 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de titânio: TC<sub>1</sub> a TC<sub>4</sub> - ferramenta de corte; TC<sub>5</sub> a TC<sub>8</sub> - porta-ferramenta.

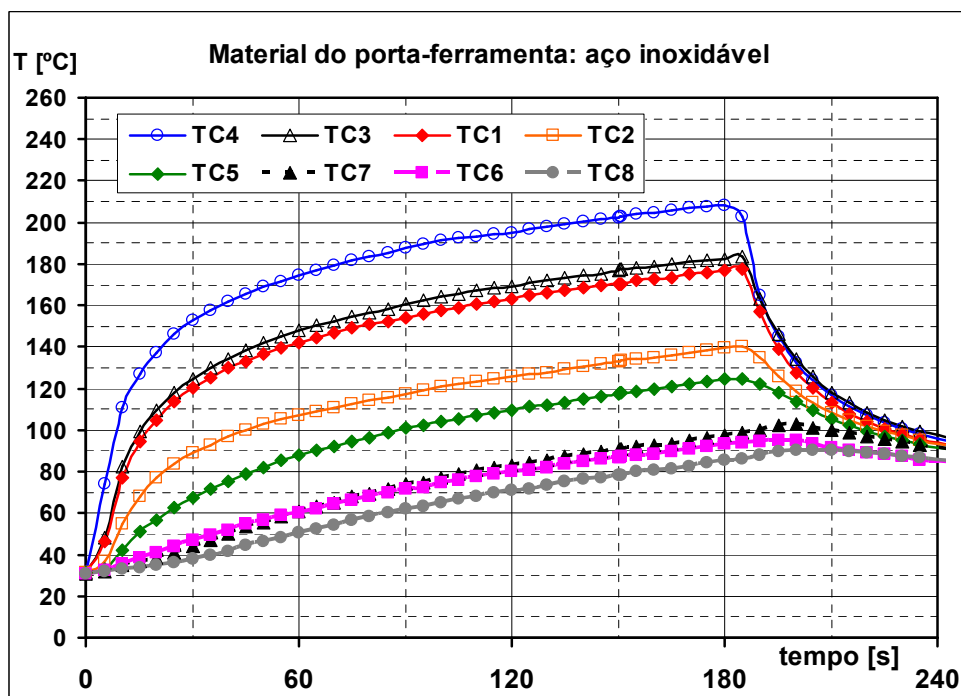


Figura 6.3 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de aço inoxidável: TC<sub>1</sub> a TC<sub>4</sub> - ferramenta de corte; TC<sub>5</sub> a TC<sub>8</sub> - porta-ferramenta.

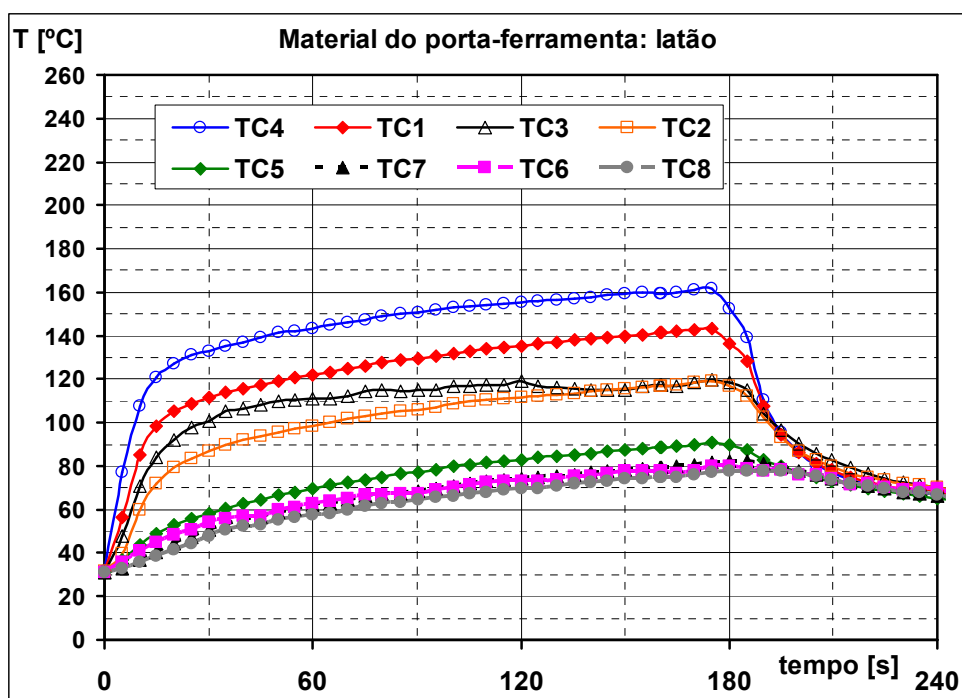


Figura 6.4 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de latão: ferramenta - TC<sub>1</sub> a TC<sub>4</sub>; porta-ferramenta: TC<sub>5</sub> a TC<sub>8</sub>.

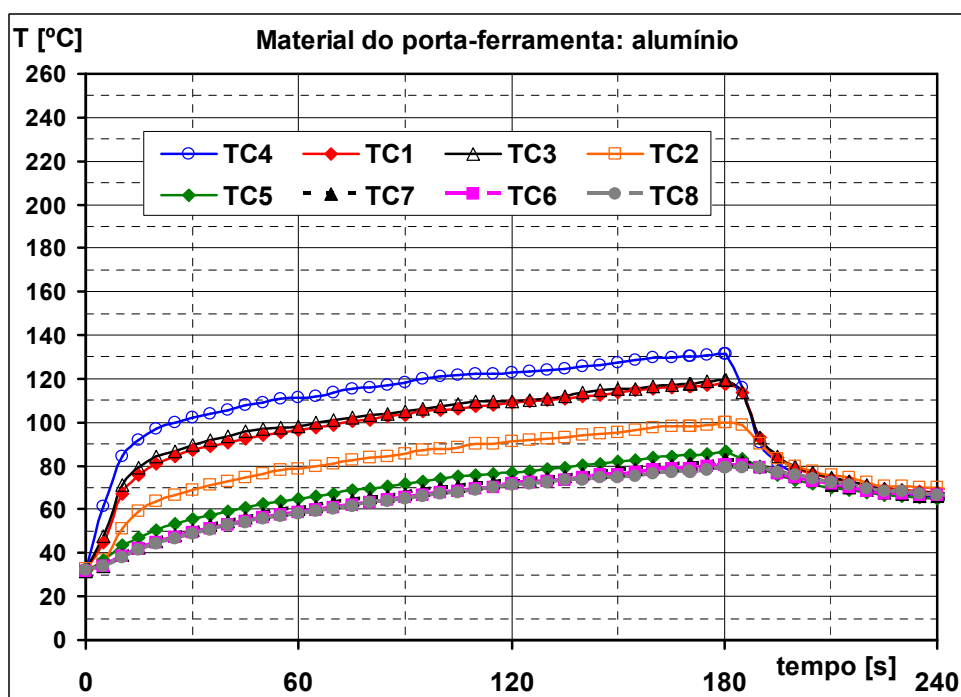


Figura 6.5 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de alumínio: ferramenta - TC<sub>1</sub> a TC<sub>4</sub>; porta-ferramenta: TC<sub>5</sub> a TC<sub>8</sub>.



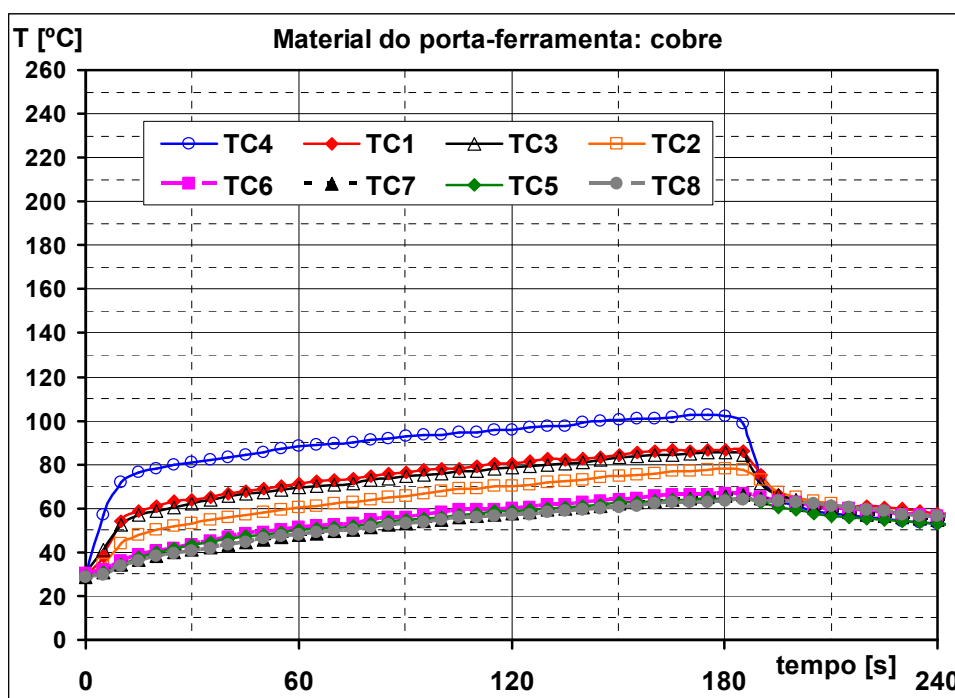


Figura 6.6 - Temperaturas médias superficiais dos ensaios com suporte de cobre: ferramenta - TC<sub>1</sub> a TC<sub>4</sub>; porta-ferramenta: TC<sub>5</sub> a TC<sub>8</sub>.

