

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-  
PPGEM

DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA  
PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DE CONTORNO  
APLICADOS AO PROJETO DE PEÇAS FORJADAS

ALEXANDRE POLOZINE

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2004

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-  
PPGEM

DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA  
PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DE CONTORNO  
APLICADOS AO PROJETO DE PEÇAS FORJADAS

ALEXANDRE POLOZINE  
Engenheiro-Mecânico,

Trabalho realizado no Laboratório de transformação Mecânica – LdTM do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2004

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de Conformação Mecânica, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr-Ing. Lírio Schaeffer – PPGEM / UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jaime Álvares Spim Jr. – PPGEM / UFRGS

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer – PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Volnei Borges – PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira  
Coordenador do PPGEM

Dedico ao Brasil, um país admirável,  
A minha esposa que me deu apoio e força  
neste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr-Ing. Lírio Schaeffer pelas condições da pesquisa científica e do trabalho, orientação e pelas sugestões e observações valiosas.

Ao professor Arno Krenzinger pelas valiosas contribuições.

Ao professor Volnei Borges pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Ao professor Clóvis Picoral pelas sugestões e observações valiosas.

Ao engenheiro Sérgio S. Netto, pelas sugestões e observações valiosas.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao CNPq pelo apoio financeiro recebido.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XIX
RESUMO.....	XXII
ABSTRACT.....	XXIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 PARÂMETROS TÉRMICOS DE UM CORPO SÓLIDO – ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 Emissividade total.....	3
2.1.1 Métodos utilizados para determinar a emissividade total.....	5
2.1.2 Método do Instituto IBF, utilizado para determinar a emissividade total.....	5
2.1.3 Método clássico calorimétrico para determinar a emissividade total.....	6
2.1.4 Método radiométrico típico para determinar a emissividade total.....	7
2.1.5 Métodos avançados radiométricos para determinar a emissividade total	9
2.1.6 Método radiométrico para determinar a emissividade total pelo pirômetro calibrado para as temperaturas do meio ambiente.....	9
2.1.7 Método aproximado radiométrico para determinar a emissividade total	10
2.1.8 Valores da emissividade total dos metais, citadas na literatura.....	11
2.1.9 Terminologia sobre a noção de “emissividade total”, utilizada na literatura.....	12
2.2 Coeficiente médio da transferência de calor por convecção (h).....	13
2.2.1 Métodos utilizados para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção (h).....	14

2.2.1.1	Métodos dos cálculos aproximados.....	14
2.2.1.2	Método experimental calorimétrico para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção (h).....	15
2.2.2	Avaliação da influência do valor aproximado do coeficiente da transferência de calor por convecção, obtido pela literatura, para a precisão dos cálculos térmicos.....	17
2.3	Propriedades físicas e a composição química dos materiais que foram utilizados no trabalho representado.....	18
3	MODELO MATEMÁTICO DO RESFRIAMENTO DE UM CORPO .....	21
3.1	Obtenção da equação básica para descrever o processo de transferência de calor através de corpo forjado para a ferramenta e meio ambiente.....	21
3.2	Análise da estrutura da equação básica.....	23
3.3	Possibilidades de determinar as soluções exatas da equação básica.....	23
3.4	Simplificações do modelo matemático.....	24
3.5	Abordagem para escolher as soluções verdadeiras da equação básica.....	24
3.6	Procedimento para solução analítica.....	25
4	TÉCNICA DESENVOLVIDA PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS TÉRMICOS $\varepsilon$ E $h$ DE UM CORPO SÓLIDO.....	26
4.1	Equipamento para determinar os parâmetros térmicos de $\varepsilon$ e de $h$ .....	26
4.2	Banco de dados de propriedades físicas do corpo de prova.....	26
4.3	Método para elaborar os dados experimentais.....	27
4.4	Organograma da determinação dos coeficientes de $\varepsilon$ e de $h$ .....	27
4.5	Precisão da determinação dos parâmetros térmicos de $\varepsilon$ e de $h$ .....	27
5	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL PARA A DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE $\varepsilon$ E DE $h$	29

5.1	Equipamento e materiais utilizados nos experimentos.....	29
5.2	Calibração do equipamento para medir as temperaturas.....	30
5.2.1	Descrição dos experimentos da calibração do sistema de aquisição dos dados.....	30
5.2.2	Dados obtidos nos experimentos de calibração.....	32
5.2.3	Fórmula da calibração do equipamento.....	34
5.2.4	Avaliação de erro inserido no cálculo das temperaturas pelo aproveitamento da equação linear de calibração.....	36
5.2.5	Comparação da calibração feita com os dados técnicos do “Spider-8”.....	38
5.3	Admissões teóricas a serem utilizados.....	39
5.4	Determinação dos parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$ para o aço ABNT 1045.....	39
5.4.1	Montagem experimental para determinar os parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$	40
5.4.2	Dados experimentais obtidos para aço ABNT 1045.....	43
5.4.3	Elaboração dos dados experimentais.....	45
5.4.3.1	Preparação dos dados experimentais para os cálculos computacionais.....	45
5.4.3.2	Avaliação do fluxo condutivo de calor através do corpo de prova para o material de isolante.....	49
5.4.3.3	Determinação da taxa do resfriamento do corpo de prova no experimento básico.....	55
5.4.3.4	Parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$ do aço ABNT 1045.....	55
5.5	Determinação dos parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$ para a liga do alumínio AA 6061.....	59
5.5.1	Montagem experimental para determinar os parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$	60

5.5.2	Dados experimentais, obtidos para liga do alumínio AA 6061.....	62
5.5.3	Elaboração dos dados experimentais.....	65
5.5.3.1	Preparação dos dados experimentais para os cálculos computacionais.....	66
5.5.3.2	Avaliação do fluxo condutivo de calor através do corpo de prova para o material de isolante.....	69
5.5.3.3	Determinação da taxa do resfriamento do corpo 4 de prova..	71
5.5.3.4	Parâmetros $\varepsilon$ e $h$ da liga do alumínio AA 6061.....	72
6.	APLICAÇÕES DO MÉTODO DO IBF PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS TÉRMICOS $\varepsilon$ e $h$ DE UM CORPO SÓLIDO.....	76
6.1	Determinação do coeficiente $h$ do corpo de prova do aço ABNT 1045 e da liga AA 6061.....	76
6.2	Determinação do coeficiente $\varepsilon$ do aço ABNT 1045.....	77
6.3	Determinação do $\varepsilon$ da liga de alumínio AA 6061.....	79
7	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
7.1	Comparação da técnica desenvolvida com o método do Instituto IBF.....	81
7.2	Discussão sobre o método do Instituto IBF.....	84
7.3	Discussão sobre a comparação do método desenvolvido para determinar os parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$ , e do método do Instituto IBF.....	84
7.4	Comparação dos valores dos parâmetros $\varepsilon$ e $h$ , obtidos pela técnica desenvolvida e pelo método do IBF aplicado para mesma técnica.....	85
7.5	Discussão sobre os valores obtidos dos parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$ .....	86
8	CONCLUSÕES.....	88
9	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	89
	REFERÊNCIAS .....	90

ANEXOS..... 95

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Montagem experimental típica para determinar, por método calorimétrico, a emissividade total de um corpo sólido.....	6
Figura 2.2	- Esquema do método radiométrico (espectrofotômetro do modelo 112 do Perkin Elmer), para determinar a emissividade total de um corpo sólido .....	7
Figura 2.3	- Montagem experimental típica para determinar a emissividade total de um corpo sólido por método aproximado radiométrico.....	9
Figura 2.4	- Variação da incerteza de temperaturas medidas pelo pirômetro, em função da faixa espectral de ondas infravermelhas e de temperatura de corpo examinado.....	10
Figura 2.5	- Montagem experimental típica para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção. Método do cano aquecido.....	15
Figura 2.6	- Erro das temperaturas teóricas dos corpos de prova da liga de alumínio AA 6061 e de aço ABNT 1045, resfriados no ar.....	17
Figura 2.7	- Erro das temperaturas teóricas dos corpos de prova da liga de alumínio AA 6061 e de aço ABNT 1045, resfriados em matriz aberta .....	18
Figura 3.1	- Esquema do resfriamento do corpo de prova nos processos combinados de radiação, convecção e condução.....	21
Figura 4.1	- Organograma da determinação, através da técnica desenvolvida, do coeficiente de transferência de calor por convecção.....	27
Figura 4.2	- Organograma da determinação, através da técnica desenvolvida, das temperaturas da curva teórica de resfriamento de um corpo sólido .....	28

Figura 5.1	- Esquema da calibração do equipamento no ponto triplo da água	31
Figura 5.2	- Esquema da calibração do equipamento no ponto da fusão de alumínio.....	31
Figura 5.3	- Macro- e microvariações das indicações $T_i$ do equipamento de aquisição de dados “Spider-8”, obtidas no ponto de congelamento de água.....	33
Figura 5.4	- Macrovariações das indicações $T_i$ do “Spider-8”, obtidas no ponto de fusão do alumínio .....	34
Figura 5.5	- Microvariações das indicações $T_i$ do “Spider-8”, obtidas no ponto de fusão do alumínio.....	34
Figura 5.6	- Dispersão das temperaturas $T_i$ , indicadas pelo equipamento de aquisição de dados “Spider-8”, num corredor das temperaturas $T_c$ verdadeiras.....	35
Figura 5.7	- Incerteza $i$ da indicação do equipamento de aquisição de dados “Spider-8”, calculada como função da temperatura $T_i$ indicada.....	36
Figura 5.8	- Erro $(T_i - T_c)$ em função da temperatura $T_c$ utilizada nos cálculos.....	38
Figura 5.9	- Esquema do experimento básico.....	40
Figura 5.10	- Esquema do corpo de prova do aço ABNT 1045 utilizado nos experimentos básico e adicional.....	41
Figura 5.11	- Esquema do experimento adicional.....	41
Figura 5.12	- Esquema da caixa cilíndrica de isolante que foi utilizado no experimento adicional.....	42
Figura 5.13	- Curvas do resfriamento do centro do corpo de prova do aço ABNT 1045 resfriado nos experimentos básico e adicional,	

	na faixa de [1000-200]°C.....	43
Figura 5.14	- Curvas do resfriamento do centro do corpo de prova do aço ABNT 1045 resfriado nos experimentos básico e adicional na faixa de [670-1000]°C.....	44
Figura 5.15	- Curvas do resfriamento do centro e da superfície do corpo de prova do aço ABNT 1045 resfriado no experimento básico, na faixa de [1030-670]°C.....	44
Figura 5.16	- Curvas do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045, obtidas no experimento básico, com a equação encontrada a ser aproveitada nos cálculos.....	46
Figura 5.17	- Curvas do resfriamento dos corpos idênticos de prova do aço ABNT 1045, obtidas nos experimentos básico e adicional e mostradas nas temperaturas médias.....	51
Figura 5.18	- Curvas do resfriamento dos corpos de prova do aço ABNT 1045, mostradas na forma das funções $t\{T_m(básico)\}$ e $t\{T_m(adicional)\}$ , com as suas encontradas a serem aproveitadas nos cálculos.....	52
Figura 5.19	- Perda condutiva do calor $q_{cond}$ do corpo de prova do aço ABNT 1045 em função do tempo do resfriamento. Experimento básico. Faixa de [1220 -970]K.....	53
Figura 5.20	- Perda condutiva de calor $q_{cond}$ do corpo de prova do aço ABNT 1045 em função da temperatura média do corpo. Experimento básico. Faixa de [1220 -970]K.....	54
Figura 5.21	- Curva experimental e as curvas teóricas do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045. Experimento básico na faixa de [950 - 700]°C.....	56
Figura 5.22	- Desvio padrão médio da temperatura da curva teórica em relação	

	à curva experimental do resfriamento do aço ABNT 1045, em função do valor médio $\varepsilon$ da emissividade total.....	57
Figura 5.23	- Desvio padrão médio da temperatura da curva teórica em relação à curva experimental do resfriamento do aço ABNT 1045, em função do coeficiente médio ( $h$ ).....	57
Figura 5.24	- Variação da emissividade total da superfície do corpo de prova do aço ABNT 1045. Para $h= 5,74$ (W/m <sup>2</sup> K).....	58
Figura 5.25	- Variação do coeficiente da transferência de calor por convecção do corpo de prova do aço ABNT 1045. Para $\varepsilon=0,83$ .....	58
Figura 5.26	- Perdas térmicas do corpo de prova do aço ABNT 1045, na faixa de [950 - 700]°C. Para $\varepsilon=0,83$ ; $h=3,53$ (W/m <sup>2</sup> K).....	59
Figura 5.27	- Esquema dos corpos (1, 2) de prova da liga AA 6061, utilizados no experimento básico.....	61
Figura 5.28	- Esquema da caixa de isolante.....	62
Figura 5.29	- Curvas do resfriamento das superfícies dos corpos 1, 2 e 3 de prova da liga AA 6061 resfriados nos experimento básicos, para a faixa de [560-170]°C.....	63
Figura 5.30	- Temperaturas das superfícies dos corpos 1, 2 e 3 de prova da liga AA 6061, normalizadas relativamente ao ponto comum da temperatura inicial, na faixa de [520-170]°C .....	64
Figura 5.31	- Temperaturas do centro e da superfície do corpo 1 de prova da liga AA 6061, na faixa de [420- 310]°C .....	64
Figura 5.32	- Curvas do resfriamento do corpo 4 de prova da liga AA 6061, obtidas no experimento básico, com a equação encontrada a ser aproveitada nos cálculos .....	67
Figura 5.33	- Curvas do resfriamento dos corpos 4 e 3 de prova da liga	

	AA 6061, mostradas na forma das funções $t\{T_{m(básico)}\}$ e $t\{T_{m(adicional)}\}$ , com as suas equações encontradas a serem aproveitadas nos cálculos.....	70
Figura 5.34	- Perda condutiva de calor $q_{cond}$ do corpo de prova da liga AA 6061, em função do tempo do resfriamento. Experimento básico. Faixa de [500 - 300]°C.....	71
Figura 5.35	- Curva experimental e a curva calculada ótima do resfriamento do corpo 4 de prova da liga AA 6061. Experimento básico na faixa de [770 - 570]K .....	73
Figura 5.36	- Variação da emissividade total da superfície do corpo de prova da liga AA 6061. Para o coeficiente $h=7,23$ (W/m <sup>2</sup> K).....	74
Figura 5.37	- Variação do coeficiente da transferência de calor por convecção do corpo de prova da liga AA 6061. Para $\epsilon=0,27$ .....	74
Figura 5.38	- Perdas térmicas do corpo 4 de prova da liga AA 6061 na faixa de [500 - 300]°C. Para $\epsilon=0,27$ ; $h=7,23$ (W/m <sup>2</sup> K).....	75
Figura 6.1	- Curva calculada pelo método do Instituto IBF e a curva experimental do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045 na faixa de [1220-900]K. Para o coeficiente $h(T) = 15,82$ (W/m <sup>2</sup> K).....	79
Figura 6.2	- Curva calculada pelo método do Instituto IBF e a curva experimental do resfriamento do corpo de prova da liga do alumínio AA 6061 na faixa de [770 - 570]K. Para o coeficiente $h(T) = 15,82$ (W/m <sup>2</sup> K).....	80
Figura 7.1	- Organograma para determinar as temperaturas da curva teórica do resfriamento de um corpo sólido pela técnica desenvolvida.....	83

Figura 7.2 - Organograma para determinar as temperaturas da curva teórica  
do resfriamento de um corpo sólido pelo método do IBF..... 83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Variações dos valores da emissividade total, citados na literatura, para as ligas de alumínio e para o aço oxidável.....	12
Tabela 2.2	- Composição química do aço ABNT 1045 e do aço ao carbono russo “Сталь 45” .....	19
Tabela 2.3	- Propriedades físicas do aço carbono russo “Сталь 45” que é equivalente ao aço ABNT 1045.....	19
Tabela 2.4	- Coeficiente da emissividade total de aço carbono e de ferro.....	19
Tabela 2.5	- Composição química da liga de alumínio AA 6061.....	20
Tabela 2.6	- Propriedades físicas da liga de alumínio AA 6060.....	20
Tabela 2.7	- Coeficiente da emissividade total de alumínio e seus ligas.....	20
Tabela 5.1	- Equipamento e materiais utilizados nos experimentos.....	29
Tabela 5.2	- Dados obtidos nos experimentos da calibração do equipamento.....	32
Tabela 5.3	- Variações de potenciais termoeletricos e os valores das temperaturas correspondentes.....	37
Tabela 5.4	- Faixas das temperaturas do corpo de prova do aço ABNT 1045, escolhidas para os cálculos dos parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$ .....	49
Tabela 5.5	- Parâmetros $[\epsilon, h]$ do corpo de prova do aço ABNT 1045, e desvio $d$ , calculados para a faixa das temperaturas $[950 - 700]^{\circ}\text{C}$ .....	56
Tabela 5.6	- Faixas das temperaturas do corpo 4 de prova da liga AA 6061, escolhidas para os cálculos dos parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$ .....	66
Tabela 5.7	- Faixas das temperaturas do corpo 3 de prova da liga AA 6061, escolhidas para os cálculos dos parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$ .....	66
Tabela 5.8	- Parâmetros $[\epsilon, h]$ do corpo de prova da liga AA 6061 e desvio $d$ , calculados pela técnica desenvolvido, para a faixa de $[500 - 300]^{\circ}\text{C}$ .....	72

Tabela 6.1	- Parâmetros [ $h$ , $\varepsilon$ ] do aço ABNT 1045 e desvio $d$ , obtidos pelo método do IBF, na faixa de [900 - 700]°C.....	78
Tabela 6.2	- Parâmetros [ $h$ , $\varepsilon$ ] do alumínio AA 6061 e desvio $d$ , obtidos pelo método do IBF aplicado para inovação, na faixa de [500 - 300]°C .....	80
Tabela 7.1	- Essência da técnica desenvolvida e do método do Instituto IBF para determinar dos parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$ .....	81
Tabela 7.2	- Dados necessários para determinar dos parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$ .....	82
Tabela 7.3	- Comparação dos valores dos parâmetros $\varepsilon$ e $h$ , obtidos para o corpo de prova do aço ABNT 1045 pela técnica desenvolvida e pelo método do IBF aplicado para a mesma técnica, com os dados de literatura.....	85
Tabela 7.4	- Comparação dos valores dos parâmetros $\varepsilon$ e $h$ , obtidos para o corpo de prova da liga de alumínio AA 6061 pela técnica desenvolvida e pelo método do IBF aplicado para a mesma técnica, com os dados de literatura.....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

## SÍMBOLOS

$A_{rad}$	- Área da superfície irradiante, ( $m^2$ )
$A_{cond}$	- Área de transferência de calor por condução, ( $m^2$ )
$A_{conv}$	- Área de troca de calor por convecção, ( $m^2$ )
$A$	- Área de troca do calor por radiação e por convecção, ( $m^2$ )
$C_p$	- Calor específico do material do corpo de prova, ( $J/kg \cdot K$ )
$d$	- Desvio padrão médio de temperatura entre a curva calculada e experimental do resfriamento do corpo de prova, (K)
$G$	- Fator da geometria do sistema resfriado, (-)
$h_T$	- Coeficiente da transferência de calor por convecção, ( $W/m^2 \cdot K$ )
$h$	- Coeficiente médio da transferência de calor por convecção, ( $W/m^2 \cdot K$ )
$i$	- Incerteza da temperatura, ( $^{\circ}C$ )
$I$	- Corrente elétrica, (A)
$k$	- Condutividade térmica do material, ( $W/m \cdot K$ )
$l$	- Altura, (m)
$m$	- Massa do corpo, (kg)
$R$	- Resistência elétrica, ( $\Omega$ )
$q_{cond}$	- Energia térmica perdida pelo corpo, por unidade de tempo, no processo de condução, (W)
$q_{conv}$	- Energia térmica perdida pelo corpo, por unidade de tempo, no processo de convecção, (W)
$q_{rad}$	- Energia térmica perdida pelo corpo, por unidade de tempo,

	no processo de radiação, (W)
$Q$	- Fluxo total do calor através do corpo para o meio ambiente, (W)
$t$	- Tempo de resfriamento do corpo, (s)
$t_0$	- Tempo de resfriamento do corpo em unidades do “Spider-8”, (3s)
$T$	- Temperatura da superfície resfriada por radiação e por convecção, (K)
$T_i$	- Temperatura indicada ao “Spider-8” em unidades do dispositivo, $\approx$ (°C)
$T_m$	- Temperatura média de corpo, (K)
$T_\infty$	- Temperatura do meio ambiente, (K)
$\Delta T$	- Gradiente das temperaturas, (K)
$V$	- Volume do material do corpo, (m <sup>3</sup> )
$\emptyset$	- Diâmetro, (mm)

#### SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$	- Coeficiente de transferência de calor através do corpo forjado para a ferramenta, (W/m*K)
$\varepsilon$	- Valor médio da emissividade total, (-)
$\varepsilon_T$	- Emissividade total de superfície irradiante na temperatura $T$ , (-)
$\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$	- Proporção de radiação emitida por superfícies iguais da mesma temperatura $T$ do corpo real e do corpo negro, em relação ao corpo negro, para o comprimento de onda $\lambda$ , (-)
$\lambda$	- Comprimento de onda, (m)
$v$	- Potencial termoelétrico de termopar, (mV)
$\rho$	- Densidade do material, (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	- Constante de Stefan-Boltzman, (W/m <sup>2</sup> *K <sup>4</sup> )

- $\Phi$  - Velocidade do fluido de ar, (m/s)
- $\Psi$  - Poder emissivo total de superfície real, (W)
- $\Psi_b$  - Poder emissivo total de superfície do corpo negro, (W)
- $\Psi_{b\lambda}$  - Poder emissivo monocromático da superfície do corpo negro, (W)

## ABREVIATURAS

- AA - Aluminium Alloy
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- FEM - Método dos elementos finitos
- IBF - Institut für Bildsame Formgebung
- RWTH - Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

**RESUMO**

O presente trabalho descreve os resultados da pesquisa que tem por objetivo a determinação de parâmetros térmicos de um corpo sólido: o valor médio da emissividade total e o coeficiente médio de transferência de calor por convecção.

Foi desenvolvido o modelo matemático do processo de resfriamento de um corpo forjado.

Foram examinados os métodos da determinação dos parâmetros mencionados, que estão descritos na literatura, e também foram analisadas as possibilidades de aproveitá-los no processo de forjamento. No meio de métodos analisados, o método do Instituto IBF (Institut für Bildsame Formgebung, IBF, RWTH, Aachen, Alemanha), foi considerado o mais apropriado tendo a metodologia deste trabalho seguindo a mesma sistemática.

Aproveitando a metodologia do IBF para a determinação dos parâmetros térmicos mencionados e o modelo matemático do resfriamento de um corpo forjado, foi desenvolvida uma nova técnica para determinar o valor médio da emissividade total e o coeficiente médio de transferência de calor por convecção de um corpo sólido.

Os materiais analisados foram o aço ABNT 1045 e a liga de alumínio AA 6061.

Foram feitas as comparações dos resultados obtidos pela técnica desenvolvida com o método do IBF.

**ABSTRACT**

The present work describes results of the research aimed at the determination of thermal parameters of a solid body: the average value of the total emissivity and the average value of the heat transfer convection coefficient.

The mathematical model of the cooling process of a body under forging has been developed.

Methods of determining the mentioned parameters, available in the literature, have been examined and a possibility to use them in the forging has been considered. Among the analyzed methods, the method of the Institute IBF in Germany (Institut für Bildsame Formgebung, IBF, RWTH, Aachen) turned out to be the most appropriate, and it has been chosen as a prototype.

By using both the methodology of IBF and the mathematical model of the forged body cooling, a new technique for determining the average value of the total emissivity and the average value of the heat transfer convection coefficient of a solid body has been developed.

The analyzed materials were the steel ABNT 1045 and aluminum AA 6061.

The results obtained by the developed technique have been compared with those provided by application of the IBF method.

## 1. INTRODUÇÃO

A simulação numérica do processo da deformação plástica é atualmente uma técnica extremamente importante na área da conformação mecânica. A simulação exata dos processos de conformação a quente, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (FEM), requer o fornecimento dos parâmetros físicos do material com altíssima precisão [1]. Portanto, a área de conformação mecânica necessita de um banco de dados dos parâmetros físicos dos materiais forjados o mais preciso possível.

Os parâmetros térmicos do material forjado são uma parte de grande importância dos parâmetros físicos. Os parâmetros térmicos principais, que tem grande influência nos processos de conformação, são citados a seguir:

- coeficiente de transferência de calor através do corpo forjado para a ferramenta ( $\alpha$ )
- calor específico do material forjado ( $C_p$ );
- condutividade térmica do material do corpo forjado ( $k$ ).

O conjunto destes parâmetros define, em geral, o estado térmico da peça forjada.

Infelizmente, a determinação dos parâmetros mencionados é complicada e necessita nos valores de outros parâmetros, como: valor médio da emissividade da superfície de corpo testado, o coeficiente médio de transferência de calor por convecção, etc.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi determinar com exatidão um dos parâmetros de contorno da peça forjada, denominado de valor médio da emissividade total ( $\epsilon$ ). Através da emissividade total, determinam-se as perdas térmicas da peça aquecida para o meio ambiente. Essas perdas ocorrem durante o processo de movimento da peça do forno para o equipamento de forjamento e durante o forjamento. Esse parâmetro tem a influência significativa no processo de forjamento.

Para se obter o valor exato da emissividade total ( $\epsilon$ ) é preciso levar em conta todas as perdas térmicas, que ocorrem no processo de resfriamento da peça aquecida, inclusive as perdas condutivas e convectivas. A convecção não é o fator significativo no forjamento, mas este fenômeno tem, pela Lei da Conservação de Energia, uma grande influência sobre o cálculo de ( $\epsilon$ ).

O coeficiente médio ( $h$ ) de transferência de calor por convecção, encontrado de um modo geral, é muito aproximado e não pode garantir o resultado exato dos cálculos da emissividade total. A técnica experimental para determinar esse parâmetro da convecção é cara e muito complicada.

Levando em conta as dificuldades teóricas e práticas, nessa área, e baseado no modelo do Instituto IBF (Alemanha) para a determinação dos parâmetros térmicos  $h$  e  $\varepsilon$ , no trabalho apresentado foi desenvolvida uma técnica nova para determinar, com exatidão, o valor médio da emissividade total ( $\varepsilon$ ), e o coeficiente médio de transferência de calor por convecção,  $h$ . A técnica desenvolvida é baseada em:

- equipamento convencional para preparar o corpo de prova, executar o experimento, registrar e elaborar os dados experimentais;
- banco dos valores do calor específico dos materiais;
- método desenvolvido para elaborar os dados experimentais.

## 2. PARÂMETROS TÉRMICOS DE UM CORPO SÓLIDO – ESTADO DA ARTE

Os parâmetros que caracterizam o estado térmico de uma peça forjada são os dados de grande importância para as simulações numéricas e experimentais do processo de forjamento. Os parâmetros térmicos mais importantes para simulações numéricas do estado da peça forjada são a seguir:

- coeficiente de transferência de calor por condução ( $\alpha$ ) através da zona de contato. Esse parâmetro caracteriza a transferência de calor da peça forjada para ferramenta. As perdas térmicas por condução são quantitativamente as mais significativas no processo de forjamento;
- calor específico do material ( $C_p$ ). Define a quantidade de calor armazenada numa peça e tem a influência grande sobre os resultados finais dos cálculos térmicos.
- condutividade térmica do material,  $k$ . Define a velocidade de transmissão de calor dentro do material da peça;
- coeficiente médio da emissividade da superfície de peça ( $\varepsilon$ ). Define as perdas de calor da peça aquecida durante o movimento da peça até o equipamento de forja;
- coeficiente de transferência de calor por convecção da peça para o meio ambiente ( $h$ ). Define as perdas de calor da peça aquecida para o meio ambiente, perdas que ocorrem no processo de movimento da peça para o equipamento de forja e tem uma grande influência sobre o cálculo da emissividade.

São poucas bibliografias que identificam o coeficiente de transferência de calor por condução através da zona de contato ( $\alpha$ ). Em relação aos parâmetros  $C_p$ ,  $k$  e  $\varepsilon_T$  a bibliografia apresenta, normalmente, volume diferente daquelas necessárias para o processo de forjamento.

### 2.1 Emissividade total

A propriedade dos corpos aquecidos de emitir ao meio ambiente a energia térmica é conhecida de tempos antigos. A natureza deste fenômeno só foi compreendida depois da descoberta do eletromagnetismo no ano de 1887. A estimação da quantidade de energia irradiada realiza-se pela noção da emissividade. A ciência distingue dois tipos de emissividade: a emissividade espectral e a emissividade total. Para a indústria é, normalmente, importante a emissividade total.

O coeficiente da emissividade total ( $\varepsilon_T$ ) da superfície de um corpo real é igual à proporção entre a emissão da unidade da superfície deste corpo e um irradiador perfeito à mesma temperatura. O irradiador perfeito é um corpo negro. O valor do coeficiente da emissividade total ( $\varepsilon_T$ ), é definido pela equação [2.1]:

$$\varepsilon_T = \frac{\Psi(T)}{\Psi_b(T)} = \frac{\int_0^\lambda \varepsilon_\lambda(\lambda, T) \Psi_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\lambda \Psi_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda} \quad (2.1)$$

onde:

- $\varepsilon_T$  – coeficiente da emissividade total da superfície real na temperatura  $T$ ;
- $T$  – temperatura da superfície examinada, (K);
- $\Psi(T)$  – poder emissivo total da superfície real na temperatura  $T$ , (W);
- $\Psi_b(T)$  – poder emissivo total da superfície do corpo negro na temperatura  $T$ , (W);
- $\lambda$  – comprimento de onda emitida de superfície examinada, (m);
- $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  – proporção de radiação emitida por superfícies iguais na mesma temperatura  $T$  do corpo real e do corpo negro, em relação ao corpo negro, para o comprimento de onda  $\lambda$ ;
- $\Psi_{b\lambda}(\lambda, T)$  – poder emissivo monocromático da superfície de corpo negro na temperatura  $T$ , (W);

O valor de ( $\varepsilon_T$ ) é determinado pela equação de Stefan-Boltzman [2]:

$$q_{rad} = \sigma \cdot A_{rad} \cdot \varepsilon_T \cdot T^4 \quad (2.2)$$

onde:

- $q_{rad}$  – calor radiante líquido transmitido de superfície por unidade de tempo, (W);
- $\sigma$  – constante de Stefan-Boltzman, ( $\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ );
- $A_{rad}$  – área da superfície irradiante, ( $m^2$ );

Esta propriedade foi utilizada, somente, na área da ciência pura até a época dos satélites espaciais. As pesquisas sistemáticas da emissividade dos metais começaram a ser feitas pela NASA [3] no fim dos anos 50 do século passado.

### 2.1.1 Métodos utilizados para determinar a emissividade total

A literatura apresenta os dois métodos principais para determinar a emissividade total: o método experimental calorimétrico e o método experimental radiométrico.

### 2.1.2 Método do Instituto IBF, utilizado para determinar a emissividade total

O método (calorimétrico) do Instituto IBF, para determinar o valor médio da emissividade total ( $\epsilon$ ) é descrito em linhas gerais na literatura [1]. O método é baseado nas seguintes etapas:

- 1). Obtenção, por meio de experimento, da curva do resfriamento do corpo examinado;
- 2). Cálculos preliminares do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ), através do corpo para o meio ambiente, realizados através da fórmula empírica do IBF [1];
- 3). Determinação através de literatura dos parâmetros seguintes:
  - densidade;
  - calor específico;
  - condutividade térmica.
- 4). Colocar no programa computacional um valor arbitrário da emissividade total ( $\epsilon$ ), e os parâmetros térmicos mencionados neste item;
- 5). Calcular, através do programa, uma família das curvas teóricas do resfriamento do corpo de prova para os diversos valores arbitrários de ( $\epsilon$ ).

O valor de ( $\epsilon$ ) procurado corresponde a uma das curvas teóricas do resfriamento, que é o que mais se aproxima da curva experimental do resfriamento.

O cálculo principal das curvas teóricas realiza-se por um programa computacional, desenvolvido por IBF. O programa mencionado é baseado no método de elementos finitos (FEM).

As vantagens desse método são:

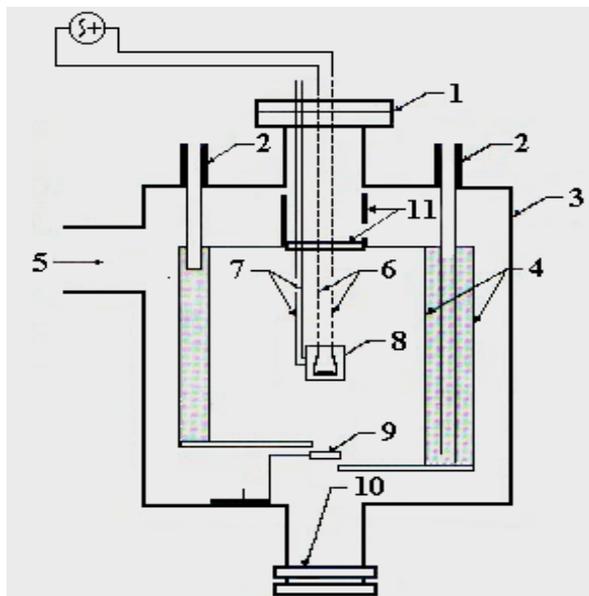
- simplicidade dos experimentos necessários para determinar o valor de ( $\epsilon$ ).

As desvantagens desse método são:

- o cálculo das curvas do resfriamento do corpo de prova, executado pelo método descrito, utiliza o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ). O valor deste parâmetro, calculado pela fórmula empírica mencionada, é muito aproximado e pode conter uma incerteza de até 30% [4]. Portanto, o valor de ( $\epsilon$ ) calculado em função de ( $h$ ) aproximado pode apresentar uma enorme incerteza;
- o programa do IBF, utilizado nos cálculos, não é descrito em detalhes pelos seus autores.

### 2.1.3 Método clássico calorimétrico para determinar a emissividade total

O esquema principal do método calorimétrico clássico para determinar da emissividade total ( $\epsilon_T$ ) de um corpo sólido é mostrado na figura 2.1:



1. Flange isolante de vácuo;
2. Refrigerante e tubos de ventilação;
3. Câmara de vácuo de aço inoxidável;
4. Paredes de cobre;
5. Vácuo;
6. Fios do aquecedor elétrico;
7. Termopares
8. Corpo de prova;
9. Obturador magnético;
10. Espia;
11. Proteção térmica.

Fig. 2.1 - Montagem experimental típica [5] para determinar, por método calorimétrico, a emissividade total de um corpo sólido.