Nas Figuras 6.2 a 6.6, verifica-se que, independente do porta-ferramenta usado, as temperaturas na ferramenta são mais elevadas do que as temperaturas no porta-ferramenta. Isso corresponde à expectativa, pois a geração de calor acontece na ferramenta, na área de contato ferramenta/cavaco. De modo geral, verifica-se que as temperaturas da ferramenta têm o seguinte comportamento: temperatura do TC<sub>4</sub> > temperatura do TC<sub>1</sub>  $\cong$  TC<sub>3</sub> > temperatura do TC<sub>2</sub>. A posição 4 foi determinada no ponto médio da superfície principal de folga do inserto e é a posição mais próxima da região de corte dentre as demais posições escolhidas na ferramenta, o que justifica a sua temperatura ser a mais elevada dentre todas. A posição 2, localizada próximo ao vértice da diagonal da face superior da ferramenta, oposto à ponta de corte, é a posição mais distante da região de corte e apresenta a menor das temperaturas medidas na ferramenta. As posições 1 e 3 foram estabelecidas sobre a outra diagonal da face livre da ferramenta em pontos mutuamente opostos e, assim, as suas distâncias em relação à ponta de corte são linearmente aproximadas. No entanto, a posição 1 é quase paralela à aresta de corte enquanto que a posição 3 é aproximadamente perpendicular a ela. Isso torna a posição 1 mais próxima da região de corte do que a posição 3, pois a maior dimensão da área de contato ferramenta/cavaco ocorre ao longo da aresta de corte, com um comprimento próximo ao valor da profundidade de corte  $a_p$ , 2,00 mm para a geometria de corte usada, enquanto na direção perpendicular à essa aresta, a dimensão da área de contato está na ordem de grandeza do avanço  $f$ , que nos ensaios foi

estabelecido em 0,121 mm/volta. A Figura 6.7 ilustra o posicionamento dos termopares 1 e 3 da ferramenta e permite visualizar a presença da área de contato ferramenta/cavaco, em destaque na circunferência. Verificou-se, portanto, que as temperaturas na ferramenta dependem da posição de medição em relação à ponta de corte e que, a despeito do material do suporte usado aqui, o padrão de distribuição dessas temperaturas é mantido.

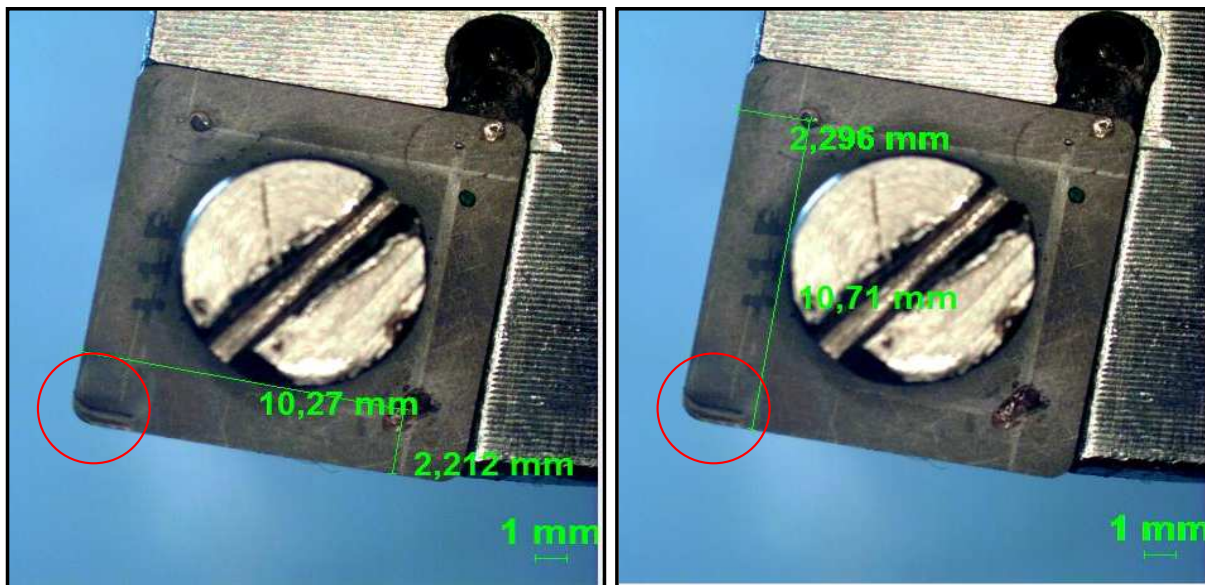


Figura 6.7 – Imagens do suporte de aço inoxidável, com destaque para a ferramenta e o posicionamento dos termopares nº 1 (a) e nº 3 (b).

Quanto ao comportamento das temperaturas nos porta-ferramentas, observa-se nas Figuras 6.2 e 6.3 que as temperaturas dos suportes de titânio e de aço inoxidável seguem o seguinte comportamento nítido: temperatura  $TC_5 > \text{temperatura } TC_7 \cong \text{temperatura } TC_6 > \text{temperatura } TC_8$ . A princípio, considerando as posições de medição pré-determinadas, essa é a distribuição de temperatura esperada para o suporte. Observa-se na Fig. 6.1 que a posição 5, apresentando a temperatura mais elevada, localiza-se na superfície principal de folga do suporte e é a mais próxima da área de contato ferramenta/cavaco. A posição 6 e a posição 7, apesar de estarem em superfícies diferentes do suporte, estão a distâncias semelhantes da ponta de corte, sendo que o  $TC_6$  está mais próximo da ferramenta do que o  $TC_7$ , embora a projeção da área do contato ferramenta/suporte na direção do  $TC_7$  seja maior do que na direção do  $TC_6$ . Verifica-se nas Figuras 6.2 a 6.6 que as temperaturas dos  $TC_6$  e  $TC_7$  são mutuamente semelhantes em todos os ensaios. A posição 8 é a mais afastada da zona de corte e apresenta a menor das temperaturas do suporte, em todos os ensaios.

O padrão de distribuição das temperaturas dos suportes observado para o titânio e

aço inoxidável é alterado com os suportes de latão, alumínio e cobre, Figuras 6.4, 6.5 e 6.6, respectivamente. Com os suportes de latão e de alumínio verifica-se  $TC_5 > TC_6 \cong TC_7 \cong TC_8$ . Para o suporte de cobre verifica-se  $TC_5 \cong TC_6 \cong TC_7 \cong TC_8$ . Assim, esses resultados mostram que as temperaturas na superfície do suporte dependem da sua posição de medição, indicando um gradiente de temperatura. Porém, dependendo do material do suporte, a diferença entre os valores dessas temperaturas pode tornar-se insignificante, reduzindo bastante o seu gradiente, como observado no suporte de cobre.

Considerando que as propriedades térmicas dos materiais dos suportes possam ser representadas pela condutividade térmica dos materiais apresentados na Tabela 5.2, os resultados apresentados mostram-se coerentes. Como a geração de calor em usinagem ocorre na interface ferramenta/cavaco, na ponta de corte, ocorre um gradiente de temperatura na ferramenta que se estende para o suporte, principalmente devido à taxa de transferência de calor por condução, na usinagem a seco. Se o material do suporte apresenta significativa condutividade térmica, o calor se dissipa com mais rapidez no seu material. Em consequência, há menor acúmulo de energia térmica no seu interior porque à medida que esse calor é conduzido da ferramenta para o suporte, há a transferência de calor entre as suas superfícies externas para o ar, por radiação e convecção. Assim, para a mesma taxa de geração de calor na interface, considerando os mesmos parâmetros de corte, as temperaturas da ferramenta são mais baixas devido à maior taxa de transferência de calor através do suporte. Por outro lado, se o material do suporte apresenta baixa condutividade térmica, a taxa de transferência de calor no seu meio é menor o que provoca o acúmulo de energia térmica, considerando que a geração de calor na ferramenta é constante. Esse acúmulo de calor no material do suporte reduz a sua correspondente taxa de transferência da ferramenta para o suporte, acarretando no acúmulo de calor na ferramenta. Por isso, as temperaturas nesse suporte e na respectiva ferramenta são mais elevadas.

As Figuras 6.8 e 6.9 mostram as representações das médias das temperaturas na ferramenta e nos suportes, respectivamente, agrupadas conforme a posição de medição. Podemos observar na Figura 6.8 que a temperatura mais elevada na ferramenta de corte é verificada na posição do  $TC_4$  nos ensaios com o porta-ferramenta de titânio. Na mesma posição, a menor temperatura foi obtida nos ensaios com o suporte de cobre. A curva das temperaturas do termopar  $TC_3$  dos testes com o suporte de latão indica que houve avaria na sua instalação, pois não se observou o rompimento da sua solda durante os ensaios. Na Figura 6.9 observa-se que as temperaturas médias mais elevadas ocorrem no porta-ferramenta de titânio e que as temperaturas mais baixas dentre todos os porta-ferramentas foram obtidas com o suporte de cobre.

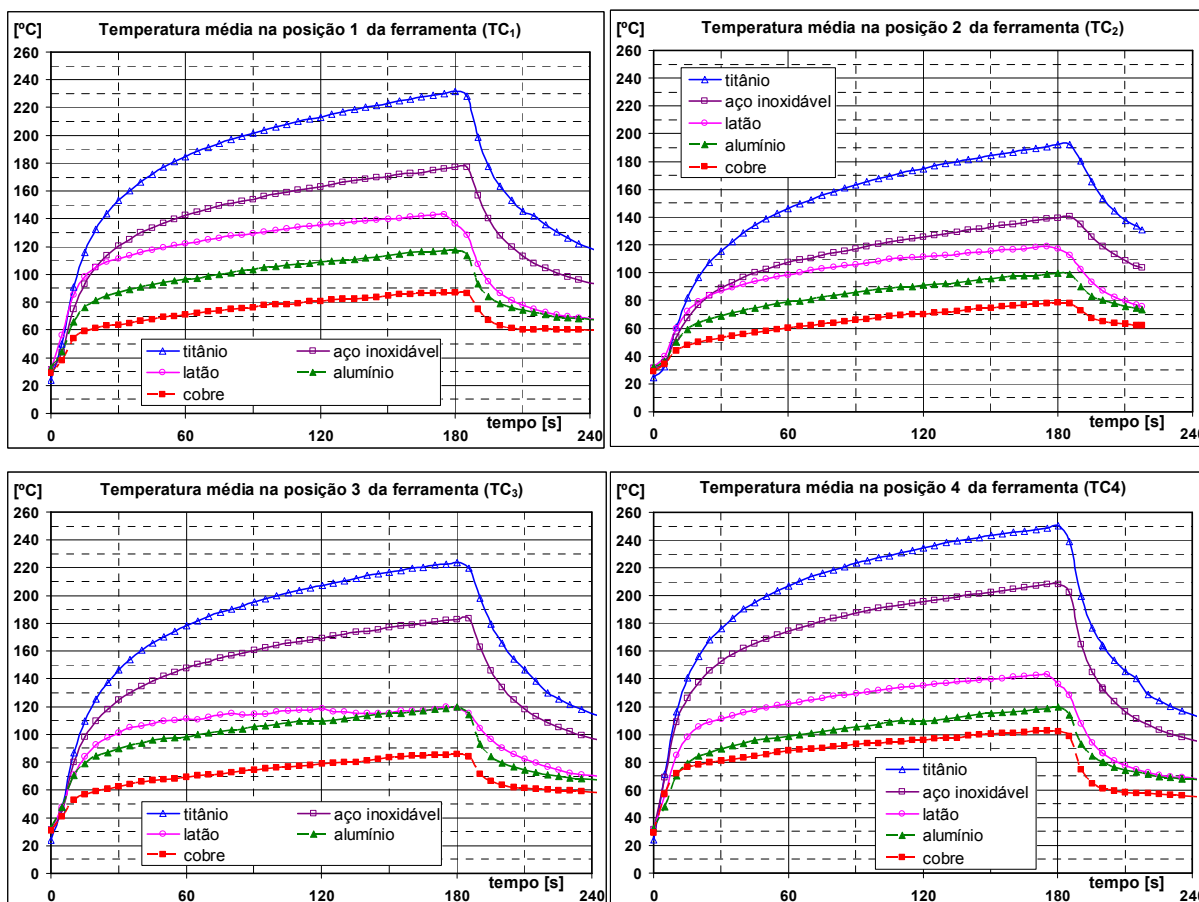


Figura 6.8 – Temperaturas médias em quatro posições da ferramenta, em função do tempo.