O equipamento para determinar a emissividade total inclui: um dispositivo de vácuo, os termopares para medir as temperaturas do corpo examinado, o aquecedor elétrico para aquecer o corpo examinado, e a câmara com a temperatura constante das paredes, para receber a energia térmica irradiante.

O vácuo serve para eliminar o fenômeno da transferência de calor por convecção. Os condutores de força servem para aquecer o corpo de prova. As paredes de cobre de temperatura constante, mantida pelo refrigerante, estabelecem o fluxo constante de calor irradiante através das paredes para o corpo de prova.

O método calorimétrico é baseado na comparação entre a quantidade de calor fornecido no corpo de prova, e o calor irradiante pelo mesmo corpo. Os cálculos da emissividade total são executados pela Lei da conservação de energia aplicada ao corpo examinado. Estes cálculos baseiam-se na Lei de Ohm e a equação de Stephan-Boltzmann.

Para o processo permanente de troca de calor, o valor da emissividade total é determinado pela equação seguinte [5]:

$$\epsilon_T = \frac{I^2 \cdot R}{\sigma \cdot A_{rad} \cdot (T^4 - T_{\infty}^4)} \quad (2.3)$$

onde:  $(I^2 \cdot R)$  - potência elétrica, recebida pelo corpo de prova;

Para o processo transiente de troca de calor, o valor da emissividade total é determinado pela equação seguinte [5]:

$$\varepsilon_T = -\frac{m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt}}{\sigma \cdot A_{rad} \cdot (T^4 - T_\infty^4)} \quad (2.4)$$

O método calorimétrico é recomendado [3] pela norma americana ASTM C835-01, para determinar a emissividade total da superfície de um corpo sólido com a temperatura até 1400°C. O método calorimétrico permite determinar a emissividade total,  $\varepsilon(T)$ , para qualquer valor da temperatura da superfície do corpo examinado, ou valor médio da emissividade total para qualquer faixa das temperaturas da sua superfície. O método calorimétrico pode ser utilizado para qualquer área da indústria.

As desvantagens do método são a seguir:

- o equipamento utilizado nos experimentos é complexo, caro e especializado;
- o aquecimento do corpo examinado passa nos condições do vácuo;
- é difícil obter o campo homogêneo das temperaturas da superfície do corpo examinado por meio de aquecimento interno pelos condutores de força elétrico-magnética.

#### 2.1.4 Método radiométrico típico para determinar a emissividade total

A montagem experimental típica, para determinar pelo método radiométrico a emissividade total de um corpo sólido, é mostrada na figura 2.2:

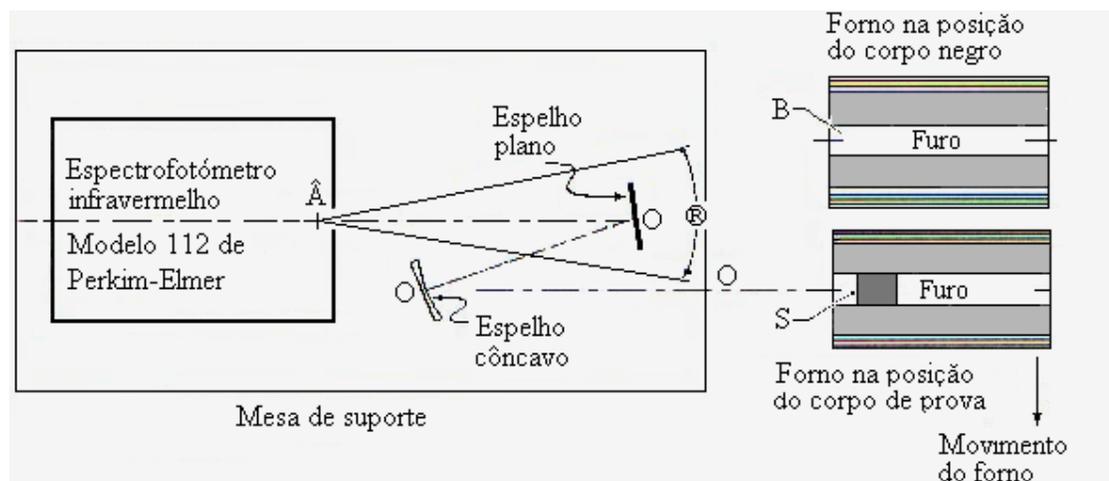


Fig. 2.2 - Esquema do método radiométrico (espectrofotômetro do modelo 112 do Perkin Elmer), para determinar a emissividade total de um corpo sólido [5].

onde:

$S$  – corpo de prova, colocado no furo do forno;

$B$  – corpo negro que é o furo de forno;

$\hat{A}$  – entrada do sinal irradiado pelo corpo de prova (ou corpo negro);

$\hat{AO}$  – eixo óptico do sistema de aquisição do sinal irradiado;

$\textcircled{R}$  – campo da visão do espectrofotômetro;

O equipamento para determinar a emissividade total pelo método radiométrico inclui: o espectrofotômetro, os fornos para aquecer o corpo examinado e o corpo negro e os dispositivos de auxiliar.

O método radiométrico é baseado em comparação aos valores do poder emissivo total da superfície examinada e do valor do poder emissivo total da superfície igual ao corpo negro. A fórmula para o cálculo do valor da emissividade total é determinada pela equação seguinte [5]:

$$\varepsilon_T = \frac{\Psi(T)}{\Psi_b(T)} \quad (2.5)$$

O poder emissivo total [ $\Psi(T)$ ,  $\Psi_b(T)$ ] é medido, em W, diretamente pelo espectrofotômetro.

As medições do poder emissivo do corpo examinado e do corpo negro devem ser executadas nos condições iguais:

- as dimensões das superfícies iguais;
- as temperaturas das superfícies iguais;
- aos caminhos iguais óticos da radiação do corpo examinado e do corpo negro.

As construções de corpo negro também podem ser muito diferentes. Conforme a literatura [6], o corpo negro pode ser um corpo real de grafita. Conforme a literatura [5], o corpo negro utilizado pode ser uma cavidade de cano longo.

O método típico radiométrico é preferível para utilizar, quando da impossibilidade de fazer um contato com o corpo examinado. Conforme a literatura [6] e [7], esse método permite determinar a emissividade total para qualquer temperatura na faixa [500-1800]°C. A maioria dos pesquisadores prefere utilizar o método típico radiométrico nas condições do vácuo. A metodologia dos trabalhos realizados no vácuo descrita nas fontes da literatura [8], [9], [10] e [11] é bastante complicada.

O método típico radiométrico é recomendado [12] pela norma americana ASTM E408-71(2002), para determinar a emissividade total da superfície dum corpo sólido.

As desvantagens desse método são:

- o equipamento utilizado nos experimentos é complicado, caro e especializado;
- os trabalhos experimentais executam-se nas condições do vácuo.
- num experimento determina-se a emissividade total para uma temperatura fixa. Portanto, para determinar o valor médio da emissividade total para uma faixa das temperaturas é necessário repetir o experimento mais do que uma vez.

### **2.1.5 Métodos avançados radiométricos para determinar a emissividade total**

O método radiométrico para determinar a emissividade total pode ser realizado por meio de análise espectral da radiação do corpo examinado que fica no estado de equilíbrio térmico. Neste caso, estão medidos pelos dispositivos especializados os componentes da energia irradiada do corpo examinado: a sua emitância e a sua refletância. A metodologia para determinar a emissividade total pelo laser, polarímetro ou o reflectômetro, descrita na literatura [13], [14], [15], [16] e [17], é bastante complicada.

Os cálculos da emissividade total são executados pela Lei de Kirchoff, aplicada ao corpo examinado.

As desvantagens desse método são:

- o equipamento utilizado nos experimentos é caro e muito especializado;
- o corpo examinado deve ficar no estado do equilíbrio térmico.

### **2.1.6 Método radiométrico para determinar a emissividade total pelo pirômetro calibrado para as temperaturas do meio ambiente**

O método é simples para utilização. O cálculo, necessário para determinar a emissividade total, executa-se automaticamente pelo pirômetro. E qualquer usuário obtém o valor da emissividade total rapidamente e facilmente. O método é recomendado [18] pela norma americana ASTM C1371-98 para determinar a emissividade total da superfície de um corpo sólido para as temperaturas do meio ambiente. A metodologia dos trabalhos, realizados com base no pirômetro calibrado, está descrita na literatura [19] e é simples.

O método é baseado na calibração preliminar do pirômetro para uma temperatura constante que é igual à temperatura do meio ambiente.

### 2.1.7 Método aproximado radiométrico para determinar a emissividade total

A montagem experimental típica, para determinar a emissividade total de um corpo sólido por método aproximado radiométrico, é mostrada na figura 2.3:

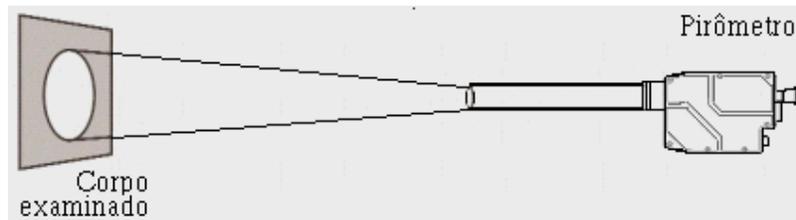


Fig. 2.3 - Montagem experimental típica para determinar a emissividade total de um corpo sólido por método aproximado radiométrico [20].

O método aproximado radiométrico para determinar a emissividade total é baseado em utilização de pirômetros. Este método é descrito em detalhes no “The Pyrometer Handbook” [20]. O método é simples para utilização, o cálculo necessário executa-se, automaticamente, pelo pirômetro, e qualquer usuário obtém o valor da emissividade total de corpo examinado rapidamente e facilmente.

O método aproximado radiométrico é baseado na comparação do poder emissivo total da superfície examinada, medido pelo pirômetro, com a seu base de dados de poder emissivo total de um corpo negro. Esta comparação pode ser feita para os corpos examinados de temperatura conhecida.

As desvantagens do método aproximado são a seguir:

- impossibilidade de determinar o poder emissivo total para todas as ondas eletromagnéticas irradiadas através de uma superfície real. Qualquer valor determinado pelo método aproximado radiométrico é a emissividade total para uma faixa espectral. Essa desvantagem é definida pelas propriedades físicas do sensor fotovoltaico do pirômetro;
- impossibilidade de comparar corretamente o poder emissivo da superfície real com a base de dados do fabricante do pirômetro. Esta desvantagem é definida pelas condições diferentes das medições feitas pelo usuário e pelo fabricante do pirômetro.

A desvantagem do método aproximado radiométrico, para determinar a emissividade total, é compreendida pela demonstração da possibilidade de um pirômetro medir a temperatura:

As curvas A, B, C, D, E da figura [2.4] representam a incerteza  $i$  da temperatura  $T$  que foi medida pelos pirômetros diferentes. Cada das curvas mencionadas corresponde à faixa espectral das ondas infravermelhas, registradas pelo sensor fotovoltaico do pirômetro.

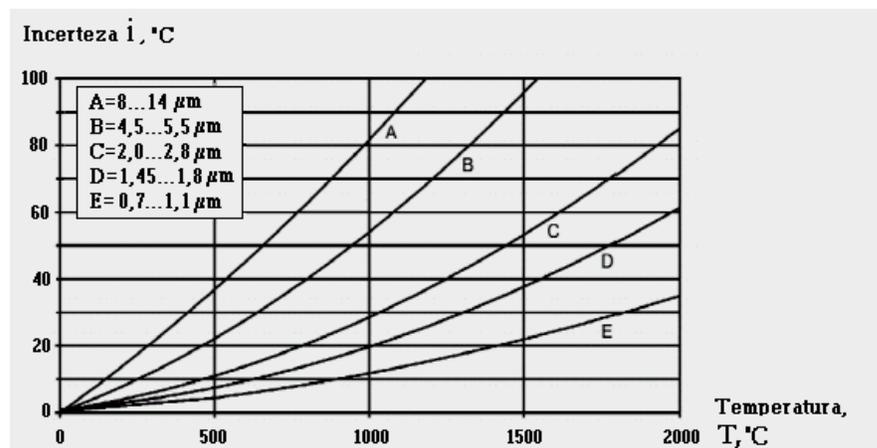


Fig. 2.4 - Variação da incerteza de temperaturas medidas pelo pirômetro, em função da faixa espectral de ondas infravermelhas e de temperatura de corpo examinado [20].

Análise da figura 2.4 mostra a dependência grande da incerteza do método aproximado radiométrico de faixa espectral das ondas infravermelhas registradas e da temperatura  $T$  medida. O valor da incerteza é insignificante na região das temperaturas baixas, como a temperatura do meio ambiente. O valor da incerteza é grande na região das temperaturas de forjamento.

### 2.1.8 Valores da emissividade total dos metais, citados na literatura

Análise da literatura mostra que os valores citados de  $\varepsilon$  e de  $\varepsilon_T$  da emissividade total dos metais não são completos e sistemáticos. Por outro lado, os valores de  $\varepsilon$  e de  $\varepsilon_T$ , citados para os mesmos metais, são muito diferentes. Este fenômeno pode ser esclarecido pelas dificuldades de determinar o valor da emissividade total e pelas condições diferentes dos experimentos executados.

A dispersão dos valores da emissividade, citados na literatura, para os dois metais da utilização comum e com as propriedades físicas muito diferentes, é mostrada na tabela 2.1:

Tab. 2.1 - Dispersão dos valores da emissividade total, citados na literatura, para as ligas de alumínio e para o aço oxidável.

Material	Nível da emissividade	Emissividade total ( $\epsilon_T, \epsilon$ )				
		Fonte	Temperatura (°C)	Valor	Desvio* ao valor médio, (%)	Valores
Alumínio	baixa	[21]	93 - 600	0,11-0,31	182	0,11-0,31
		[22]	200 - 600	0,11-0,19	73	
		[5]	600	0,11-0,19	73	
		[5]	95 -500	0,20-0,31	55	
Aço, ferro	alta	[21]	500 -1200	0,60-0,89	48	0,55-0,95
		[23]	593	0,79	0	
		[24]	-	0,80	0	
		[5]	925 -1115	0,87-0,95	14	
		[5]	935 -1100	0,55-0,61	11	

\* Desvio ao valor médio citado na literatura da emissividade total foi calculado pela fórmula:

$$Desvio = \frac{\epsilon_{máximo} - \epsilon_{mínimo}}{\epsilon_{mínimo}} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

onde:

$\epsilon_{máximo}$  – valor máximo da emissividade total, mostrado na tabela 2.1;

$\epsilon_{mínimo}$  – valor mínimo da emissividade total, mostrado na tabela 2.1.

### 2.1.9 Terminologia sobre a noção de “emissividade total”, utilizada na literatura

A terminologia, atualmente utilizada na literatura sobre a noção da “emissividade total”, não está unificada. Em particular, nos trabalhos científicos [1], [5], [20], [21], [25], [26], etc. são encontrados os seguintes termos:

- emissividade normal das superfícies;
- emissividade total normal;
- medida de semelhança entre um corpo real e o corpo negro de emitir a energia térmica;

- coeficiente da emissão radiativa;
- emissividade radiativa;
- coeficiente de emissividade;
- emissividade infravermelha;
- coeficiente de transferência de calor por radiação;
- coeficiente de emissividade, etc.

Também não existe a terminologia para definir a emissividade total do mesmo corpo de prova para faixas distintas de ondas eletromagnéticas. Portanto, é importante determinar a noção que descreve as perdas térmicas radiantes de uma peça forjada. Em vista deste fato, é introduzida no trabalho apresentado a noção de “valor médio da emissividade total” que tem o seguinte sentido:

- a “emissividade total” ( $\epsilon_T$ ) é determinada para todo espectro das ondas eletromagnéticas irradiadas por corpo à temperatura  $T$ ;
- o “valor médio” da “emissividade total” ( $\epsilon$ ) representa um valor médio aritmético das emissividades totais calculadas para certa faixa de temperaturas da peça forjada.

## 2.2 Coeficiente médio da transferência de calor por convecção (h)

O fenômeno de transferência de calor por convecção, através de um corpo aquecido para o meio ambiente foi conhecido de tempos antigos e foi utilizado, geralmente, para aquecer as casas. O primeiro trabalho científico sobre a convecção foi feito pelo cientista alemão L. Prandtl há mais de 100 anos.

A convecção é um processo de transporte de energia pelo processo combinado da condução de calor para fluido, armazenamento de energia e movimento do fluido aquecido. A energia térmica ( $q_{conv}$ ) perdida pelo corpo de prova, por unidade de tempo, no processo de convecção, pode ser expressa pela Lei de Newton [27]:

$$q_{conv} = h \cdot A_{conv} \cdot (\Delta T) \quad (2.7)$$

onde:

$h$  – coeficiente médio da transferência de calor por convecção, (em  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ );

$A_{conv}$  – área da troca de calor por convecção, (em  $m^2$ );

$\Delta T$  – gradiente das temperaturas entre o corpo resfriado e o fluido do ar, (em  $K$ ).

A expressão da Lei de Newton é simples. Mas o coeficiente  $h$  é extraordinariamente complicado para ser determinado. Conforme a literatura [21], [28], [29], [30] e outros, o valor de  $h$  depende de quantidade grande dos parâmetros do sistema resfriado, como: geometria de sistema resfriado, campo das temperaturas do sistema resfriado, propriedades físicas do ar e das características do escoamento do fluido (laminar ou turbulento), velocidade do fluxo do ar, densidade do fluxo do ar, etc.

A convecção sempre foi utilizada na indústria, mas pesquisas científicas, resultantes nesta área, foram começadas, segundo Francis de Winter [30], somente no ano de 1942 por A. Whiller.

### **2.2.1 Métodos utilizados para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção (h)**

A literatura apresenta os dois métodos principais para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção: os métodos dos cálculos aproximados e o método experimental calorimétrico.

#### **2.2.1.1 Métodos dos cálculos aproximados**

Os métodos dos cálculos aproximados para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção são:

- método teórico;
- métodos empíricos;
- métodos misturados teóricos e empíricos.

O método teórico, para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção, é realizado pelas fórmulas de mecânica dos fluidos que descrevem o movimento das suas camadas limites. As fórmulas são baseadas nas grandezas adimensionais, tais como Prandtl, Reynolds, Nusselt e outros. As grandezas adimensionais estabelecem umas proporções entre as propriedades físicas do fluido examinado, tais como: viscosidade, densidade, condutividade, velocidade, dimensões e o coeficiente da transferência de calor por convecção.

Os métodos empíricos para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção são baseados em fórmulas empíricas aproximadas descritas na literatura [1], [28],

[29] e outros. As fórmulas aproximadas empíricas representadas nestas fontes são bastante simples.

As desvantagens dos métodos descritos são:

- que os métodos sejam aplicados para os corpos examinados, utilizando a geometria simples, como os cilindros, cubos, esferas, placas, tubos, anéis e etc. A pesquisa bibliográfica não encontrou as fórmulas teóricas ou empíricas para executar os cálculos para um corpo real nas condições típicas da indústria.
- a precisão dos cálculos de  $h$  é baixa. Segundo N.N. Prokhorenko, [4], a incerteza dos cálculos de  $h$  é maior do que  $\pm 30\%$ .

### 2.2.1.2 Método experimental calorimétrico para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção ( $h$ )

O esquema principal do método calorimétrico, para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção dum corpo sólido, é mostrado na figura 2.5:

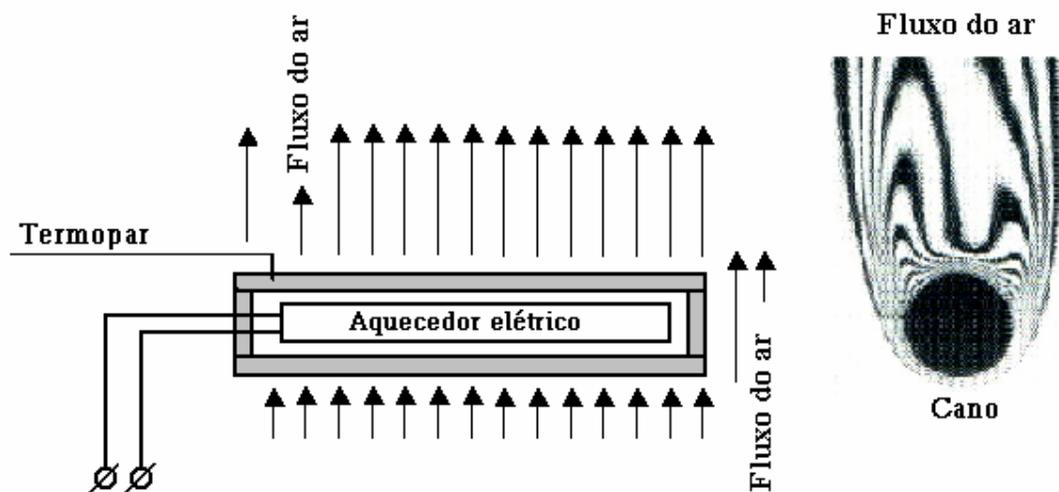


Fig. 2.5 - Montagem experimental típica para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção. Método de cano aquecido [26].

A montagem para determinar coeficiente da transferência de calor por convecção, inclui: um dispositivo de aquisição de dados, os termopares para medir as temperaturas da

superfície do cano, o aquecedor elétrico para manter temperatura constante da superfície do cano.

O método calorimétrico é baseado em cálculos da quantidade de calor, fornecido no cano pela corrente elétrica, e o calor perdido através do cano no meio ambiente por convecção e por radiação. Os cálculos da determinação exata do coeficiente de transferência de calor por convecção são executados pela Lei da conservação de energia aplicada ao corpo examinado e baseiam-se na Lei de Ohm, Lei de Newton e na equação de Stephan-Boltzmann.

Para executar os cálculos do coeficiente de transferência de calor por convecção é necessário obter previamente por qualquer método adicional o valor de  $\varepsilon_T$  da emissividade total da superfície do corpo examinado. Os métodos adicionais atualmente utilizados, para determinar o valor de  $\varepsilon_T$ , são a seguir:

- utilizar o valor de  $\varepsilon_T$  aproximado, dado pela literatura. O método mencionado é comum e é descrito detalhadamente na literatura [26];
- aumentar a emissividade total da superfície do corpo examinado para igualar o valor de  $\varepsilon_T$  a um. O método mencionado é descrito, detalhadamente, na literatura [32];
- determinar o valor de  $\varepsilon_T$  pelo um experimento adicional realizado no vácuo. O método mencionado é descrito detalhadamente no item 2.1.

As desvantagens dos métodos experimentais (calorimétricos), utilizados para determinar o coeficiente da transferência de calor por convecção, são condicionadas pela necessidade de obter, previamente, o valor de  $\varepsilon_T$  da emissividade total da superfície do corpo, e são a seguir:

- o valor aproximado de  $\varepsilon_T$  dado pela literatura fornece o erro nos cálculos posteriores do coeficiente de transferência de calor por convecção;
- o valor de  $\varepsilon_T$  igualado a um fornece o erro nos cálculos posteriores do coeficiente de transferência de calor por convecção, porque a emissividade total de um corpo real sempre é menor do que um. Também, o incremento da emissividade total da superfície muda as propriedades físicas desta superfície e fornece os erros nos dados experimentais obtidos. É problemático avaliar o

erro fornecido nesse método nos cálculos posteriores do coeficiente de transferência de calor por convecção;

- o método experimental de determinar do valor de  $\varepsilon_T$  é baseado em um equipamento especializado para os trabalhos no vácuo.

## 2.2.2 Avaliação da influência do valor aproximado do coeficiente da transferência de calor por convecção, obtido pela literatura, para a precisão dos cálculos térmicos

A influência dos valores aproximados do coeficiente  $h$ , citados na literatura, sobre os resultados dos cálculos térmicos, pode ser avaliada pela Lei da Conservação da Energia, aplicada ao corpo resfriado. O erro possível obtido nos cálculos depende do material e da geometria do corpo e das condições do seu resfriamento [31].

A figura 2.6 mostra os valores dos erros da temperatura teórica do corpo de prova da liga de alumínio e do corpo de prova de aço, resfriados no processo da sua movimentação ao equipamento de forjamento, em função da incerteza do coeficiente  $h$ . Os cálculos foram feitos [31] para as temperaturas iniciais de resfriamento seguintes:

500°C – para o alumínio;

800°C – para o aço.

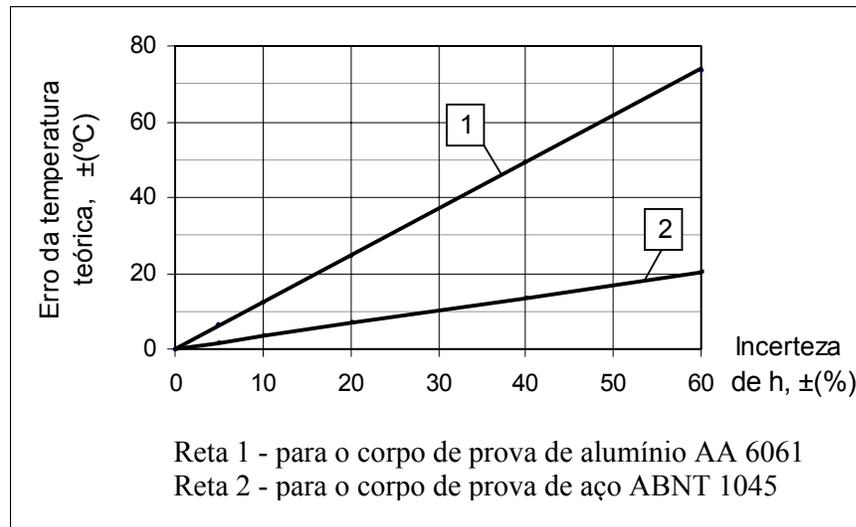


Fig.2.6 – Erro das temperaturas teóricas dos corpos de prova da liga de alumínio AA 6061 e de aço ABNT 1045, resfriados no ar [31].

Os resultados representados na fig.2.6 não dependem da geometria dos corpos de prova a resfriar.

A figura 2.7 mostra os valores dos erros da temperatura teórica dos mesmos corpos de prova, resfriados no processo do forjamento em matriz aberta, em função da incerteza do coeficiente  $h$ . Os cálculos foram feitos [31] para o caso em que as superfícies do resfriamento por condução, por radiação e por convecção foram iguais:

$$A_{\text{cond}} = A_{\text{conv}} = A_{\text{rad}},$$

e para as temperaturas iniciais de resfriamento seguintes:

500°C – para o alumínio;

800°C – para o aço.

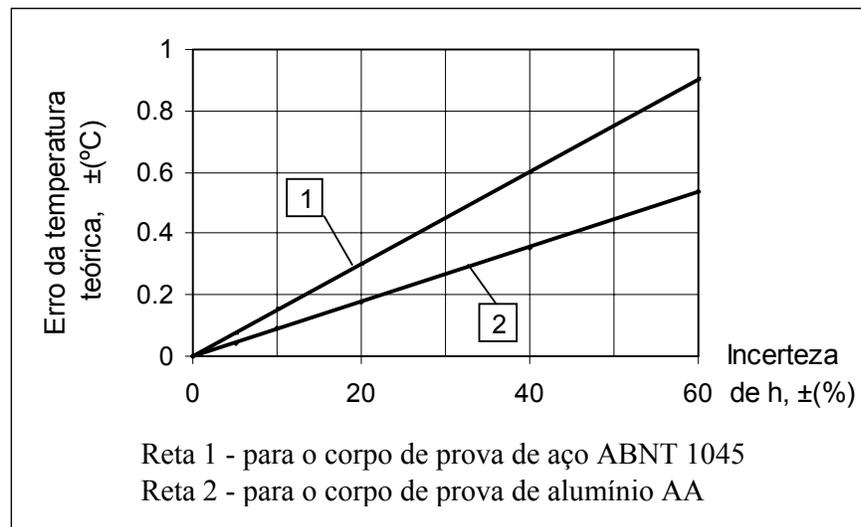


Fig.2.7 – Erro das temperaturas teóricas dos corpos de prova da liga de alumínio AA 6061 e de aço ABNT 1045, resfriados em matriz aberta [31].

### 2.3 Propriedades físicas e a composição química dos materiais que foram utilizados no trabalho representado

A composição química e propriedades físicas do aço ABNT 1045 que é equivalente ao aço ABNT 1045 e ao aço ao carbono russo “Сталь 45” são representadas nas tabelas 2.2, 2.3 e 2.4:

Tab. 2.2 - Composição química do aço ABNT 1045  
e do aço ao carbono russo “Сталь 45”.

Elemento químico	-	C	Si	Cu	Mn	P(max)	S(max)
ABNT 1045 [33]	%	0,42-0,50	0,1-0,35	-	0,6-0,9	0,03-0,04	0,035- 0,05
Сталь 45 [34]	%	0,42-0,50	0,17-0,37	0,25	0,5-0,8	0,035	0,04

Tab. 2.3 - Propriedades físicas do aço carbono russo “Сталь 45” [34]  
que é equivalente ao aço ABNT 1045.

Temperatura	°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Densidade	$\frac{kg}{m^3}$	7826	7799	7769	7735	7698	7662	7625	7587	7595
Coefficiente de Expansão Térmica Linear	$\frac{10^{-6}}{°C}$	11,9	11,9	12,7	13,4	14,1	14,6	14,9	15,2	-
Calor Específico	$\frac{J}{kg \cdot °C}$	473	473	498	515	536	583	578	611	720
Condutibilidade Térmica	$\frac{W}{m \cdot °C}$	48	48	47	44	41	39	36	31	27

Tab. 2.4 - Coeficiente da emissividade total de aço carbono e de ferro.

Coeficiente da Emissividade Total ( $\epsilon_T$ )	Condições da medição	Temperatura, (°C)	Fonte
0,78	Aço X5CrNi18-9 oxidado	800-1200	[1]
0,79	Aço oxidado	593	[23]
0,80	Condições de forjamento do aço carbono	-	[24]
0,80	Chapa de aço	-	[28]
0,80-0,82	Chapa de aço	-	[5]
0,85-0,89	Ferro oxidado	500-1200	[5]
0,89-0,90	Aço ao carbono AISI C1020 oxidado	800	[3]

A composição química e propriedades físicas da liga do alumínio AA 6061 são representadas nas tabelas 2.5, 2.6 e 2.7:

Tab.2.5 - Composição química da liga de alumínio AA 6061 [35].

Elemento químico	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Porcentagem do elemento na liga	0,4-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,80-1,20	0,04-0,35	0,25	0,15

Tab. 2.6 - Propriedades físicas da liga de alumínio AA 6061.

Parâmetro	Unidade	Valor da literatura	Fonte
Densidade	$\frac{kg}{m^3}$	2700, para 20°C	[35]
		2700, para (604 – 615)°C	[36]
Calor Específico	$\frac{J}{kg \cdot K}$	896 (a 100°C)	[35]
		920 (para 604°C)	[36]
		1030 (para 607°C)	[36]
		1200 (para 615°C)	[36]
Condutibilidade Térmica	$\frac{W}{m \cdot K}$	180	[35]
		180 para (604-615) °C	[36]
Coefficiente de Expansão Térmica Linear	$\frac{10^{-6}}{^{\circ}C}$	23,6	[35]
Temperatura da fusão	°C	582 – 652	[35]

Tab. 2.7 - Coeficiente da emissividade total de alumínio e seus ligas.

Material	Coeficiente da Emissividade Total	Condições de medição	Temperatura, (°C)	Fonte
Alumínio	0,11-0,19	Oxidado	600	[5]
Alumínio	0,11-0,19	Oxidado	600	[23]
Alumínio	0,20-0,31	Muito oxidado	150-504	[28]
Alumínio	0,20-0,33	Muito oxidado	100-500	[25]
Liga AA 3003	0,41	Oxidado	560	[3]
Liga 75 ST	0,16-0,22	Oxidado	230-500	[5]

### 3. MODELO MATEMÁTICO DO RESFRIAMENTO DE UM CORPO

A literatura [5] mostra a impossibilidade de medir exatamente o valor do coeficiente médio da emissividade total em qualquer experimento. Para determinar o valor mencionado é necessário obter previamente os dados experimentais correspondentes e elaborá-los por método matemático. O método matemático escolhido depende do tipo dos dados experimentais.

#### 3.1 Obtenção da equação básica para descrever o processo de transferência de calor através de corpo forjado para a ferramenta e meio ambiente

Com fim de obter a equação matemática para o cálculo do valor médio da emissividade total da superfície do corpo forjado, consideramos o processo do seu resfriamento mostrado esquematicamente na figura 3.1:

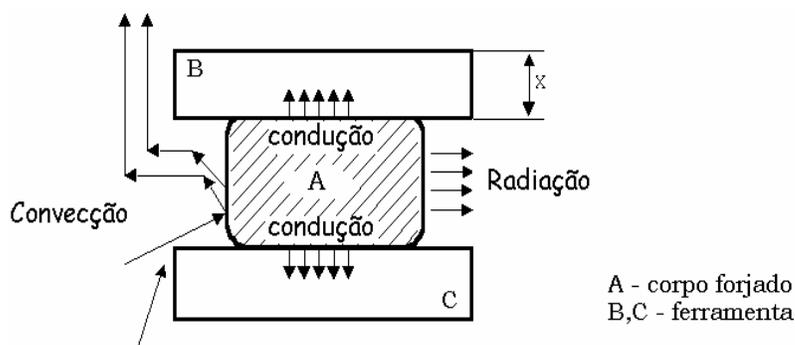


Fig. 3.1- Esquema do resfriamento do corpo de prova nos processos combinados de radiação, convecção e condução.