Observa-se, nas Figuras 6.2 a 6.6 que a interrupção do aquecimento, provocada pela interrupção da usinagem, é verificada nos gráficos das temperaturas da ferramenta (TC<sub>1</sub> a TC<sub>4</sub>) quase simultaneamente, porém isso não ocorre nos gráficos das temperaturas dos suportes (TC<sub>5</sub> a TC<sub>8</sub>). Observando-se os gráficos das temperaturas do TC<sub>4</sub> da ferramenta e do TC<sub>5</sub> do suporte que essa interrupção é simultânea para ambas, sem exceção nos ensaios, pode-se usá-las como referência. Verifica-se, assim, que as temperaturas na ferramenta não apresentam retardamento significativo para a resolução utilizada nos gráficos, enquanto que isso é nítido nos resultados dos suportes. Ampliando essa análise, nos gráficos da Figura 6.9 vê-se que o tempo de resposta das temperaturas dos suportes de titânio, principalmente dos pontos 7 e 8, tem valores maiores do que nos demais suportes, o que é observado no início do ensaio e no seu final, com a interrupção do teste. O suporte de aço inoxidável mostra um comportamento desse tempo de resposta próximo do suporte de titânio, com maior retardamento do que é observado nos respectivos gráficos dos suportes de latão, alumínio e cobre. Tais comportamentos, distintos, estão relacionados às velocidades de propagação do calor no material do suporte, associada à sua difusividade térmica, pois as posições 7 e 8 estão localizadas na face oposta à superfície principal de

folga nos suportes, como está ilustrado na Figura 6.1, e, portanto, a temperatura nesses pontos depende da quantidade de calor que se propaga através do material do porta-ferramenta e da velocidade dessa propagação.

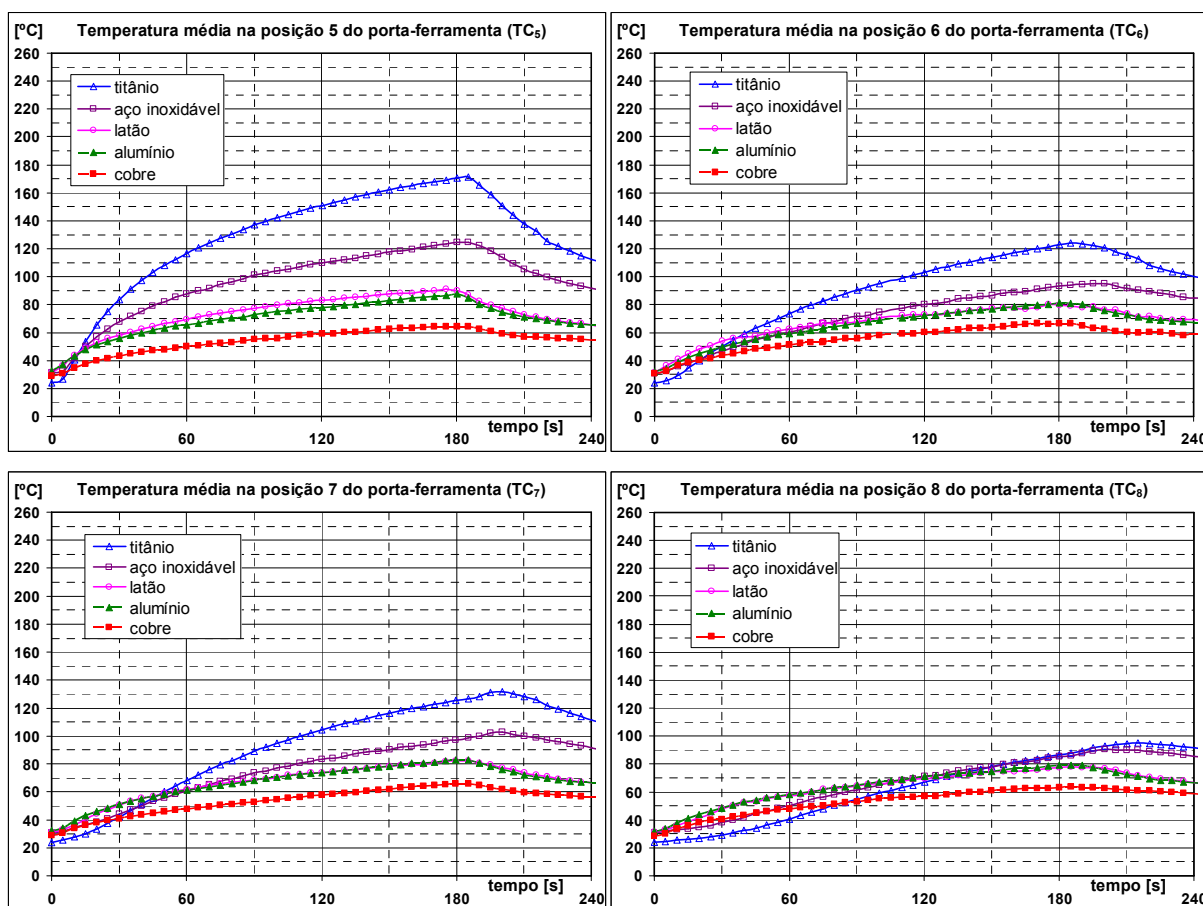


Figura 6.9 – Temperaturas médias em quatro posições no suporte, em função do tempo.

Os resultados apresentados nas Figuras 6.8 e 6.9 ressaltam as diferenças nas temperaturas medidas no inserto e no porta-ferramenta. Além de realçar as diferenças entre os tempos de resposta, atribuída à difusividade térmica dos materiais dos suportes, permite sugerir a ocorrência de grandes diferenças de temperatura nas superfícies de contato entre a ferramenta e o suporte, nos casos dos materiais de baixa condutividade térmica. Para isso, comparam-se as temperaturas dos pontos 1 e 4 da ferramenta e 6 e 5 do suporte, respectivamente, nos ensaios de titânio e cobre. Os pontos 1 e 6 e 4 e 5 são localizados mais próximos e estão na mesma superfície como mostrado na Figura 6.1. Verifica-se que, para o suporte de titânio, as temperaturas médias dos pontos 1 e 6 atingem próximo a 235 °C e 125 °C (diferença de 110°C) enquanto nos pontos 4 e 5 atingem 250 °C e 170°C (diferença de 80 °C), respectivamente. Entretanto, as temperaturas na ferramenta deste ensaio foram de 190 °C, na posição 2, e de 235 °C, na posição 3, observando que há o elemento de compensação física (componente de ferro fundido cinzento) instalado na

posição 2 e, portanto, atuando como uma aleta. Então, as diferenças de temperatura na ferramenta entre as posições 1 e 4 ou entre 3 e 4, estão em torno de 15 °C (entre as posições 2 e 4, é de aproximadamente 60 °C). Para o suporte de cobre, as temperaturas médias dos pontos 1 e 6 correspondem a 85 °C e 70 °C (diferença de 15 °C); nos pontos 4 e 5 são de 100 °C e 65 °C (diferença de 35 °C), respectivamente. Nos pontos 2 e 3 da ferramenta, as temperaturas correspondem a aproximadamente 80 °C e 85° C, respectivamente. As diferenças entre as temperaturas na ferramenta entre 1 e 4 ou entre 3 e 4, estão em torno de 15 °C (entre 2 e 4, é próxima de 20 °C). Observa-se, do fato da temperaturas da ferramenta do ensaio de titânio serem muito mais elevadas do que as correspondentes temperaturas do ensaio de cobre, o que acontece, também, com as temperaturas desses suportes, que isso pode estar relacionado à condutividade térmica desses materiais. A baixa condutividade térmica do material do suporte representa uma barreira ao fluxo de calor da ferramenta para o suporte, provocando o armazenamento desse calor na ferramenta. O elevado potencial térmico da ferramenta, criado nessa situação, em combinação com a taxa de transferência de calor configurada pelas características do sistema, determinam a temperatura da ferramenta e do suporte. Por outro lado, um material com condutividade térmica elevada oferece baixa resistência térmica ao fluxo de calor. Assim, o calor gerado na ferramenta flui mais facilmente entre esta e o suporte a uma taxa suficiente para não provocar o seu aquecimento. De fato, podemos verificar nas Figuras 6.8 e 6.9 e na Tabela 5.2 que as temperaturas médias mais elevadas, tanto do suporte quanto do inserto do mesmo ensaio, correspondem aos materiais que apresentam as menores condutividades térmicas, o titânio e o aço inoxidável. Ou o contrário, que o material com a condutividade térmica mais elevada, o cobre, proporcionou as menores temperaturas médias.

Nos experimentos deste trabalho, como as condições de corte foram mantidas constantes (Tabela 6.1) assim como os demais parâmetros usados, o calor gerado na interface cavaco-ferramenta deve ser semelhante em todos os ensaios. Além disso, os suportes são geometricamente idênticos e foram usados com a mesma isolamento térmica. Portanto, a capacidade térmica de cada suporte é determinada somente pelas propriedades do seu material.

### 6.3 - Temperatura na interface ferramenta/cavaco

As temperaturas na interface ferramenta/cavaco ( $T_{interface}$ ) foram obtidas indiretamente através do método termopar ferramenta peça, usando-se o sistema

apresentado no Capítulo III e foram estimadas através da função de correlação determinada na calibração desse sistema, apresentada no Capítulo IV. Mostrou-se que essa função de correlação, expressa pela Equação (4.6), representa o comportamento da temperatura na interface como função da força eletromotriz térmica e da temperatura de compensação física ( $T_{compensação}$ ), medidas experimentalmente.

Na Figura 6.10 apresentam-se os resultados obtidos para a temperatura na interface ferramenta/cavaco. Os valores correspondentes representam as médias aritméticas das temperaturas estimativas nos experimentos realizados com cada um dos suportes.

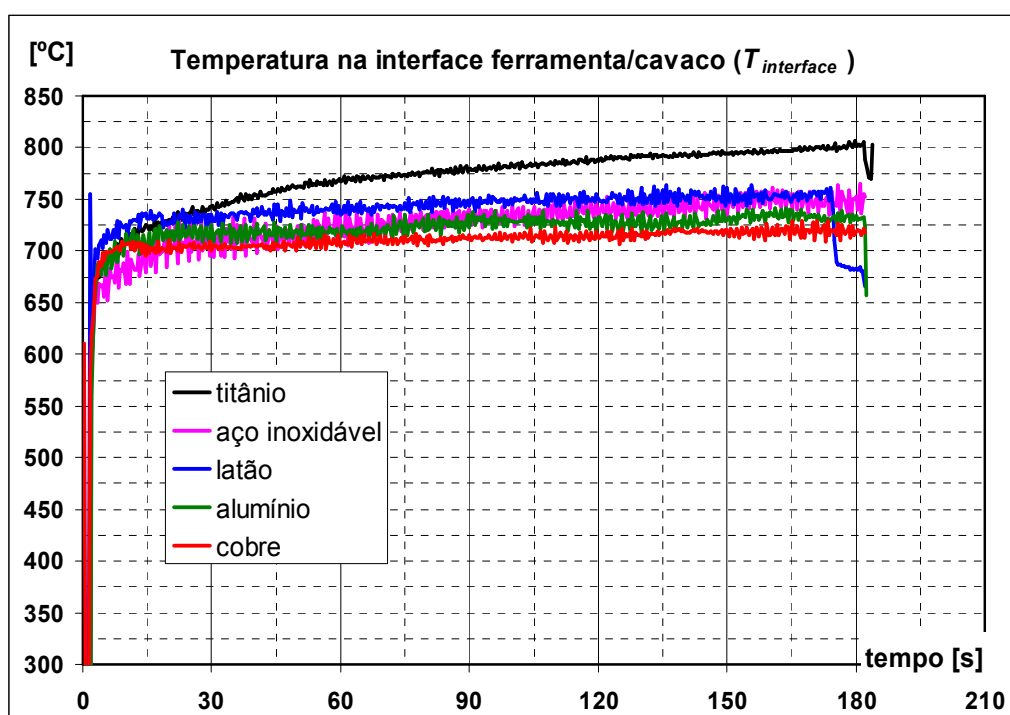


Figura 6.10 - Representação gráfica das médias das estimativas da temperatura na interface  $T_{interface}$  dos ensaios com os suportes de titânio, aço inoxidável, latão, alumínio e cobre.

Os resultados mostram que a utilização de suportes feitos de materiais com diferentes condutividades térmicas, o que altera as respectivas taxas de condução de calor entre os materiais do suporte e a ferramenta, exerce um efeito pouco significativo sobre a temperatura na interface ferramenta/cavaco. Ao contrário, essas alterações provocaram grandes variações nas temperaturas da superfície da ferramenta e do respectivo suporte, como visto na seção 6.2.

Pode-se verificar que os valores médios encontrados para  $T_{interface}$  dos ensaios com os suportes de cobre, alumínio, latão e aço inoxidável atingiram entre 725  $^{\circ}\text{C}$  e 750  $^{\circ}\text{C}$ , após 180 segundos de usinagem. No ensaio com o suporte de titânio, essa temperatura alcançou



um valor médio próximo a 800 °C no mesmo período. Esses resultados representam valores de temperatura na interface ferramenta/cavaco que são condizentes com o torneamento de ferro fundido cinzento para as condições de corte utilizadas ( $v_c$ : 145 m/min;  $f$ : 0,121 mm/volta;  $a_p$ : 2,00 mm). Nessas condições, a área de contato ferramenta/cavaco contém material aderido, como está mostrado nas Figuras 6.11 e 6.12, sugerindo formação de zona de aderência durante o corte.

Na Figura 6.11 apresentam-se imagens das ferramentas usadas com os suportes de cobre e aço inoxidável, respectivamente, feitas em microscópio óptico, mostrando a aderência de material na área de contato ferramenta/cavaco. Na Figura 6.12, apresenta-se imagens feitas em MEV da ferramenta usada no suporte de titânio. Observa-se, nessa figura, a presença de material aderido na região de contato e na superfície principal de folga da ferramenta utilizada nos ensaios com o suporte de titânio. De forma geral, a análise as ferramentas em microscópio óptico, mostrou que houve adesão no contato ferramenta/cavaco em todos os ensaios.

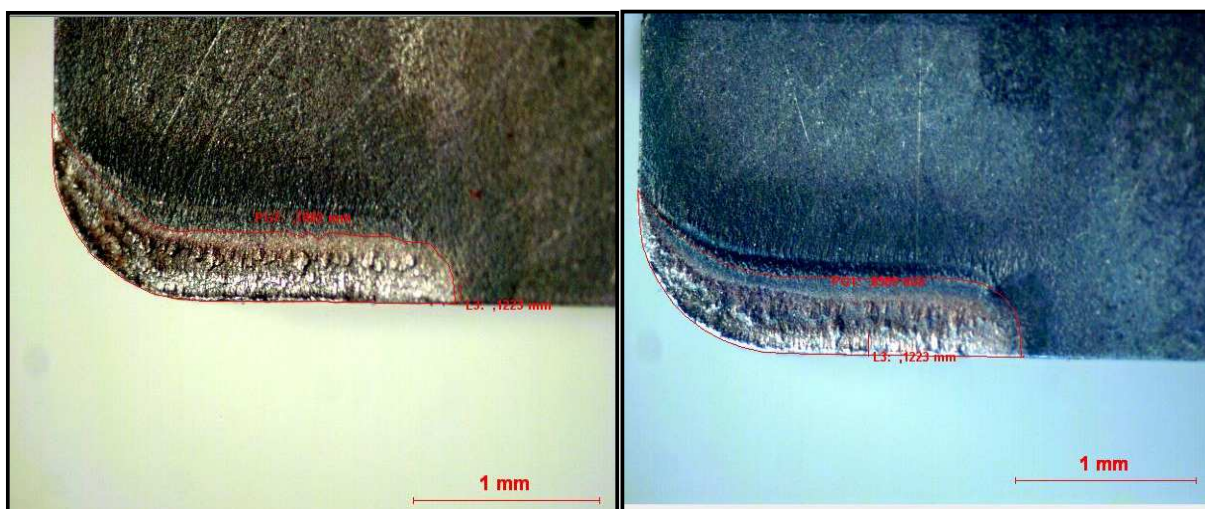


Figura 6.11 - Reprodução de fotografias obtidas em microscópio óptico, das áreas de contato das ferramentas usadas com o suporte cobre (a) e com o suporte de titânio (b).

A presença da zona de aderência é uma indicação da ocorrência de temperaturas elevadas na interface ferramenta/cavaco devido à intensa geração de calor naquela região durante a formação do cavaco (TRENT, 1984). Assim, a verificação de aderência de material nas áreas de contato das ferramentas usadas nesse trabalho, gerou a expectativa da obtenção de altas temperaturas  $T_{interface}$  das estimativas com a curva de calibração (Eq. 4.6), o que foi comprovado com os resultados obtidos.