O modelo matemático do resfriamento do corpo mostrado na figura 3.1 é baseado na Lei da Conservação de Energia do sistema termodinâmico aplicada ao processo de resfriamento deste corpo. A variação, por unidade de tempo, da energia térmica do corpo de prova é igual à soma das energias perdidas, por unidade de tempo, nos processos de resfriamento do corpo por condução, irradiação e convecção, e pode ser escrita pela expressão seguinte:

$$Q = q_{cond} + q_{rad} + q_{conv} \quad (3.1)$$

onde:

$q_{cond}$  - é energia térmica ( $W$ ) perdida pelo corpo por unidade de tempo, no processo de condução, e pode ser expressa pela Lei de Fourier [2] na forma:

$$q_{cond} = -k \cdot A_{cond} \cdot \frac{dT_x}{dx} \quad (3.2)$$

$q_{rad}$  - é energia térmica perdida pelo corpo de prova, por unidade de tempo, no processo de irradiação, e pode ser expressa pela equação de Stefan-Boltzman [5], [25], aplicada para o caso de transferência de calor radiante para o meio ambiente da temperatura  $T_\infty$  na forma:

$$q_{rad} = \sigma \cdot A_{rad} \cdot \varepsilon_T \cdot (T^4 - T_\infty^4) \quad (3.3)$$

$q_{conv}$  - é energia térmica perdida pelo corpo de prova, por unidade de tempo, no processo de convecção, e pode ser expressa pela Lei de Newton [2] na forma final de:

$$q_{conv} = h \cdot A_{conv} \cdot (T - T_\infty) \quad (3.4)$$

Levando em conta as equações (3.2), (3.3) e (3.4), é possível reescrever a expressão (3.1) na forma da equação:

$$\begin{aligned} m \cdot C_p \cdot \frac{dT_m}{dt} = \\ = -k \cdot A_{cond} \cdot \frac{dT_x}{dx} + \sigma \cdot A_{rad} \cdot \varepsilon_T \cdot (T^4 - T_\infty^4) + h_T \cdot A_{conv} \cdot (T - T_\infty) \end{aligned} \quad (3.5)$$

onde:

$m$  - massa do corpo examinado, (kg);

$C_p$  - calor específico do material do corpo examinado, (J/kg\*K);

$k$  - condutividade térmica do material através do qual o calor flui por condução, (W/m\*K);

$\sigma$  - constante de Stefan-Boltzman, (W/m<sup>2</sup>\*K<sup>4</sup>);

$A_{cond}$  - área de transferência de calor por condução, (m<sup>2</sup>);

$A_{rad}$  - área da superfície irradiante, (m<sup>2</sup>);

$A_{conv}$  - área de transmissão de calor por convecção, (m<sup>2</sup>);

$t$  - tempo de resfriamento do corpo de prova, (s);

$T$  – temperatura da superfície livre resfriada por radiação e por convecção, (K);

$T_m$  – temperatura média do corpo, (K);

$T_\infty$  – temperatura do meio ambiente, que é igual à temperatura do ar, (K);

$\frac{dT_k}{dx}$  – gradiente de temperatura  $T_k$  na direção  $x$  do fluxo de calor, (K/m);

$\frac{dT_m}{dt}$  – taxa de resfriamento do corpo, (K/s);

$\varepsilon_T$  – coeficiente de emissividade total da superfície irradiante, (-);

$h_T$  – coeficiente de transferência de calor por convecção que depende [2] da temperatura  $T$ , da geometria  $G$  e da velocidade  $\Phi$  do fluido de ar do sistema resfriado, (W/m<sup>2</sup>\*K);

Os valores possíveis das funções  $\varepsilon_T = \varepsilon_T(T)$  e  $h_T = h_T(T, G, V)$  são definidos pelo modelo físico do processo de resfriamento e são seguintes:

$$0 < \varepsilon_T(T) < 1;$$

$$h_T(T, G, V) > 0.$$

A equação (3.5) será utilizada como base para os cálculos do valor médio do coeficiente da emissividade total da superfície irradiante e do coeficiente de transmissão de calor por convecção desta superfície para o meio ambiente;

A equação (3.5) básica pode ser utilizada para determinar os parâmetros térmicos de um corpo sólido, resfriado nos condições de ar ou de vácuo. No caso de vácuo a equação mencionada transforma-se na forma da equação (2.4) do item 2.1.3, descrita na literatura [5].

### 3.2 Análise da estrutura da equação básica

As constantes  $[\sigma, C_p]$  da equação básica são dados da literatura;

Os parâmetros  $[m, A_{rad}, T_\infty, A_{conv}]$  da equação básica são dados do planejamento dos experimentos;

As variáveis  $[T_m, T, t]$  da equação básica são as variáveis dos experimentos;

As funções  $[\{\frac{dT_m}{dt}\}, \{-k \cdot A_{cond} \frac{dT_k}{dx}\}, \varepsilon_T(T), h_T(T, G, \Phi)]$ , são desconhecidas.

### 3.3 Possibilidades de determinar as soluções exatas da equação básica

Para obter as soluções da equação básica, que inclui quatro incógnitas, é preciso diminuir a quantidade das incógnitas dela.

As duas funções  $\left[ \left\{ \frac{dT_m}{dt} \right\}, \left\{ -k \cdot A_{cond} \frac{dT_k}{dx} \right\} \right]$  desconhecidas de quatro podem-se obter

pelos experimentos do resfriamento dos corpos de prova. Assim, a fórmula que descreve o processo de resfriamento dos corpos de prova pode ser expressa como uma equação de duas incógnitas. A equação deste tipo tem a quantidade infinita das soluções possíveis.

### 3.4 Simplificações do modelo matemático

Para escolher as soluções verdadeiras da equação (3.5) básica do conjunto infinito deles, é preciso simplificar o modelo matemático do resfriamento de corpo de prova. A simplificação do modelo matemático está baseado nas suposições que as funções  $h_T(T, G, \Phi)$  e  $\varepsilon_T(T)$  são constantes para o intervalo das temperaturas  $[T_1, T_2]$  do experimento realizado, e eles podem ser representadas na forma a seguir:

$$h_T(T, G, \Phi) = h = \text{constante};$$

$$\varepsilon_T(T) = \varepsilon = \text{constante};$$

onde:

$h$  - coeficiente médio de transferência de calor por convecção;

$\varepsilon$  - valor médio da emissividade total do material examinado.

### 3.5 Abordagem para escolher as soluções verdadeiras da equação básica

1). Uma simulação computacional do processo de resfriamento do corpo de prova, baseada nos dados experimentais, nos dados da literatura e nos dados próprios do programa especializado da simulação.

2). Solução analítica baseada no modelo simplificado matemático, nos dados experimentais e nos dados da literatura.

### 3.6 Procedimento para solução analítica

O procedimento para realizar a solução analítica representa o desenvolvimento da abordagem dos cálculos, descrita em linhas gerais na literatura [1]. O procedimento inclui os cinco passos principais a seguir:

1. Escolher qualquer valor possível de  $\varepsilon$  do material usado nos experimentos. Os valores possíveis da emissividade total ficam na faixa  $[0, 1]$ . As referências de literatura podem precisar os valores possíveis de  $\varepsilon$ ;
2. Incluir o valor escolhido de  $\varepsilon$  na equação (3.5) básica e calcular os valores positivos da função  $h_T(T, G, \Phi)$ ;
3. Calcular o valor ( $h$ ) médio de todos os valores positivos da função  $h_T(T, G, \Phi)$  obtidos no passo 2;
4. Incluir o par dos valores  $[h, \varepsilon]$ , obtidos nos passos 1 e 3, na equação (3.5) básica e calcular a curva teórica do resfriamento do corpo de prova;
5. Repetir o passo 4 para os pares diferentes  $[h, \varepsilon]$ , e obter a família das curvas teóricas do resfriamento do corpo de prova;
6. Escolher a curva teórica obtida nos passos 3 e 4, que tem o valor mínimo do desvio padrão da curva experimental. Aceitar os valores de  $\varepsilon$  e de  $h$  dessa curva como a solução ótima da equação (3.5) básica.

Os valores dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$  podem ser determinados pelo procedimento apresentado com a precisão desejável.

#### **4. TÉCNICA DESENVOLVIDA PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS TÉRMICOS $\varepsilon$ E $h$ DE UM CORPO SÓLIDO**

A técnica utilizada neste trabalho para determinar os parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$  de um corpo sólido (de metal, de liga de metal) é uma inovação. Os parâmetros térmicos determinados pela inovação são a seguir:

- valor médio ( $\varepsilon$ ) da emissividade total da superfície de corpo de prova;
- valor médio do coeficiente ( $h$ ) de transferência de calor por convecção através de corpo de prova para o ar.

A inovação é baseada em componentes seguintes:

- equipamento para preparar o corpo de prova, executar o experimento, registrar e elaborar os dados experimentais;
- banco de dados de propriedades físicas do corpo de prova;
- método de elaborar dos dados experimentais.

##### **4.1 Equipamento para determinar dos parâmetros térmicos de $\varepsilon$ e de $h$**

O equipamento necessário para determinar os parâmetros térmicos de  $\varepsilon$  e de  $h$  é seguinte:

- equipamento convencional para usinagem, como um torno e furadeira;
- ferramentas comuns para medições, como um paquímetro, micrômetro, balança;
- equipamento convencional para aqueces o corpo de prova, como um forno;
- sensores comuns de medição de temperatura, como um termopar;
- dispositivo convencional para registrar as indicações dos sensores de temperatura;
- computador com um pacote de programas comuns computacionais para elaborar os dados;
- programa computacional da matemática convencional.

##### **4.2 Banco de dados de propriedades físicas do corpo de prova**

O valor do calor específico de corpo de prova é o dado necessário para o método desenvolvido neste trabalho. Esse parâmetro pode ser obtido pela literatura.

### 4.3 Método para elaborar os dados experimentais

O método de elaborar dos dados experimentais é baseado em passos seguintes:

1. Determinação dos componentes da equação (3.5) básica do “Modelo matemático do resfriamento de um corpo” (p.22), que descreve o processo do resfriamento do corpo de prova. Estes componentes são seguintes:
  - taxa de resfriamento do corpo de prova;
  - perdas térmicas condutivas através do corpo de prova para o meio ambiente;
  - pares dos parâmetros  $[\varepsilon, h]$  térmicos.
2. Cálculos de uma família das curvas do resfriamento do corpo de prova teóricas. Os cálculos são baseados na equação (3.5) básica, e são executados para cada par dos parâmetros  $[\varepsilon, h]$  térmicos.
3. Escolher a curva teórica do resfriamento que tem o valor mínimo do desvio padrão da curva do resfriamento experimental. Aceitar os valores de  $\varepsilon$  e de  $h$  dessa curva como os parâmetros térmicos determinados.

### 4.4 Organograma da determinação dos valores dos coeficientes de $\varepsilon$ e de $h$

A organograma da determinação do coeficiente  $h$  é mostrada na figura 4.1:

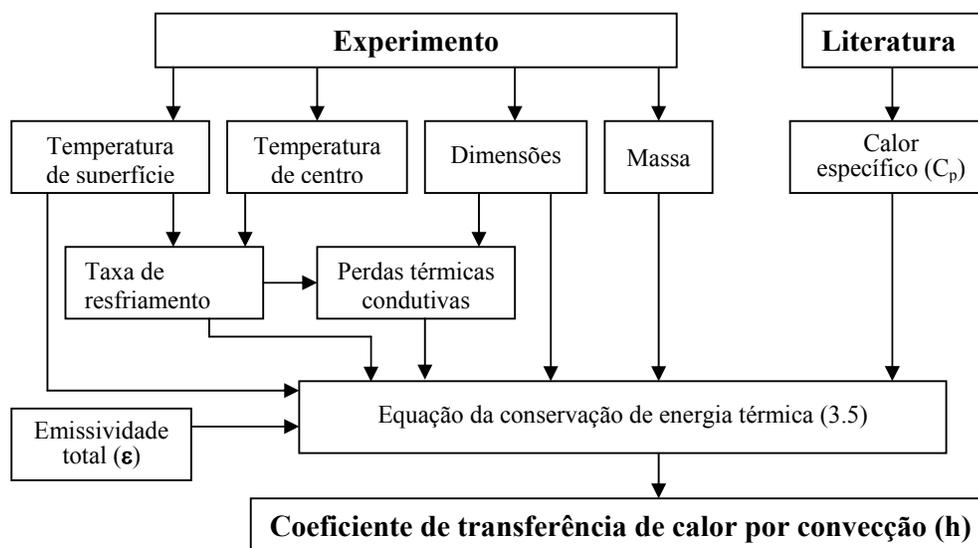


Fig. 4.1 - Organograma da determinação, através da técnica desenvolvida, do coeficiente da transferência de calor por convecção

A organograma da determinação da curva teórica do resfriamento é mostrada na figura 4.2:

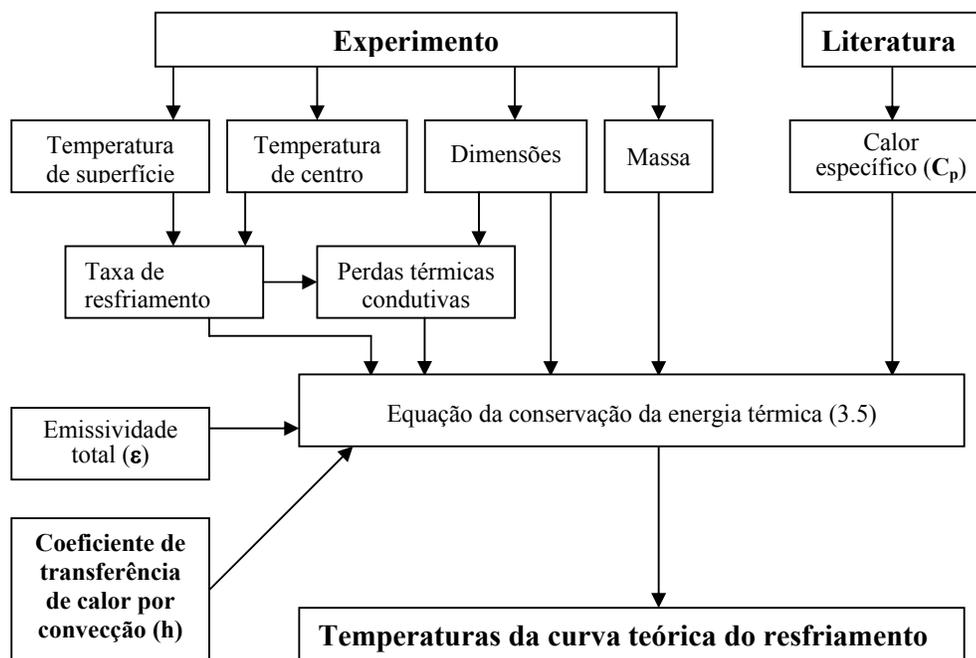


Fig. 4.2 - Organograma da determinação, através da técnica desenvolvida, das temperaturas da curva teórica do resfriamento de um corpo sólido.

#### 4.5 Precisão da determinação dos parâmetros térmicos de $\epsilon$ e de $h$

A precisão da determinação dos parâmetros térmicos de  $\epsilon$  e de  $h$  é definida pela:

- exatidão do equipamento utilizado para medir da temperatura, massa e dimensão do corpo de prova;
- exatidão do valor do calor específico do corpo de prova.

## 5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL PARA A DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE $\varepsilon$ E DE $h$

### 5.1 Equipamento e materiais utilizados nos experimentos

O equipamento e materiais utilizados nos experimentos, para determinar os parâmetros térmicos, são representados na tabela 5.1:

Tab. 5.1 - Equipamento e materiais utilizados nos experimentos.

nº	Equipamento (material)	Modelo (número)	Fabricante	Características técnicas
1	Equipamento de aquisição de dados	Spider-8	Hottinger Baldwin Messtechnik HmbH	Incerteza da temperatura: $\pm 5^\circ\text{C}$
2	Balança	Semi-analítica	Marte Balanço e Aparelhos de Precisão	Faixa: [0-500]g Precisão: 0,000g
3	Forno	K-1252F, N°97110132	Heraeus instrument	Limite: $1250^\circ\text{C}$ Potência: 5KW
4	Micrômetro	Feinmesszeug-fabrik-SUHL	TGL 15048/I	Faixa: [25-50] mm Precisão: 0,01mm
5	Micrômetro	Feinmesszeug-fabrik-SUHL	TGL 15048/I	Faixa: [50-75] mm Precisão: 0,01mm
6	Paquímetro	N° 9223642	Mitutoyo	Faixa: [0-150] mm Precisão: 0,05mm
7	Termopar	Type "K" Rössel 9-2339 ALSTE-KB 1,5-2500-2	Rössel Messtechnik GmbH & C	Faixa: [-200, $1300^\circ\text{C}$ ]. Incerteza: para [0, $1200^\circ\text{C}$ ]: $2,2^\circ\text{C}$ até 0,75% de temperatura.
8	Aço	ABNT 1045	GERDAU	Barra em quente
9	Liga de alumínio	AA 6061	ASA Alumínio	Barra. Temperatura de fusão: ( $580-650^\circ\text{C}$ )
10	Alumínio em pó	-	Vetec Química Fina, LTDA	Puríssimo: 99,5%
11	Isolante	Amianto	-	Placa. Resistência térmica $>1250^\circ\text{C}$

## **5.2 Calibração do equipamento para medir as temperaturas**

A calibração do equipamento de medições das temperaturas é necessária para alcançar maior precisão e para reduzir as incertezas das medições. O método da calibração, realizado neste trabalho, foi baseado no procedimento [37] do Laboratório da Termometria do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO).

Na calibração, foram utilizados os pontos fixos das temperaturas da fusão do alumínio puríssimo e do congelamento da água destilada. Estes pontos foram escolhidos em concordância com a Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90), descrita na literatura [38]. Aproveitamento dos pontos fixos recomendados pela ITS-90 fornece a precisão máxima da calibração.

A calibração do equipamento foi feita com base nas admissões seguintes:

- as propriedades termoelétricas dos termopares são lineares;
- as propriedades do sistema de aquisição dos dados são semelhantes às propriedades termoelétricas dos termopares, e também são lineares.

As temperaturas medidas no processo da calibração são aproveitadas, apenas, para construir a equação linear que expressa, corretamente, os valores das temperaturas verdadeiras em relação às indicações do aparelho.

Adiante, será mostrado, que os erros, inseridos nos cálculos por causa da admissão sobre as propriedades lineares do sistema de aquisição dos dados, poderão ser eliminados dos resultados da calibração.

### **5.2.1 Descrição dos experimentos da calibração do sistema de aquisição dos dados**

O equipamento utilizado nessa pesquisa para medir e registrar as temperaturas é uma junção de termopares, fios de ligação, conectores, e de dispositivo “Spider-8”. O equipamento foi configurado para adquirir as medidas de temperaturas nos pontos fixos.

A calibração do sistema de aquisição dos dados foi feita para o intervalo das temperaturas usadas nos experimentos gerais: (200 ÷ 1100) °C. Para realizar a calibração foram escolhidos os pontos fixos seguintes:

0,01°C – temperatura do ponto triplo da água pura;

660,3°C – temperatura de fusão ou solidificação de alumínio com pureza a 99,9% [38].

O esquema da calibração realizada dentro do local com a temperatura 0,01°C é representado na figura 5.1:

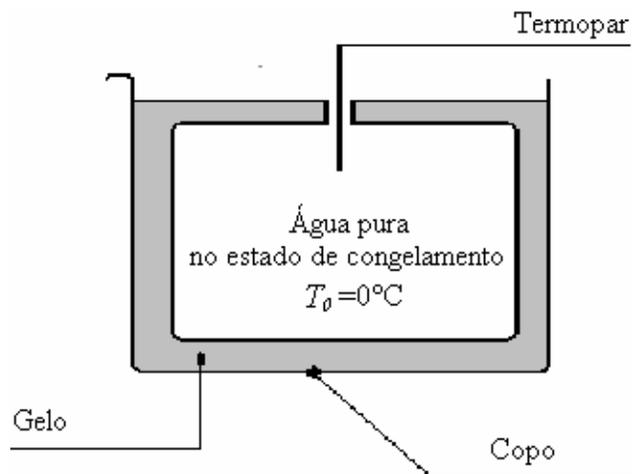


Fig. 5.1 - Esquema da calibração do equipamento no ponto triplo da água.

A caixa de gelo foi utilizada no experimento para garantir a temperatura da água igual ao zero  $^\circ\text{C}$ . A espessura das paredes de gelo foi igual a 10 mm.

O esquema da calibração realizada dentro do local com a temperatura da fusão de alumínio é representado na figura 5.2:

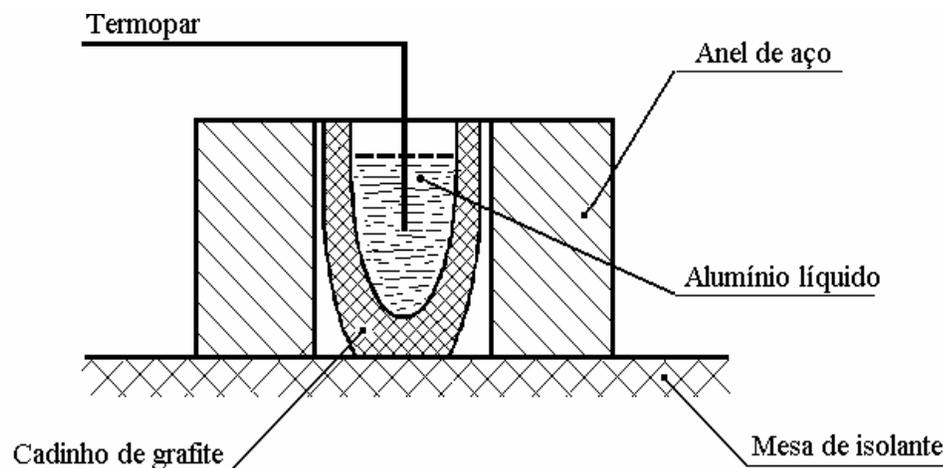


Fig. 5.2 - Esquema da calibração do equipamento no ponto da fusão de alumínio.

O anel de aço foi utilizado no experimento como um acumulador do calor, com fim de diminuir a velocidade do resfriamento do alumínio líquido.

### 5.2.2 Dados obtidos nos experimentos de calibração

Os dados primários obtidos nos experimentos\* da calibração do equipamento são mostrados na tabela 5.2:

Tab. 5.2 - Dados obtidos nos experimentos da calibração do equipamento.

Equipamento	Número do termopar	Número do canal ligado	Indicações ( $T_i$ ) do “Spider-8”	
			No ponto triplo da água (0,01°C)	Na temperatura da fusão do alumínio (660,3°C)
Termopares, dispositivo “Spider-8”, conectores e fios de ligação	1	6	1,52 ± 0,53	642,83± 0,35
	2	7	2,31 ± 0,38	647,52± 0,37
	3	6	0,8 ± 0,42	634,41± 0,31
	1	7	2,52 ± 0,27	641,67± 0,43
	2	6	1,21 ± 0,69	638,44± 0,38
	3	7	0,31 ± 0,50	632,49± 0,41
	4	6	0,14 ± 0,24	646,89± 0,45
	5	7	2,31 ± 0,38	635,15± 0,40

\* Ensaios no ponto triplo da água foram realizados com frequência 100/seg no período do tempo de 20 seg.;

\* Ensaios no ponto de solidificação do alumínio foram realizados com frequência (1-0,1)/seg no período do tempo de 600 seg;

\* Incertezas das indicações de temperaturas foram obtidas por meio de análise dos gráficos das temperaturas registradas nos ensaios.

As variações dos valores das temperaturas indicadas pelo “Spider-8” são de dois tipos: macrovariações e microvariações.

As macrovariações são iguais a  $\pm [0,7 \quad 7,5]$  °C para as temperaturas  $[0 \text{ °C} - 660] \text{ °C}$  medidas pelo aparelho. As macrovariações das indicações do “Spider-8” se aumentam proporcionalmente à temperatura medida e dependem de qualquer interrupção do processo de aquisição de dados. Por isso, nunca é possível obter as indicações iguais para quaisquer experimentos idênticos no caso de interromper o processo de aquisição de dados, passando de um experimento para outro.

Quanto às microvariações, não foi observada nenhuma dependência delas de alguns parâmetros ou condições de experimentos. Os valores das microvariações são iguais a  $\pm 0,7 \text{ °C}$  para o intervalo  $[0 - 660] \text{ °C}$  de temperaturas indicadas pelo equipamento mencionado.

As macrovariações e microvariações das indicações do “Spider-8” são mostradas, na forma gráfica, nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5.

As macrovariações e microvariações das indicações do “Spider-8”, obtidas no ponto de congelamento da água, estão mostradas na figura 5.3:

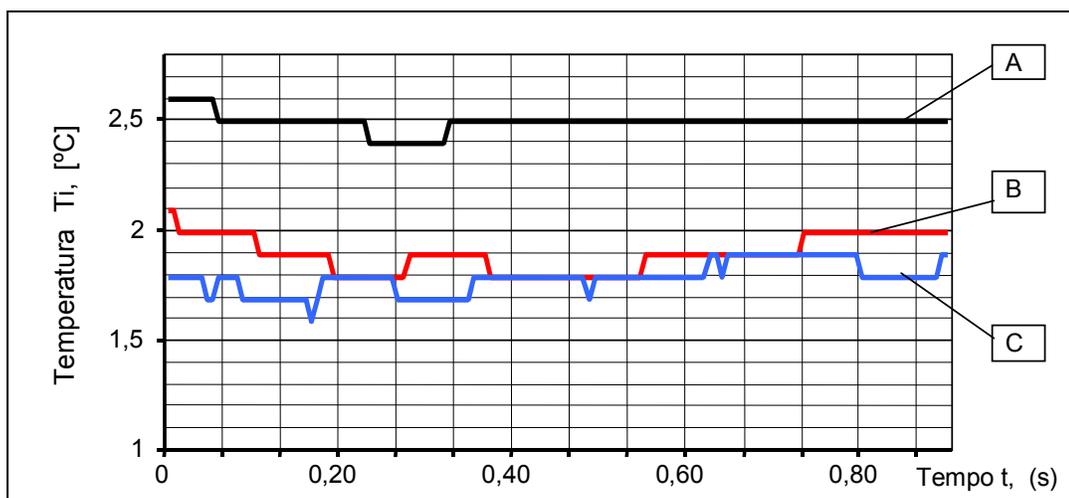


Fig. 5.3 - Macro- e microvariações das indicações  $T_i$  do equipamento de aquisição de dados “Spider-8”, obtidas no ponto de congelamento de água.

onde:

A – curva do experimento 1;

B – curva do experimento 2;

C – curva do experimento 3.

As macrovariações das indicações do “Spider-8”, obtidas no ponto de fusão do alumínio, são mostradas na figura 5.4:

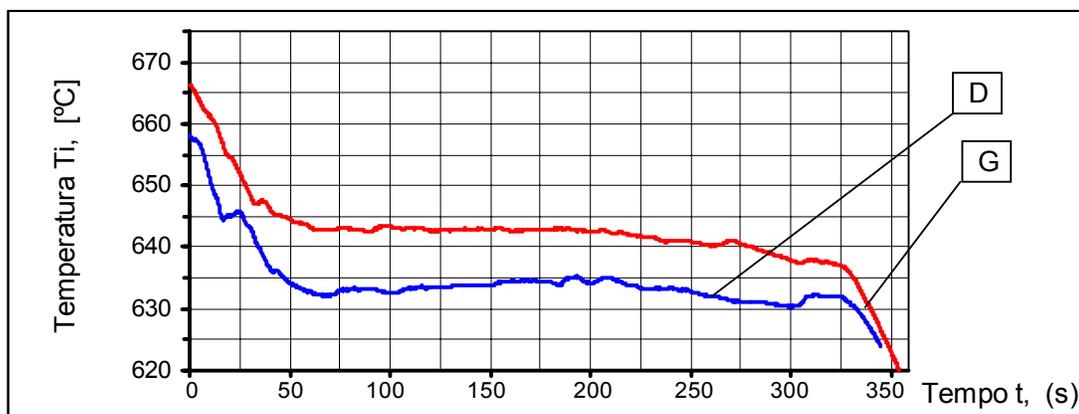


Fig. 5.4 - Macrovariações das indicações  $T_i$  do “Spider-8”,  
obtidas no ponto de fusão do alumínio.

onde:

D – curva da solidificação do alumínio no experimento 4;

G – curva da solidificação do alumínio no experimento 5;

As microvariações das indicações do “Spider-8”, obtidas no ponto de fusão do alumínio, são mostradas na figura 5.5:

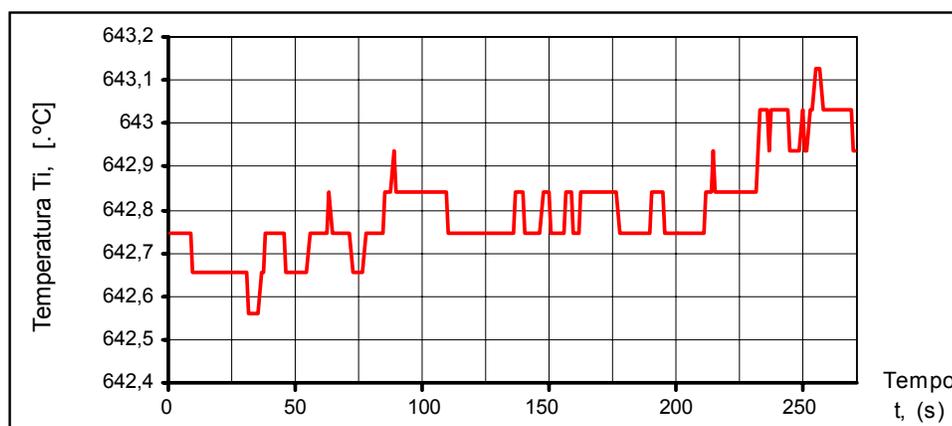


Fig. 5.5 - Microvariações das indicações  $T_i$  do “Spider-8”,  
obtidas no ponto de fusão do alumínio.

### 5.2.3 Fórmula da calibração do equipamento

Todos os valores das temperaturas  $T_i$ , indicadas pelo equipamento de aquisição de dados “Spider-8”, ficam num corredor dos valores, independente do número de termopar e número de canal ligado para aquisição de dados. A dispersão destas temperaturas  $T_i$  é mostrada na figura 5.6:

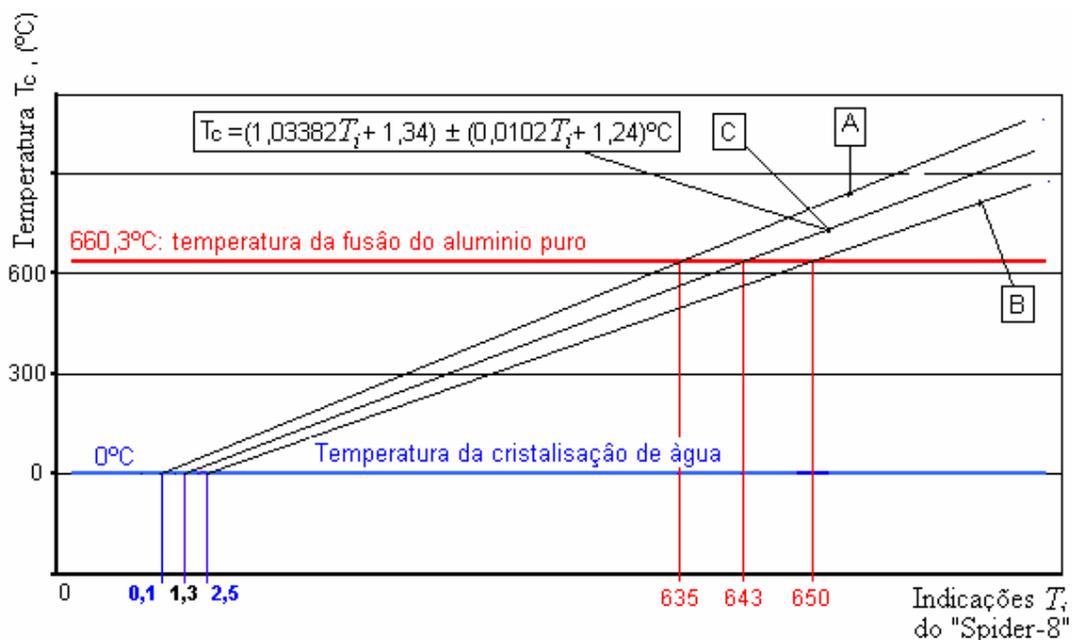


Fig. 5.6 - Dispersão das temperaturas  $T_i$ , indicadas pelo equipamento de aquisição de dados “Spider-8”, num corredor das temperaturas  $T_c$  verdadeiras.

onde:

660,3 °C - temperatura da fusão do alumínio;

0°C - temperatura do congelamento da água;

A) - limite superior da dispersão das temperaturas  $T_i$  indicadas pelo “Spider-8”.

B) - limite inferior da dispersão das temperaturas  $T_i$  indicadas pelo “Spider-8”.

C) - valor médio das temperaturas  $T_i$  indicadas pelo “Spider-8”.

Os valores médios das temperaturas, indicadas nos pontos fixos, são os seguintes:

no ponto triplo da água:  $T_{i(\text{água})} = 1,3 \pm 1,2$ ;

no ponto de solidificação do alumínio:  $T_{i(\text{Al})} = 643 \pm 7,5$ .

Os valores médios das temperaturas  $T_i$ , indicadas pelo “Spider-8”, foram utilizados para construir a fórmula principal da converção destas temperaturas nas temperaturas  $T_c$  verdadeiras, em °C. Essa fórmula da calibração é a seguir:

$$T_c = [(1,03382 * T_i + 1,34) \pm (0,0102 * T_i + 1,24)] \text{ °C} \quad (5.1)$$

onde:

$T_c$  - valor da temperatura verdadeira, em °C;

$T_i$  - valor da temperatura indicada pelo “Spider-8”, em unidades deste equipamento.

A equação da reta do limite superior do corredor é a seguinte:

$$T_{c(\text{superior})} = (1,04412 T_i - 0,1)^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

A equação da reta do limite inferior do corredor é a seguinte:

$$T_{c(\text{inferior})} = (1,0236 T_i - 2,5)^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

A equação da incerteza  $\dot{i}$  das indicações do “Spider-8”, é a seguinte:

$$\dot{i} = \pm (0,0102 T_i + 1,24)^\circ\text{C} \quad (5.4)$$

A figura 5.7 mostra analiticamente e graficamente o valor da incerteza  $\dot{i}$  da indicação do “Spider-8”, calculado em função da temperatura  $T_i$  indicada:

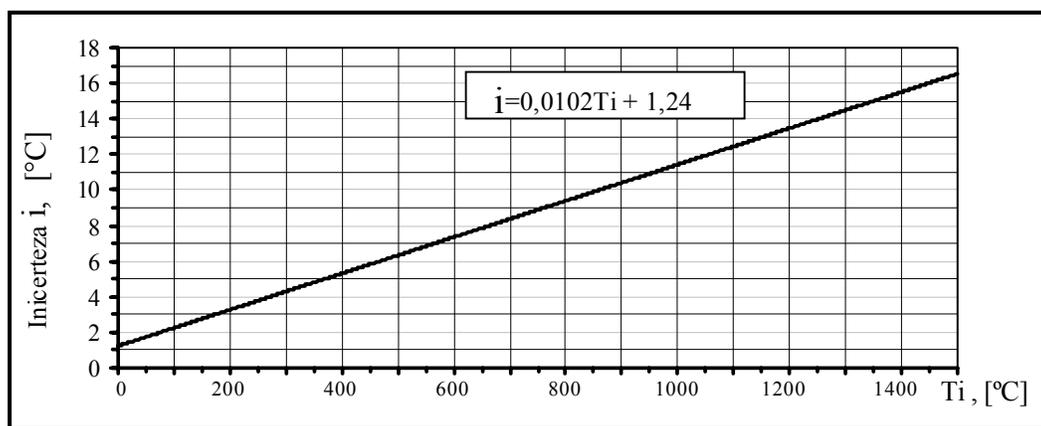


Fig. 5.7 - Incerteza  $\dot{i}$  da indicação do equipamento de aquisição de dados o “Spider-8”, calculada como função da temperatura  $T_i$  indicada.