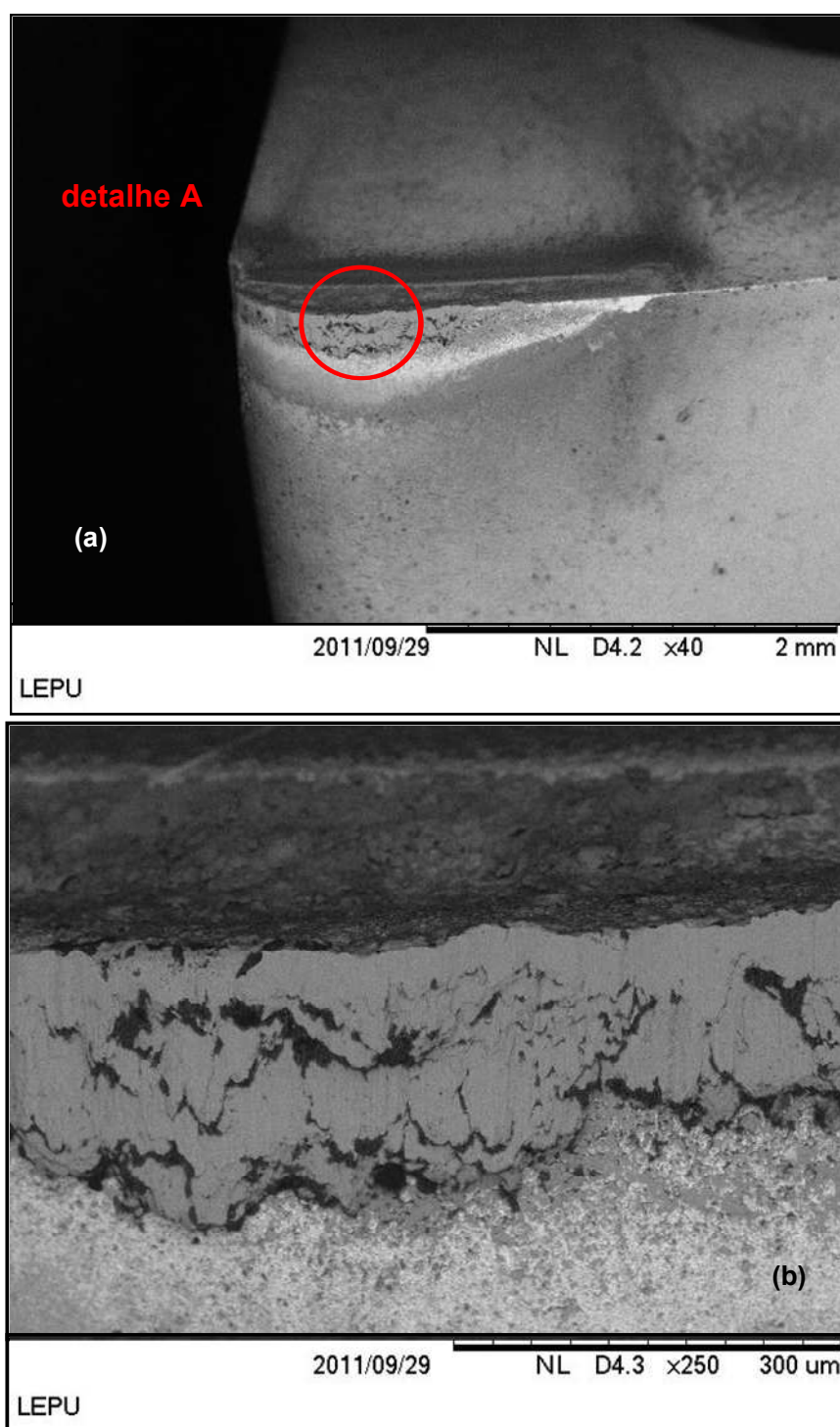


Figura 6.12 - Reprodução de imagens obtidas em MEV de uma ferramenta usada nos experimentos com o suporte de titânio: (a) aresta de corte; (b) imagem ampliada da aresta de corte - *Detalhe A*.

Na Figura 6.10 foram apresentados os resultados das estimativas de  $T_{interface}$  em função do tempo de usinagem. Verifica-se nessa figura que houve uma pequena elevação dessa temperatura no decorrer dos experimentos, cuja duração média foi de 180 segundos.

Além disso, observa-se que as curvas de  $T_{interface}$  com os suportes de cobre, alumínio e latão têm perfis semelhantes e valores aproximados entre si. Já os perfis de  $T_{interface}$  dos ensaios com os suportes de aço inoxidável e titânio têm comportamentos também semelhantes entre si, com diferenças nítidas em relação aos demais, além de apresentarem diferenças numéricas mais significativas.

Esses dois grupos de comportamentos distintos são visualizados com mais nitidez separando-se as curvas de  $T_{interface}$  dos ensaios com suportes de cobre, alumínio e latão das respectivas curvas dos suportes de aço inoxidável e titânio, como mostram as Figuras 6.13 e 6.14, respectivamente.

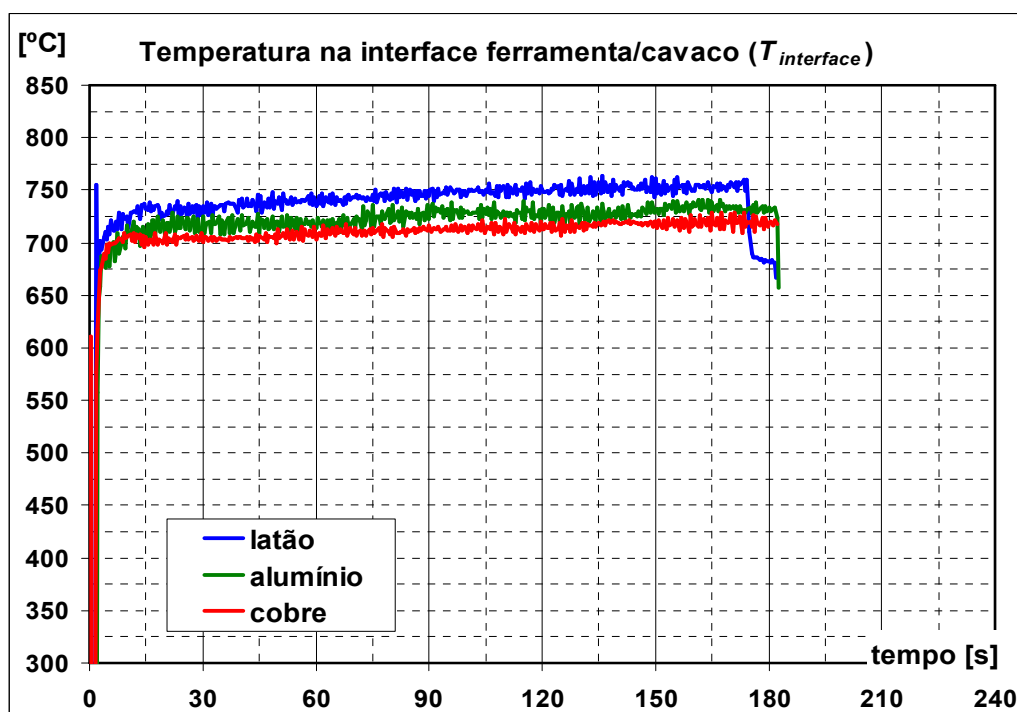


Figura 6.13 - Representação gráfica das médias das estimativas da temperatura na interface  $T_{interface}$  dos ensaios com os suportes de latão, de alumínio e de cobre.

Nas Figuras 6.13 e 6.14, pode-se observar que, de modo geral,  $T_{interface}$  se eleva bruscamente ao iniciar o corte, passando a um comportamento que sugere ser linearmente proporcional no restante da usinagem, principalmente, nos ensaios dos suportes de cobre, alumínio e latão. Na Figura 6.13 verifica-se que a temperatura  $T_{interface}$  dos suportes desses materiais sofreu uma elevação de aproximadamente 25  $^{\circ}$ C, no intervalo de 165 segundos considerados após o instante de 15 s. No mesmo período, a temperatura  $T_{interface}$  do suporte de aço inoxidável variou em aproximadamente 50  $^{\circ}$ C enquanto que no ensaio do suporte de titânio, a variação aproximada foi de 75  $^{\circ}$ C, como se observa na Figura 6.14. Pode-se

constatar, portanto, que a elevação dessa temperatura verificada durante um intervalo de 165 s de usinagem é relativamente pequena em comparação com valores dessa temperatura no instante 15 s, no início do corte.

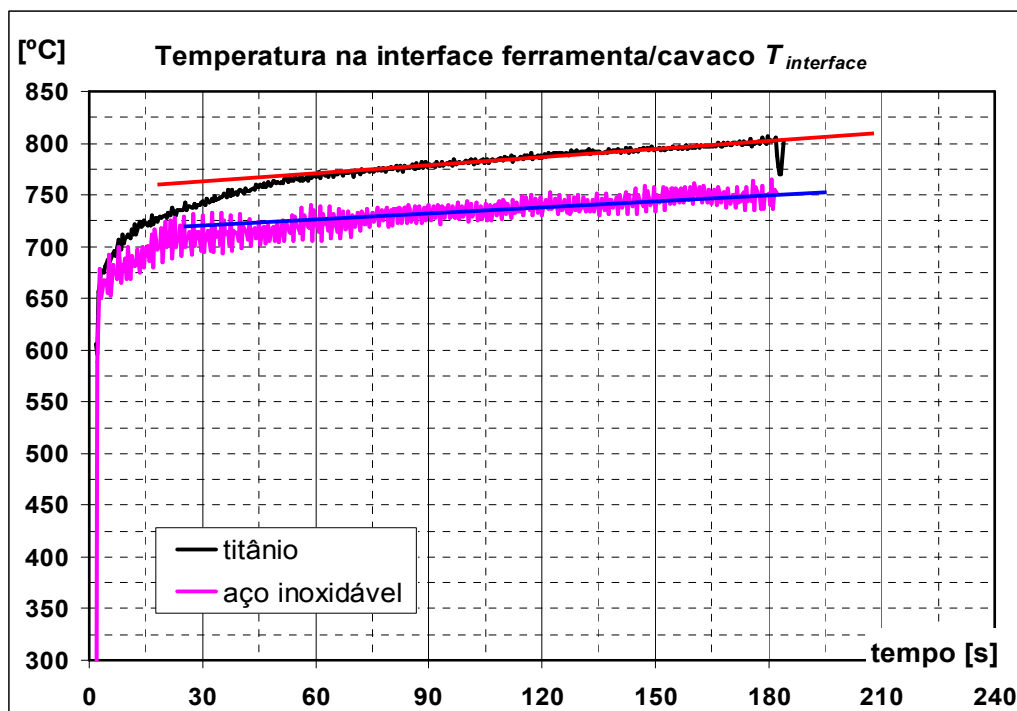


Figura 6.14 - Representação gráfica das médias das estimativas da temperatura na interface  $T_{interface}$  dos ensaios com os suportes de aço inoxidável e de titânio.

Nas Figuras 6.13 e 6.14, pode-se verificar com nitidez que as curvas das temperaturas  $T_{interface}$ , têm um comportamento em regime transiente acentuado no início, seguido de um regime com comportamentos ou tendências linearmente proporcionais bem definidos que se estende até a interrupção dos experimentos. Essa tendência linear apresenta pequena inclinação e justifica a pequena elevação dessa temperatura com o tempo.

Pode-se observar nas Figuras 6.13 e 6.14 que a temperatura  $T_{interface}$  não atingiu o regime permanente com uma temperatura constante, para o tempo de corte dos experimentos. Nota-se, também, que essa temperatura passa por um regime transiente inicialmente acentuado, seguido de um regime transiente linearmente proporcional. Essas duas fases do comportamento de  $T_{interface}$  ocorrem devido aos efeitos das condutividades térmicas da ferramenta e do material do porta-ferramenta durante a usinagem, nessa ordem, de acordo com a argumentação apresentada a seguir.

Segundo Chen e Ho (1976), a condutividade térmica da ferramenta influencia na

temperatura da interface ferramenta/cavaco. Além disso, segundo Trent (1984), o fluxo de calor do material da zona de aderência para o interior da ferramenta de corte é afetado pela condutividade térmica do material da ferramenta, pelo método de resfriamento da ferramenta, dentre outros efeitos. Portanto, considerando-se que a condutividade térmica do material do suporte influencia na temperatura da ferramenta, como foi demonstrado na seção 6.1, sugere-se que há uma relação entre o material do suporte e o fluxo de calor para a ferramenta. Assim, as duas fases observadas no comportamento das temperaturas  $T_{interface}$  obtidas nos ensaios podem ser relacionadas às condutividades térmicas da ferramenta e do porta-ferramenta, respectivamente.

Numa análise mais detalhada do início dos ensaios, representada na Figura 6.15, pode-se observar que até 6 ou 7 segundos após o início do corte (segmento de reta em vermelho), as curvas de  $T_{interface}$  dos ensaios sugerem regimes transientes idênticos. Como os experimentos foram realizados a partir do equilíbrio térmico com a peça, o porta-ferramenta e a ferramenta sujeitos à temperatura do ambiente, os sistemas térmicos estabelecidos na interface ferramenta/cavaco nos instantes iniciais, imediatamente após o início do corte, devem ser semelhantes. Nessa condição inicial, a ferramenta representa um meio condutor semi-infinito em equilíbrio térmico à temperatura ambiente, em relação à interface ferramenta/cavaco. Conseqüentemente, as trocas térmicas na interface no início do corte também devem apresentar comportamentos transientes idênticos, pois a condução de calor nessa interface é função dos mesmos parâmetros, inclusive, da condutividade térmica da ferramenta.

Na medida em que um gradiente de temperatura é estabelecido no volume da ferramenta, em função da sua própria condutividade térmica, a taxa de transferência de calor na interface entre o material da zona de fluxo e a superfície da ferramenta também passa por alterações. Durante o desenvolvimento do corte, o gradiente de temperatura na ferramenta é reduzido, ou seja, a ferramenta sofre aquecimento porque o calor dissipado pelo sistema, composto pela ferramenta e o seu suporte, não compensa o calor gerado na interface. Assim, o aquecimento da ferramenta, ou seja, a elevação do potencial térmico no volume da ferramenta, provoca a redução do fluxo de calor da zona de aderência para a ferramenta, provocando a elevação da temperatura nessa interface (segundo Trent, 1984, na interface ferramenta/cavaco a temperatura nas finas camadas de material entre a zona de aderência e a superfície da ferramenta é mesma). Portanto, como o desenvolvimento do gradiente de temperatura na ferramenta também é influenciado pela condutividade térmica do material do suporte, como se mostrou na seção 6.1, pode-se sugerir que a segunda fase do comportamento de  $T_{interface}$  deve estar relacionada, principalmente, a essa propriedade, uma vez que realizou-se os experimentos a seco. Pode-se constatar essa relação

verificando-se os resultados apresentados na Figura 6.10, onde se observa que as temperaturas  $T_{interface}$  são mais elevadas nos ensaios cujos suportes possuem materiais com menores condutividades térmicas, usando-se como referência a Tabela 5.2. A maior elevação dessa temperatura, embora seja inferior a 10 %, ocorreu no ensaio do suporte de titânio, representado por uma condutividade térmica relativamente muito baixa em relação a do cobre. Os resultados do suporte de cobre mostraram a menor elevação de  $T_{interface}$  dentre os ensaios (inferior a 4 %).

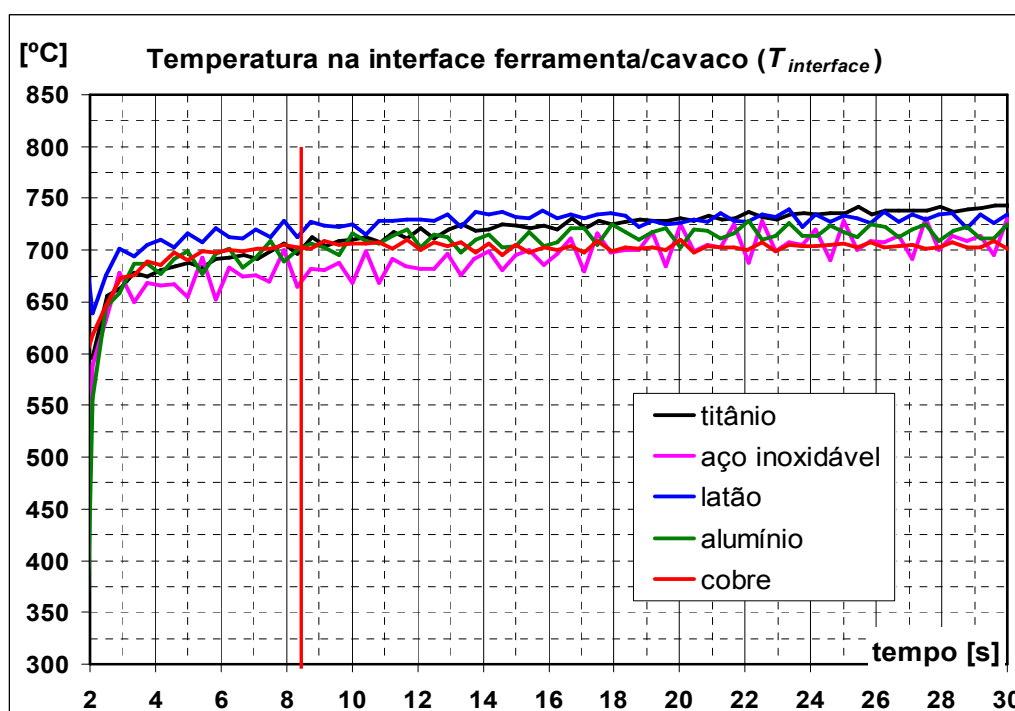


Figura 6.15 -  $T_{interface}$  dos ensaios dos suportes de cobre, alumínio, latão, aço inoxidável e titânio durante 30 segundos iniciais de usinagem.

Do exposto, pode-se concluir que as diferenças observadas no comportamento da temperatura da interface ferramenta/cavaco estão relacionadas à condutividade térmica do material do porta-ferramenta. No entanto, mais significativo é o da temperatura na interface ferramenta/cavaco não ser influenciada significativamente pela condutividade térmica do material do suporte, considerando-se o tempo de usinagem praticado nesse trabalho.

Observa-se, na Figura 6.10, que os resultados de  $T_{interface}$  do suporte de aço inoxidável apresentam valores médios inferiores aos respectivos resultados do suporte de latão ao longo do tempo. No entanto, isso é incoerente com a argumentação feita anteriormente, pois a condutividade térmica do aço inoxidável é muito inferior à condutividade do latão, como se verifica na Tabela 5.2. Assim, as temperaturas  $T_{interface}$

iniciais deveriam apresentar valores semelhantes resultados dos dois suportes, mas ao final dos experimentos, espera-se que a temperatura  $T_{interface}$  do suporte de aço inoxidável seja superior à correspondente temperatura do suporte de latão (em aproximadamente 75 °C).

Provavelmente, esses resultados inesperados da temperatura  $T_{interface}$  do suporte de aço inoxidável se devem a erros de medição da força eletromotriz *f.e.m.* térmica ( $\Delta E$ ) ou a avarias na montagem do circuito termopar ferramenta-peça desse ensaio. Essas suspeitas foram levantadas após verificar-se que as condições de corte usadas nos experimentos (Tabela 5.3) foram mantidas e que a temperatura de compensação ( $T_{compensação}$ ) estão coerentes com as outras temperaturas superficiais desse ensaio.

As evidências de erros nos resultados da *f.e.m. térmica* ( $\Delta E$ ) do ensaio do suporte de aço inoxidável podem ser observadas na Figura 6.16, onde se mostra o gráfico dessa grandeza para o intervalo inicial de 60 segundos de usinagem.

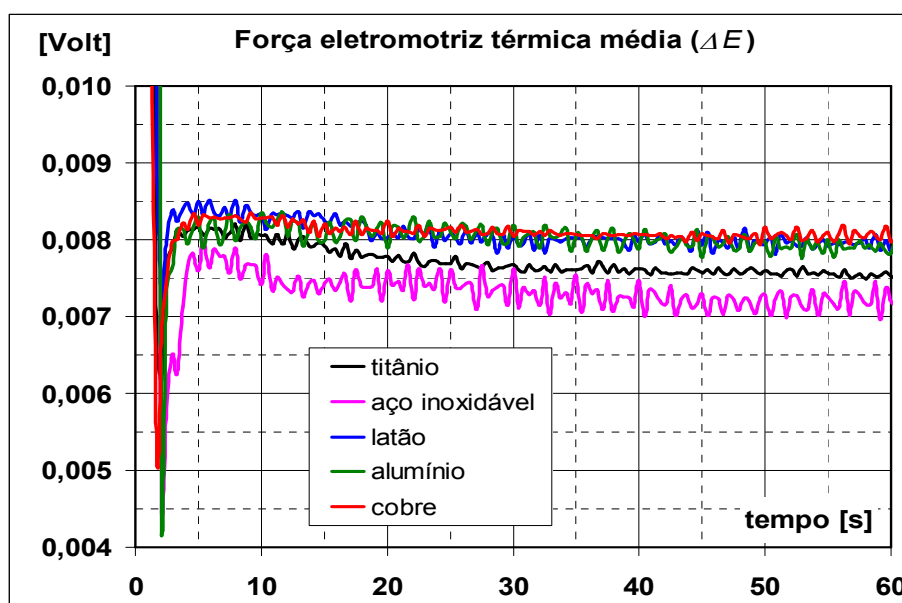


Figura 6.16 - Apresentação da *f.e.m. térmica* média no intervalo inicial de 60 s, para os ensaios com porta-ferramentas de titânio, aço inoxidável, latão, alumínio e cobre.

Segundo Donovan e Scott, (1995), a *f.e.m. térmica* é composta por uma componente DC, relacionada ao seu valor instantâneo, e por uma componente AC, relacionada à oscilação da componente DC. Assim, observa-se na Fig. 6.16 que a intensidade do sinal da *f.e.m.* do suporte de aço inoxidável (componente DC) é menor no início do corte em comparação com os outros ensaios e que a variação na sua *f.e.m.* (componente AC) apresenta as maiores amplitudes, indicando que pode ter ocorrido instabilidade mecânica do sistema (DONOVAN e SCOTT, 1995).

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSÕES**

Baseando-se nos resultados obtidos pode-se concluir que as temperaturas na interface ferramenta/cavaco não são consideravelmente influenciadas pela substituição do material do porta-ferramenta, uma vez que as temperaturas medidas usando-se o método do termopar ferramenta peça, não apresentaram alterações significativas nos ensaios realizados com o torneamento de ferro fundido cinzento, a seco, com ferramenta de metal duro, sem revestimento, usando os suportes de titânio, aço inoxidável, latão, alumínio e cobre.