#### 5.2.4 Avaliação de erro inserido no cálculo das temperaturas pelo aproveitamento da equação linear de calibração

O fabricante dos termopares, que foram usados nos experimentos, declara [39] que as suas propriedades termoelétricas são lineares nos intervalos pequenos (até dez graus) de temperaturas.

Com fim de obter o valor do erro inserido no cálculo das temperaturas pelo aproveitamento da equação linear de calibração para as temperaturas calculadas  $T_c$ , é preciso fazer os passos seguintes:

- calcular o valor do potencial termoelétrico em forma da função linear da temperatura;

- comparar a temperatura  $T_t$  tomada da tabela, que corresponde ao potencial calculado, com a temperatura  $T_c$  aproveitada nos cálculos; a diferença das temperaturas ( $T_t - T_c$ ) é um erro causado pela admissão sobre as propriedades lineares do sistema de aquisição dos dados.

Para construir a função linear que relaciona o valor do potencial termoeletrico à temperatura, escolhemos na tabela [40] os pontos com as temperaturas  $0,01^\circ\text{C}$  e  $660,323^\circ\text{C}$ . Os valores dos potenciais termoeletricos que correspondem às temperaturas escolhidas estão representados na tabela 5.3:

Tab. 5.3 - Valores das potenciais termoeletricos e os valores das temperaturas correspondentes.

$T_0$	0,01	$^\circ\text{C}$
$T_{660}$	660,3	$^\circ\text{C}$
$v_0$	0	mV
$v_{660}$	27,461	mV

onde:

$T_0 = 0,01^\circ\text{C}$ , temperatura no ponto triplo de água;

$T_{660} = 660,3^\circ\text{C}$ , temperatura no ponto da fusão do alumínio;

$v_0 = 0\text{ mV}$ , potencial de termopar termoeletrico, que corresponde à temperatura de  $0^\circ\text{C}$ ;

$v_{660} = 27,46\text{ mV}$ , potencial de termopar termoeletrico, que corresponde à temperatura de  $660,3^\circ\text{C}$ .

A função linear obtida com base nesses pontos é a seguinte:

$$v_c = 0,0416 \times T_C \quad (5.5)$$

onde:

$T_C$  – valor da temperatura utilizado nos cálculos, em  $^\circ\text{C}$ ;

$v_c$  – valor do potencial de termopar termoeletrico calculado, em mV.

Substituindo nas equações (6.5) os valores das temperaturas  $T_c$ , tomados do intervalo  $(200 \div 1000)^\circ\text{C}$ , obtiveram-se as temperaturas  $T_t$  correspondentes. Como o resultado dos cálculos realizados é o valor do erro ( $T_t - T_c$ ), causado pela admissão sobre as propriedades lineares de termopares nos intervalos grandes de temperaturas cujo gráfico é representado na figura 5.8:

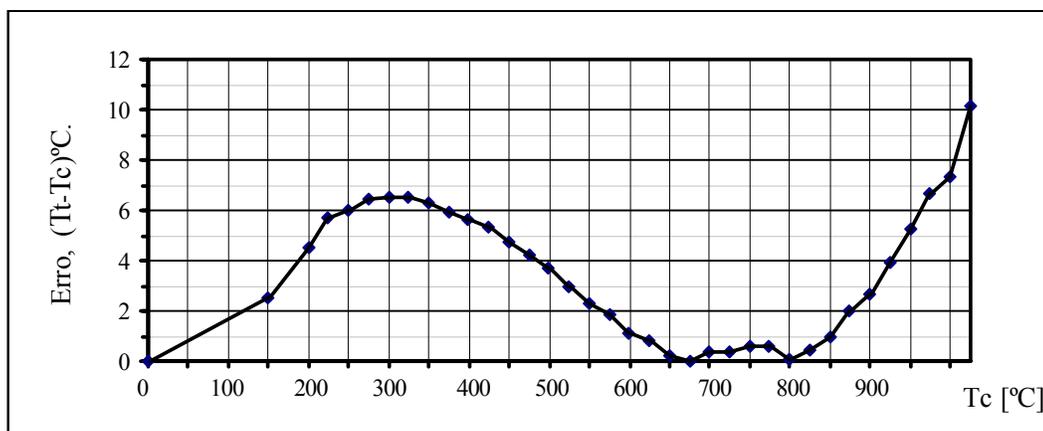


Fig. 5.8 - Erro  $(T_t - T_c)$  em função da temperatura  $T_c$  utilizada nos cálculos.

### 5.2.5 Comparação da calibração feita com os dados técnicos do “Spider-8”

O equipamento para medida de temperaturas está baseado no equipamento de aquisição de dados “Spider-8”. A incerteza  $i$  das medições de equipamento não calibrado é definida [41] pelo fabricante do “Spider-8”. Seu valor é:

$$i = \pm 5^\circ\text{C};$$

A incerteza  $i$  das medições de equipamento não calibrado no ponto triplo da água [0°C] é seguinte:

$$i = |(1,3 \pm 1,2)|^\circ\text{C} < 5^\circ\text{C};$$

A incerteza  $i$  das medições de equipamento não calibrado no ponto da fusão de alumínio [660,3°C] é seguinte:

$$i = |-(20,3 \pm 7,5)|^\circ\text{C} > 5^\circ\text{C};$$

Aproveitando a fórmula (1) de conversão das temperaturas  $T_i$  indicadas, é possível obter os resultados dos cálculos mais certos, se levarmos em conta os erros mostrados na figura 5.8.

### 5.3 Admissões teóricas a serem utilizados

1). A temperatura média do corpo de prova é determinada como um valor médio aritmético das temperaturas da sua superfície e do seu centro:

$$T_m = 0,5(T + T_{centro}) \quad (5.6)$$

onde:

$T_m$  - temperatura média do corpo de prova, (K);

$T$  - temperatura da superfície do corpo de prova, (K);

$T_{centro}$  - temperatura do centro de corpo de prova, (K).

2). O fluxo de calor, através do corpo de prova para o dispositivo de suporte, é muito menor do que o fluxo total de calor perdido de corpo para o meio ambiente.

3). As perdas de calor, através de termopares para o meio ambiente, são desprezíveis.

4). As taxas do resfriamento do corpo de prova, determinadas na base das temperaturas médias e superficiais do corpo, são iguais.

### 5.4 Determinação dos parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$ para o aço ABNT 1045

O objetivo dos experimentos da determinação dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$  do corpo de prova do aço ABNT 1045 era obtenção dos dados do resfriamento com o fim de utilizar os dados experimentais nos cálculos posteriores do valor médio da emissividade total e do coeficiente de transferência de calor por convecção. Para obter os dados mencionados foram realizados os experimentos seguintes:

1). *experimentos auxílios.*

O objetivo dos experimentos foi obter os dados sobre as dimensões e a massa do corpo de prova do aço ABNT 1045;

2). *experimento básico.*

O objetivo do experimento básico foi obter as curvas do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045, na faixa das temperaturas do forjamento de aço carbono;

3). *experimento adicional.*

O objetivo do experimento adicional foi obter os dados com fim de avaliar as perdas condutivas de calor que ocorrem no experimento básico, através do corpo de prova do aço ABNT 1045 para o dispositivo de suporte.

Nos experimentos básico e adicional foram utilizados os corpos de prova da massa e das dimensões idênticas.

### 5.4.1 Montagem experimental para determinar os parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$

O esquema do experimento básico é mostrado na figura 5.9:

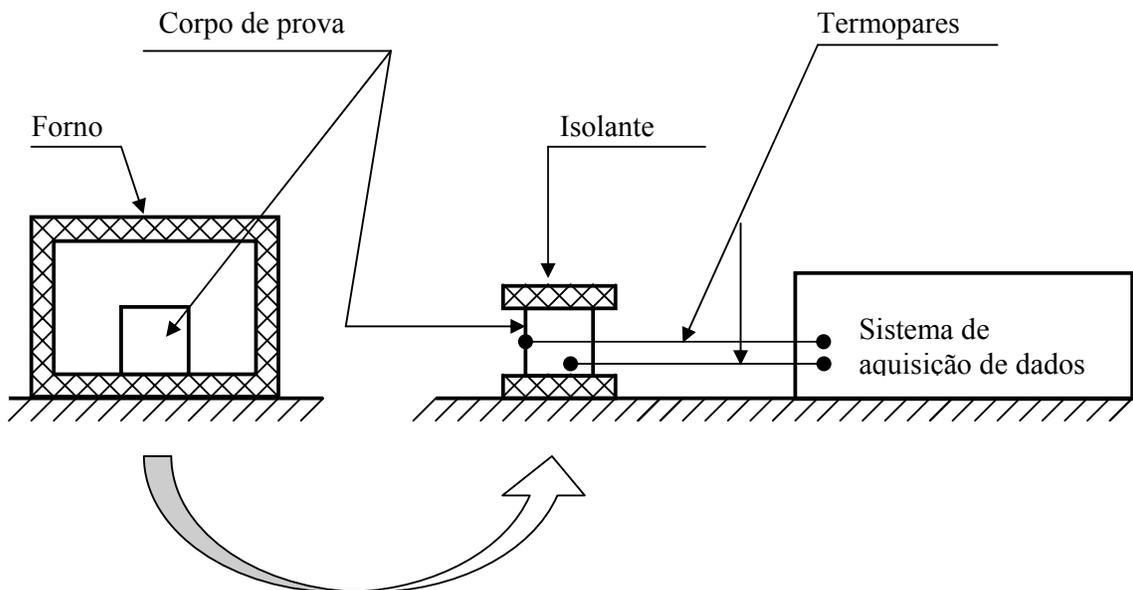


Fig. 5.9 - Esquema do experimento básico.

A descrição do experimento básico é a seguinte:

Após a montagem, o corpo de prova do aço ABNT 1045, junto com os dois termopares tipo “K” para medir as temperaturas em seu centro e em sua superfície, foi colocado no forno de mufla aquecido até 900°C, e os termopares foram ligados ao equipamento de aquisição de dados “Spider-8”. A temperatura do forno foi controlada pelos medidores internos do forno, e a do corpo foi controlada pelos termopares. No processo de aquecimento no forno o corpo eleva a sua temperatura até  $(1030 \pm 15)^\circ\text{C}$  por duas horas.

No fim do período de aquecimento, o corpo de prova, junto com os termopares, foi removido para uma mesa e colocado entre duas placas aquecidas de isolante de silicato (amianto). O aquecimento preliminar das placas foi realizado para melhorar a forma da curva de resfriamento do corpo com fim de simplificar os cálculos posteriores.

Nesta posição o corpo de prova foi resfriado por convecção natural, condução e radiação até 180°C no período de 1 hora, ou 3675 segundos. No processo de resfriamento do corpo, os valores das temperaturas  $T_{centro}$  no seu centro e  $T$  na sua superfície foram registrados com frequência  $[1/3(\text{s})]$  como as funções  $T_{centro}(t)$  e  $T(t)$  do tempo  $t$ .

O esquema do corpo de prova do aço ABNT 1045, utilizado nos experimentos básico e adicional, é representado na figura 5.10:

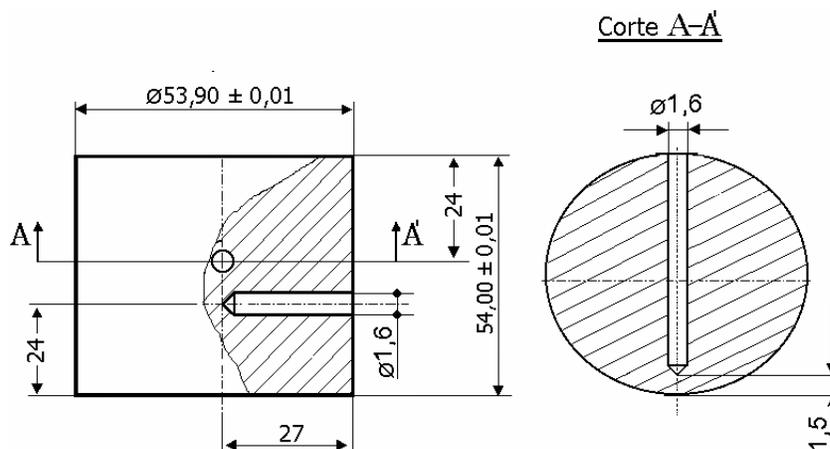


Fig. 5.10 - Esquema do corpo de prova do aço ABNT 1045 utilizado nos experimentos básico e adicional.

O corpo de prova, representado na figura 5.10, é um cilindro do aço ABNT 1045. No experimento o eixo de cilindro foi orientado verticalmente. Os furos no corpo servem para colocar os termopares e medir as temperaturas no seu centro e em sua superfície. As dimensões do corpo de prova estão em mm.

O esquema do experimento adicional é mostrado na figura 5.11:

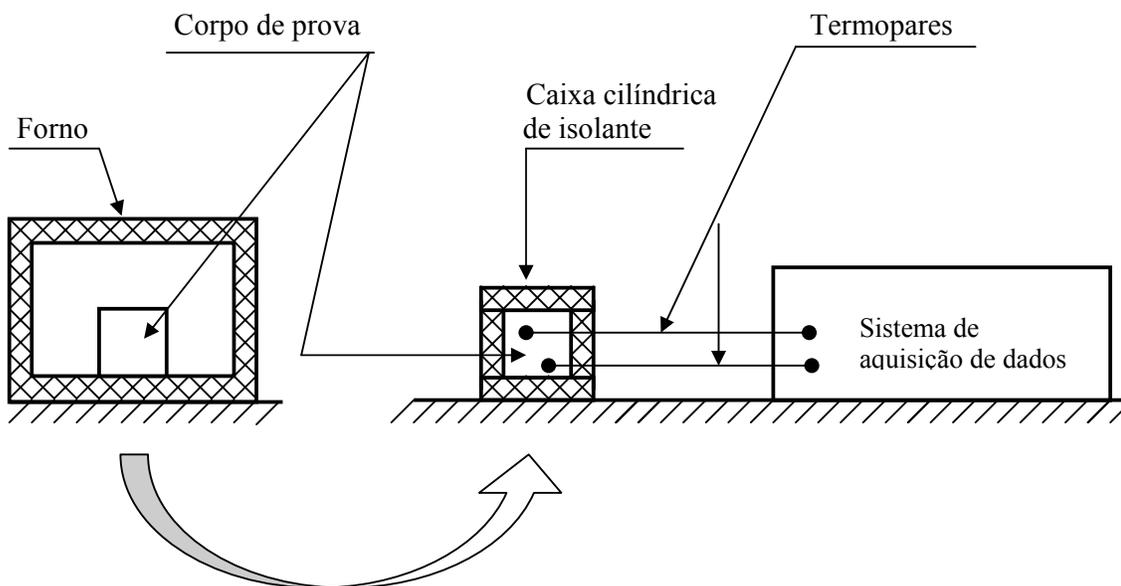


Fig. 5.11 - Esquema do experimento adicional.

A descrição do experimento adicional é a seguinte:

Após a montagem, o corpo de prova do aço ABNT 1045, junto com os dois termopares tipo “K” para medir as temperaturas em seu centro e em sua superfície, foi colocado no forno de mufla aquecido até 900°C e os termopares foram ligados ao equipamento de aquisição de dados “Spider-8”. A temperatura do forno foi controlada pelos medidores internos do forno e a do corpo foi controlada pelos termopares. No processo de aquecimento no forno o corpo eleva a sua temperatura até  $(1030 \pm 15)^\circ\text{C}$  por duas horas.

No fim do período de aquecimento, o corpo de prova, junto com os termopares, foi removido para a mesa e colocado na caixa cilíndrica aquecida de isolante de silicato tipo amianto. O aquecimento preliminar da caixa foi realizado para melhorar a forma da curva de resfriamento do corpo com fim de simplificar os cálculos posteriores.

Nesta posição o corpo de prova foi resfriado por condução até 200°C no período de 4 horas e 46 minutos, ou 17130 segundos. No processo de resfriamento do corpo de prova, os valores das temperaturas  $T_{centro}$  no seu centro e  $T$  na sua superfície foram registrados com frequência  $[1/3(\text{s})]$  como as funções  $T_{centro}(t)$  e  $T(t)$ .

O esquema da caixa cilíndrica de isolante que foi utilizada no experimento adicional, é mostrado na figura 5.12:

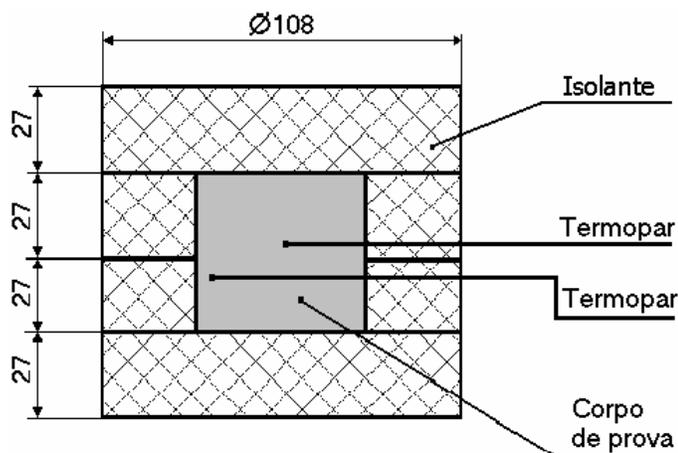


Fig. 5.12 - Esquema da caixa cilíndrica de isolante que foi utilizada no experimento adicional.