No entanto, verificou-se que os gradientes de temperatura na ferramenta e no porta-ferramenta são significativamente influenciados pela substituição do material do suporte. Observou-se que, tanto na ferramenta quanto no respectivo suporte, as temperaturas superficiais mais elevadas estão vinculadas ao material do porta-ferramenta que apresenta menor condutividade térmica. Verificou-se, também, que as temperaturas superficiais relativas aos ensaios com suporte de titânio, (apresenta o menor valor de condutividade térmica) são muito superiores às respectivas temperaturas apresentadas pelo suporte de cobre.

#### **7.1 - Considerações finais**

Como consequência da complexidade dos procedimentos experimentais que envolvem a medição de temperaturas na usinagem, especificamente com respeito à calibração do método termopar ferramenta peça, o desenvolvimento desse trabalho exigiu a realização de modificações em procedimentos experimentais relacionados. Conclui-se, a

partir dos resultados alcançados, que essas modificações são essenciais para uma maior confiança na uso dessa técnica.

Verifica-se, ainda, que as modificações efetuadas no sistema termopar ferramenta-peça mostram-se eficientes para compensar a formação de junções secundárias no circuito elétrico correspondente. Uma comparação dos resultados da *f.e.m.* de ensaios com o uso e sem o uso do sistema implantado corrobora essa conclusão. A utilização da ferramenta de corte na posição invertida, ou seja, com a sua superfície de saída voltada para baixo durante os ensaios, foi a solução para se eliminar o acúmulo de cavacos sobre a ferramenta e seu porta-ferramenta, o que poderia ter efeito sobre as respectivas temperaturas superficiais.

O método de calibração do sistema termopar ferramenta-peça desenvolvido nesse trabalho deve apresentar resultados com maior confiabilidade do que os métodos de calibração que usam aquecimento de modelos. Essa observação é também sustentada nos trabalhos de ALVELID, (1970) e LESHOCK e SHIN, (1997). Os resultados obtidos com esse método de calibração resultaram numa faixa de valores da *f.e.m.* e da temperatura de compensação que engloba os resultados experimentais e, portanto, são convenientes à realização de um tratamento matemático para ajuste de uma curva de calibração sem a necessidade de extrapolação.

As modificações efetuadas no contraponto convencional alcançaram os seus objetivos de manter a continuidade do circuito elétrico do sistema, estabelecer a isolamento elétrica do sistema em relação aos elementos exteriores ao mesmo e proporcionar rigidez da peça na montagem experimental durante a execução dos ensaios de usinagem. Esse problema corresponde a uma das limitações dessa técnica. Além disso, o uso do sistema de fixação da peça à placa do torno com um elemento elástico de aço para conferir rigidez à pressão das castanhas sobre a peça e a utilização da folha de lixa d'água entre a peça e esse elemento, para manter a isolamento elétrica nesse ponto de fixação, mostrou-se suficiente à sua finalidade.

O uso de placas de *Celeron*® (espessura de 3,2 mm) envolvendo o porta-ferramenta é eficaz para a sua isolamento elétrica em relação à massa do torno, mas pode ter provocado a presença significativa da componente AC no sinal da *f.e.m.* (DONOVAN e SCOTT, 1995) nos ensaios com um ou outro porta-ferramenta. Nesses casos, isso pode ter ocorrido por falta de acomodação dessas placas às superfícies desses suportes provocada por alterações no padrão de montagem durante os respectivos preparativos, afetando a rigidez da sua fixação.

Portanto, o desenvolvimento desse trabalho produziu resultados relacionados aos seus próprios objetivos e, também, à necessidade de melhorias nos procedimentos



experimentais. Primeiramente, ele contribui com o estudo da temperatura na interface ferramenta/cavaco, mostrando que essa temperatura não é significativamente afetada pela alteração das propriedades térmicas do material do porta-ferramenta, mas que, por outro lado, os gradientes de temperatura na ferramenta e no porta-ferramenta são significativamente influenciados por essas propriedades.

Uma grande contribuição do trabalho diz respeito ao uso do método do termopar ferramenta-peça. Apresenta-se uma solução viável à compensação de junções secundárias que são comuns em operações de usinagem. Além disso, o método de calibração aqui desenvolvido é uma alternativa viável e mais confiável à calibração desses sistemas. Acrescenta-se, ainda, que as modificações efetuadas no contraponto “comercial” (conforme ALVELID, 1970) e o uso do sistema de um elemento elástico de aço na fixação da peça pela placa do torno, indicam uma opção consistente ao problema de falta de rigidez durante a usinagem que o uso convencional de materiais para isolamento elétrica pode causar.

## **7.2 - Propostas para trabalhos futuros**

Propõem-se as seguintes ações para o contínuo desenvolvimento da técnica do termopar ferramenta-peça e do estudo da temperatura na interface ferramenta/cavaco.

### **Quanto aos objetivos desse trabalho, propõe-se:**

- A execução de experimentos com o porta-ferramenta confeccionado com um material usado na fabricação comercial desse acessório, aço SAE 4340, disponível no LEPU/LTCM, aplicando-se o mesmo planejamento experimental aqui usado. As temperaturas na interface e superficiais no inserto e no porta-ferramenta poderão ser usados como dados de referência diante dos resultados obtidos visando-se a complementar a proposta inicial desse trabalho.
- A execução do planejamento experimental desse trabalho, incluindo o suporte de aço SAE 4340, usando-se duas classes de insertos de metal duro de mesma especificação, porém, caracterizadas por condutividades térmicas distintas com o objetivo de investigar o efeito da condutividade térmica da ferramenta sobre as temperaturas da interface ferramenta/cavaco (CHEN e HO, 1976) e sobre temperaturas superficiais na ferramenta e no suporte.

- A realização de ensaios com os portas-ferramentas de cobre e de titânio que por tempo de usinagem estendido ao máximo visando à verificação da tendência do comportamento da temperatura da interface ferramenta/cavaco – a sua estabilização ou o seu aumento proporcional ao longo do tempo.
- A execução do planejamento experimental desse trabalho com ferramentas de metal duro em espessura reduzida e calços feitos com os materiais dos respectivos portas-ferramenta complementando a sua espessura original, visando a verificação do efeito sobre as temperaturas da interfaz.
- A realização de ensaios com os suportes de cobre e titânio, usando-se técnicas de arrefecimento por criogenia com aplicação do respectivo fluido sob a ferramenta de corte, visando à observação do efeito desse arrefecimento da ferramenta sobre a temperatura da interface ferramenta/cavaco (TRENT, 2000).

**Quanto ao método do termopar ferramenta-peça com compensação física, propõe-se:**

- A execução de nova calibração do sistema no mesmo aparato experimental usado no trabalho visando à comprovação experimental da repetibilidade e confiabilidade dos procedimentos desenvolvidos e das modificações implantadas.
- O desenvolvimento de procedimentos para modificações no dispositivo de aquecimento (Figura 4.2) utilizado na calibração do termopar ferramenta-peça para a substituição do elemento de aquecimento e do pino de aquecimento a cada novo ensaio. Pode-se sugerir o desenvolvimento de um elemento de aquecimento (Figura 4.2) integral em cobre, contendo dois furos roscados, alinhados e opostos, para o alojamento do pino intermediário e de um elemento de extremidade para o estabelecimento da junta quente.
- O desenvolvimento de procedimentos para a manutenção da pressão de contato da ferramenta na junta quente na fase de resfriamento da calibração do sistema, para se evitar a perda desse contato por contração térmica dos elementos.
- O desenvolvimento da aplicação de uma forma de aquecimento mais rápido para a calibração do sistema termopar ferramenta-peça, com a mesma intensidade ou superior ao uso da chama a gás oxiacetileno através do uso de metais em fusão como o próprio ferro fundido cinzento e o aquecimento por reação exotérmica a base de raspas de magnésio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABHANG, L. B., HAMEEDULLAH, M., Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(4), 382-393, 2010a.

ABHANG, L. B., HAMEEDULLAH, M., The Measurement of chip-tool interface Temperature in the Turning of steel ,International Journal of Computer Communication and Information System ( IJCCIS), vol. 2, n.1, ISSN: 0976–1349, July – Dec, 2010b.

ABUKHSHIM, N.A., MATIVENGA, P.T., SHEIKH, M.A., Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 782–800

AGAPIOU, J. S., DEVRIES, M. F., On the determination of thermal phenomena during drilling - part II. Comparison of experimental and analytical twist drill temperature distributions. Int. J. Mach. Tools Manufact., vol. 30, No. 2, pp. 217-226, 1990.

AGAPIOU, J. S., STEPHENSON, D. A., *Analytical and Experimental Studies of Drill Temperatures*, Transactions of the ASME, vol 116, pp. 54-60,1994.

AHMAD-YAZID, A.; TAHA, Z.; ALMANAR, J. P., A review of cryogenic cooling in high speed machining (HSM) of mold and die steels, Scientific Research and Essays, vol. 5 (5), pp. 412-427, 4 March, 2010.

AHMED, M. I., ISMAIL, A. F., ABKAR, Y. A., NURUL AMIN, A. K. M., Effectiveness of cryogenic machining with modified tool holder, Journal of Materials Processing Technology, 185 pp. 91–96, 2007.

ALVELID, B., Cutting Temperature Thermo-Electrical Measurements, Annals of the CIRP, Vol. XVIII, Pp. 547-554, 1970.

ANAGONYE, A. U., STEPHENSON, D. A., Modeling cutting temperatures for turning inserts with various tool geometries and materials, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, vol. 124, issue 3, August 2002, pp. 544-552.

ARNDT, G. & BROWN, R. H., On the temperature distribution in orthogonal machining, International Journal of Machine Tools and Design, Vol. 7, 1996, p. 39-53.

BARTOSZUK, M., GRZESIK, W., Numerical prediction of the interface temperature using updated finite difference approach, Advanced Materials Research, Volume 223, 2011, Pages 231-239

BOOTHROYD, G., KNIGHT, W. A., Fundamentals of machining and machine tools, 2<sup>nd</sup> edition, New York, USA, Ed. Marcel Dekker, 1989, 530p.

BUS, C., TOUWEN, N. A. L., VEENSTRA, P. C., VAN DER WOLF, A. C., H., Thermoelectric characteristics of carbides, Machine Tool Design and Research : 12th International Conference, Manchester, September 1971 / Ed. F. Koeningsberger. - Oxford : Pergamon, pp. 397-400, 1971.

BYRNE, G. , Thermoelectric Signal Characteristics and Average Interfacial Temperatures in the Machining of Metals Under Geometrically Defined Conditions, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.27. No.2. pp. 215-224, 1987

CARVALHO, S. R., 2005, Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de usinagem por torneamento, Tese de Doutorado, Univ. Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2005, 123f.

CARVALHO, S. R., LIMA E SILVA, S. M. M., MACHADO, A. R., GUIMARÃES, G., Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder, J. Mat. Proc. Technology, vol. 179, pp.97-104. 2006.

CHEN, N. N. S.; HO, C. F., Measurement of tool-work interface temperature in hot machining, Int. J. Proc. Res., vol. 14, nº 6, pp. 657-667, 1976.

CHEN, W.C., TSAO, C.C., LIANG, P.W., Determination of temperature distribution on the rake face of cutting tools using a remote method, *Int. Commun. Heat Mass Trans.* 24 (2),161–170, 1997.

CHILDS, T. H. C., The rake face action of cutting lubricants. *Proc. In. Mech. E. Lond.* 186, 717-727, 1972.

CHILDS, T. H. C., MAEKAWA, K., OBIKAWA, T., YAMANE, Y., *Metal Machining, Theory and applications*, London: Arnold; New York, John Wiley, 2000, 408p.

CHILDS, T. H. C., OTIENO, A. W., Simulations and experiments on machining carbon and low alloy steels at rake face temperatures up to 1200°C, *Volume 16, Issue 1, 1 January*, pp. 96-110, 2012.

DAVIES, M. A., UEDA, T., M'SAOUBI, R., MULLANY, B., COOKE, A. L., *On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes, Annals of the CIRP Vol. 56/2/2007*, pp. 581-604.

DINÇ, O. S., ETTLES, C. M., CALABRESE, S. J., SCARTON, H. A., *The Measurement of Surface Temperature in Dry or Lubricated Sliding*, *Transactions of the ASME*, vol 115, pp. 78-82, 1993.

DOEBELIN, E. O., *Measurement Systems, Application and Design*, McGraw Hill, Inc, 1990, NY, USA.

DONOVAN, A., SCOTT., On-line monitoring of cutting tool-wear through tribo emf analysis, *International Journal of Machining Tools Manufacturing*, Vol. 35, N° 11, PP. 1523-1535, 1995.

EU-GENE, N. G. Measurement of tool/workpiece interface temperature when turning hardened tool steel with PCBN, *Journal of heat transfer*, Vol. 121, May 1995, p. 300-306.

FERRARESI, DINO, *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda, 1977.

FIOCHI, A. A., SANCHEZ, L. E. A., MELLO, H. J., *Análise da Temperatura Média de Corte no Torneamento com Auxílio de um Termopar Peça-Ferramenta*, V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 25 - 28/08/2008, Salvador – Bahia – Brazil.

*GEM - Guide to Engineered Materials - 2002, ASM International Publication, Vol. 159, nº 12, December, 2001.*

GÖKKAYA, H., HABALI, K., OZÇATALBAS, Y., EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COATING MATERIALS ON THE TOOL-CHIP INTERFACE TEMPERATURE ON COATED TOOLS, Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic, Cilt: 7 Sayı: 1 s. 23-30, 2004 Vol: 7 No: 1 pp. 23-30, 2004. (*em turco*)

GÖKKAYA, H., NALBANT, M., OZÇATALBAS, Y., The applicability of the system developed to measure the tool-chip interface heat by means of tool-work piece thermocouple method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Vol. 21, issue 3, pp. 409-413, 2006. (*em Turco*).

GOTTWEIN, K., Die Messung der Schneiden-Temperatur beim Nohdren von Flusseisen. *Maschinenbau*, 4, 1925.

GRZESIK, W., Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts, International Journal of Machining Tools Manufacturing, Vol. 39, 1999, pp. 355-369.

GRZESIK, W., *Friction behaviour of heat isolating coatings in machining: mechanical, thermal and energy-based considerations*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 43, pp. 145–150, 2003.

GRZESIK, W., Composite layer-based analytical models for tool-chip interface temperatures in machining medium carbon steels with multi-layer coated cutting tools, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 176, issue 1-3, 6 june, pp. 102-110, 2006a.

GRZESIK, W., Determination Of Temperature Distribution In The Cutting Zone Using Hybrid Analytical-Fem Technique, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46, issue 6, may, pp. 651-658, 2006b.

GRZESIK, W., RECH, J., ZAK, K., CAUDIN, C., Machining performance of pearlitic-ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 49, Issue 2, February 2009, Pages 125-133

HERBERT, The measurement of cutting temperatures, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 1, pp. 289-329, 1926.

INGRACI NETO, R. R., FIOCHI, A. A., SANCHEZ, L., E., A., AGUIAR, P. R. A., Predição do desgaste de flanco no torneamento por meio de análise do sinal elétrico de um termopar peça-ferramenta utilizando *wavelet* e redes neurais. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 11 a 15 de abril de 2011, Caxias do Sul - RS, Brazil

ITO, A., YANG, L., NEGISLII, H., A Study of the Measurement of Surface Temperature at a Cam/Tappet Contact, *Tribotest journal* 7-3, March 2001. (7) 203 ISSN 1354-4063 .

KAMINSKI, J., ALVELID, B., Temperature reduction in the cutting zone in water-jet assisted turning, *J. Mat. Proc. Tech*, vol. 106, pp. 68-73, 2000.

KITAGAWA, T., KUBO, A., MAEKAWA, K., Temperature and wear of cutting tools in high speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn, *Wear* 202 (1997) 142–148.

LESHOCK, C., SHIN, Y. C., Investigation on tool rake face temperature in turning by a tool-work thermocouple technique , *American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED*, Volume 2-1, 1995, Pages 189-201.

LESHOCK, C. E., SHIN, Y. C. Investigation on cutting temperature in turning by a tool-work thermocouple technique, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 119, issue 4, part I, November 1997, p. 502-508.

LIN, J., LEE, S.-L., WENG, C. -I, Estimation of Cutting Temperature in High Speed Machining, *Journal of Engineering Material and Technology*, Vol. 114, pp. 289-296, 1992.

LIN, JEHNMING, LIU, CHANG-YI, Measurement of cutting tool temperature by an infrared pyrometer *Meas. Sci. Technol.* 12 (2001) 1243–1249.

LONGBOTTOM, F. M., LANHAM, F. D., Cutting temperature measurement while machining - a review, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, vol. 77, nº 2, pp. 122-130, 2005.

LOEWEN, E. G., SHAW, M. C., On the analysis of cutting tool temperatures, *Transactions of ASME*, vol. 71, pp. 217-231, 1954.

MACHADO, A. R., DA SILVA, M.B. *Usinagem dos Metais*. 8ª Ed., Brasil, 2004.

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., DA SILVA, M. B., *Teoria da usinagem dos Materiais*, 2ª ed. revisada, São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 2011, 397p.

MELO, A. C. A. *Estimação da Temperatura de Corte Utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1998, Uberlândia, MG.

QURESHI, A. J., KOENIGSBERGER, F. An investigation into the problem of measuring the temperature distribution on the rake face of a cutting tool, *Annals of the CIRP*, vol. XIV, 1966, p. 189-199.

SEIREG, A., HSUE, E., *An Experimental Invesigation of the Effect of Lubricant Properties on Temperature and Wear in Sliding Concentrated Contacts*, *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 103, pp. 261-255, 1981.

SHARMA, V. S., DOGRA, M., SURI, N. M., Cooling techniques for improved productivity in turning, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, vol. 49, pp. 435-453, 2009.

SHAW, M. C., *Metal Cutting Principles*. Londres: Oxford University Press, 1982.

STANFORD, M., LISTER, P. M., MORGAN, C., KIBBLE, K. A., Investigation into the use of gaseous and liquid nitrogen as a cutting fluid when turning BS 970-80A15 (En32b) plain carbon steel using WC-Co uncoated tooling, *J. Mat. Proc. Technology*, vol. 209, pp. 961-972, 2009.



STEPHENSON, D. A., Assessment of Steady State Metal Cutting Temperature Models Based on Simultaneous Infrared and Thermocouple Data, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, 1991a, pp. 121-128.

STEPHENSON, D. A. An inverse method for investigation deformation zone temperatures in metal cutting, Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, 1991b, p. 129-136.

STEPHENSON, D.A.; ALI, A., Tool Temperatures in Interrupted Metal Cutting, Journal of Engineering for Industry, Vol.114, 1992, p.127-133.

STEPHENSON, D. A., Tool-work thermocouple temperature measurements - theory and implementation issues, Journal of Engineering for Industry, vol. 115, issue 4, November 1993, pp. 432-437.

STEPHENSON, D.A.; JEN, T.C.; LAVINE, A.S. Cutting tool temperatures in contour turning: transient analysis and experimental verification. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v.119, 1997, p.494-501.

STEPHENSON, D. A., AGAPIOU, J. S., Metal Cutting Theory and Practice, 2<sup>nd</sup> edition, London, Taylor and Francis Group, 2006, 846p.

TAYLOR, J. L., *Fundamental of Measurement Error*, Neff Instrument Corporation, 1988, USA.

TRENT, E. M., Metal cutting, 2<sup>o</sup> Ed, Butterworths, London, 1984.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K. Metal Cutting. 4. Ed. Boston, USA, Butterworth-Heinemann, 2000, 446p.

TRIGGER, URBANA, ILL, Progress Report n° 1 on Tool-chip Interface Temperatures, Transaction of ASME, FEV, 1948.

WAN, Y., TANG, Z. T., LIU, Z. Q., AI, X., The assessment of cutting temperature measurements in high-speed machining, Materials Science Forum, vol. 471-472, 2004, pp. 162-166.

YEO, S.H., ONG, S. H., Assessment of the thermal effects on chip surfaces, Journal of Materials Processing Technology, vol. 98, issue 3, February 2000, pp. 317-321.

YEN, D. W., P. K., WRIGHT, A remote Temperature Sensing Technique for Estimating the Cutting Interface Temperature Distribution Journal for Engineering for Industry, vol. 108, pp. 252-263, 1986.

YILDZ, Y., NALBANT, M., A review of cryogenic cooling in machining process, Int. J. Machine Tools & Manufacture, vol. 48, pp. 947-964, 2008.