A descrição da caixa de isolante, utilizada no experimento adicional, é seguinte:

A caixa cilíndrica de isolante foi fabricada com de quatro placas cilíndricas separadas de isolante amianto. A espessura das paredes da caixa é o mesmo. As dimensões internas da caixa são iguais às dimensões externas do corpo de prova, e estão em mm.

### 5.4.2 Dados experimentais obtidos para aço ABNT 1045

Os corpos de prova de forma cilíndrica, que foram utilizados nos experimentos, foram produzidos com mesma barra do aço ABNT 1045. Todos os corpos de prova, utilizados nos experimentos, são corpos idênticos. Todos os dados experimentais, obtidos no processo de resfriamento destes corpos de prova, estão armazenados na forma dos arquivos do programa “Microsoft Excel 2002”.

Os dados experimentais primários do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045, na forma das curvas do resfriamento, em temperaturas  $T_i$  indicadas pelo equipamento de aquisição de dados “Spider-8”, estão mostrados nas figuras 5.13, 5.14 e 5.15.

As curvas do resfriamento do centro do corpo de prova do aço ABNT 1045, que foram obtidos nos experimentos básico e adicional, são mostrados na figura 5.13:

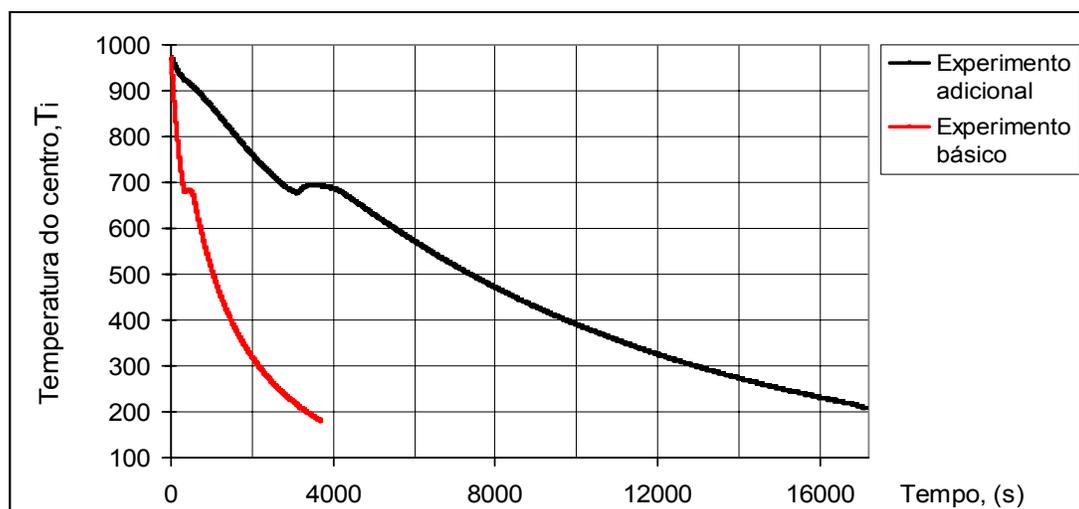


Fig. 5.13 - Curvas do resfriamento do centro do corpo de prova do aço ABNT 1045 resfriado nos experimentos básico e adicional, na faixa de [1000-200]°C.

As curvas da figura 5.13 mostram as regiões da mudança de fases do corpo resfriado de aço. Nestas regiões as curvas do resfriamento mudam a sua forma. A mudança da forma da curva do resfriamento fornece uma dificuldade para elaborar os dados experimentais do resfriamento. Portanto, será importante mostrar as curvas mencionadas na faixa das temperaturas fora da região da mudança de fases.

A figura 5.14 mostra em seus detalhes 8 as curvas do resfriamento do mesmo corpo de prova no intervalo de temperaturas que fica fora da região da mudança de fases e é mais importante para o processo de forjamento:

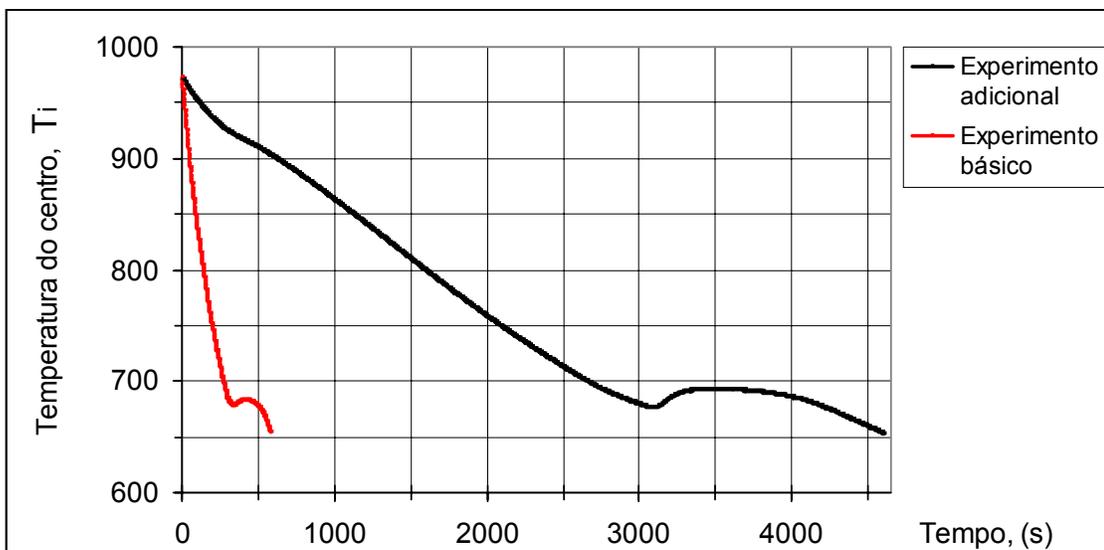


Fig. 5.14 - Curvas do resfriamento do centro do corpo de prova do aço ABNT 1045 resfriado nos experimentos básico e adicional na faixa de [1000-670]°C.

A diferença das temperaturas do centro do corpo de prova do aço ABNT 1045 e da sua superfície, obtida no experimento básico, é mostrada na figura 5.15:

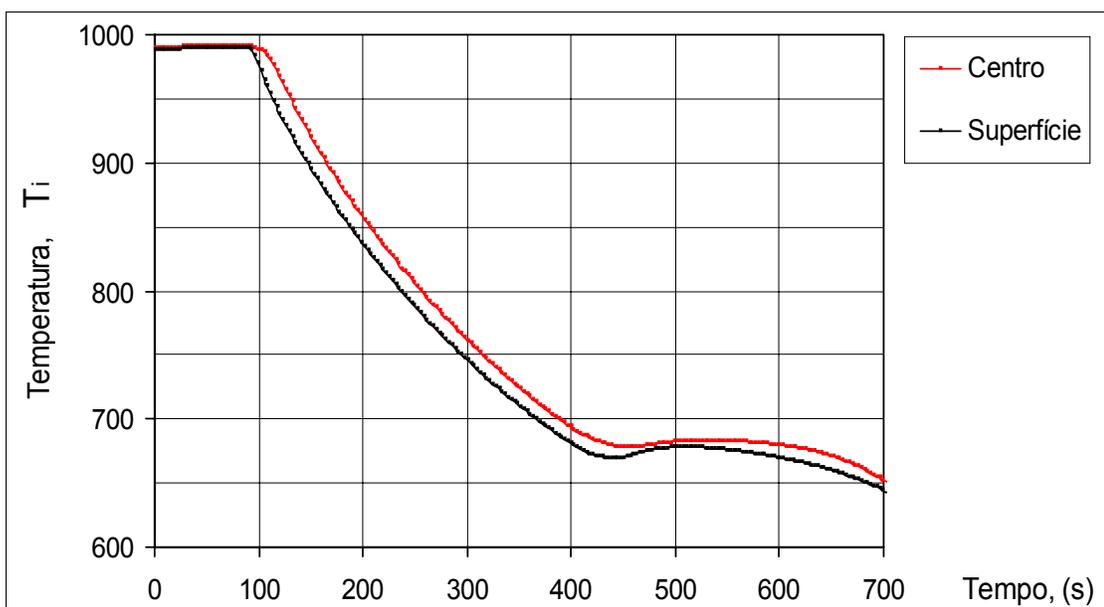


Fig. 5.15 - Curvas do resfriamento do centro e da superfície do corpo de prova do aço ABNT 1045 resfriado no experimento básico, na faixa de [1030-700]°C.

As dimensões dos corpos de prova, que foram medidas no experimento auxílio pelo micrômetro, são mostradas na figura 5.10.

A temperatura do ar do meio ambiente foi registrada por termopar no início e no fim do experimento. O valor médio aritmético da temperatura registrada do ar foi seguinte:

$$T_{\infty} = 297\text{K}, \text{ ou } 24^{\circ}\text{C}.$$

### 5.4.3 Elaboração dos dados experimentais

Todos os dados experimentais obtidos no processo de resfriamento dos corpos de prova foram elaborados pelo programa “Microsoft Excel 2002” e “Mathematica-4”. As incertezas dos cálculos que foram feitos neste item estão mostradas no Anexo 1.

#### 5.4.3.1 Preparação dos dados experimentais para os cálculos computacionais

##### Temperaturas registradas nos experimentos.

Todos os dados numéricos, adquiridos pelo sistema de aquisição dos dados nos experimentos básico e adicional, foram registrados em temperaturas  $T_i$  indicadas pelo equipamento de aquisição de dados “Spider-8”. A unidade desta temperatura é semelhante ao grau Celsius.

A diferença entre as indicações da temperatura do “Spider-8” e as temperaturas correspondentes em grau Celsius se aumenta com a temperatura medida. E já no ponto da fusão de alumínio essa diferença chega a  $(10-25)^{\circ}\text{C}$ . Portanto todas as indicações do “Spider-8” foram convertidas nos graus Celsius.

Para converter os valores das temperaturas indicadas pelo “Spider-8” em graus da temperatura do Celsius, foi utilizada a fórmula (5.1) (p.35).

Para converter as temperaturas, obtidas pela fórmula (5.1), em graus Kelvin, foi utilizada a fórmula seguinte:

$$\text{Temperatura em graus Kelvin} = \text{Temperatura em graus Celsius} + 273,15 \quad (5.7)$$

onde:

273,15 – valor da temperatura absoluta que corresponde a  $0^{\circ}\text{C}$ .

As faixas das temperaturas do corpo de prova do aço ABNT 1045, escolhidas para os cálculos posteriores dos parâmetros térmicos  $\epsilon$  e  $h$ , são mostradas na tabela 5.4:

Tab. 5.4 - Faixas das temperaturas do corpo de prova do aço ABNT 1045, escolhidas para os cálculos dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ .

Tempo	Temperatura T da superfície do corpo			Temperatura $T_m$ média do corpo		
	Indicações do "Spider-8"	°C	K	Indicações do "Spider-8"	°C	K
0	903	932	1205	917	946	1219
...	...	...	...	...	...	...
270	675	696	970	682	703	976

A equação, que descreve em temperaturas médias o processo do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045, é mostrada na figura 5.16:

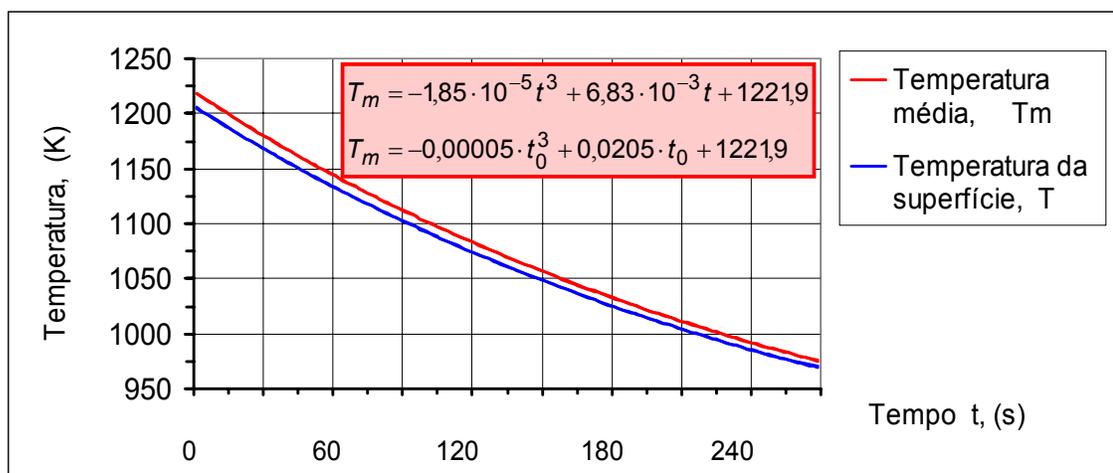


Fig. 5.16 – Curvas do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045, obtidas no experimento básico, com a equação encontrada a ser aproveitada nos cálculos.

#### Volume do material do corpo de prova

O volume  $V$  (em  $m^3$ ) do material do corpo cilíndrico de prova foi calculado por:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot l \quad (5.8)$$

onde:

$D$  - diâmetro do cilindro, (m);

$l$  - altura do cilindro, (m).

#### Massa do corpo de prova

Calcula-se a massa do corpo de prova:

$$m = \rho \cdot V \quad (5.9)$$

onde:

$m$  – massa do corpo de prova, (kg);

$\rho$  – densidade do material do corpo de prova, (kg/m<sup>3</sup>);

$V$  – volume do material do corpo de prova, (m<sup>3</sup>);

Com a densidade do material do corpo de prova determinada por [34]:

$$\rho = (7826 \pm 0,5) \frac{kg}{m^3};$$

Calcula-se a massa:

$$m = 7,826 \cdot 122,3 = 957(g) = (0,957 \pm 0.001)kg$$

#### Áreas de troca de calor do corpo de prova

As áreas de troca de calor do corpo de prova foram determinadas por:

$$A_{cond} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (5.10)$$

$$A_{rad} = A_{conv} = \pi \cdot D \cdot l \quad (5.11)$$

onde:

$A_{cond}$  - área de troca de calor por condução, (m<sup>2</sup>);

$A_{rad}$  - área de troca de calor por radiação, (m<sup>2</sup>);

$A_{conv}$  - área troca de calor por convecção, (m<sup>2</sup>);

$D$  - diâmetro do cilindro, (m);

$l$  - altura do cilindro, (m);.

A área do corpo de prova calculada e é a seguir:

$$A_{rad} = A_{conv} = A,$$

onde:

$A$  – área de troca de calor por radiação e por convecção, (m<sup>2</sup>).

Levando em conta o fenômeno da dilatação térmica, os valores das áreas de troca de calor na faixa das temperaturas [700-900]°C são:

$$A = \left[ (9,344 \pm 0,0012) \cdot 10^{-3} \right] \cdot m^2 \quad (5.12)$$

$$A_{\text{cond}} = \left[ (4,672 \pm 0,0012) \cdot 10^{-3} \right] \cdot m^2 \quad (5.13)$$

$$A(\text{total}) = A + A_{\text{cond}} = \left[ (14,016 \pm 0,0012) \cdot 10^{-3} \right] \cdot m^2 \quad (5.14)$$

Os dados necessários para os cálculos computacionais foram definidos em base no modelo matemático de resfriamento de corpo de prova:

Parâmetros dos experimentos:

$m = 0,957(\text{kg})$ , massa do corpo de prova;

$A = 0,009344(m^2)$ , área de troca do calor por radiação e por convecção;

$T_{\infty} = 297\text{K}$ , temperatura do ar do meio ambiente.

Constantes usadas nos experimentos:

$C_p = 720 \left( \frac{j}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$  – calor específico de aço ABNT 1045, conforme a literatura [34];

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left( \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$  – constante de Stefan-Boltzman, conforme a literatura [21];

$\varepsilon_T = [0,79-0,90]$  – valores possíveis da emissividade total de aço ABNT 1045 conforme a literatura [24], [28], [21], [23], [5] e [3];

$\varepsilon_T < 0,828$  – valor limiar da emissividade total, obtido teoricamente na base da equação (3.5) do “Modelo matemático do resfriamento de um corpo”, (item 3.1, p.22).

para  $\varepsilon_T < 0,828$  o valor do coeficiente médio de transferência de calor por convecção,  $h$ , sempre é mais do que zero, o que corresponde à natureza do fenômeno da convecção;

$h = 10 \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$  – valor possível, conforme a literatura [42], do coeficiente  $h$  médio de transferência de calor por convecção.

### 5.4.3.2 Avaliação do fluxo condutivo de calor através do corpo de prova para o material de isolante

Para avaliar o fluxo condutivo de calor, através do corpo de prova para as placas de isolante, comparamos os fluxos totais do calor, perdidos através do corpo de prova no experimento básico, com o fluxo total de calor (perdas condutivas), através do corpo de prova idêntico para a caixa de isolante no experimento adicional.

O fluxo total de calor do corpo de prova para o meio ambiente está representado através da expressão (3.1) do “Modelo matemático de resfriamento de corpo forjado” (item 3.1, p.21):

$$Q = q_{cond} + q_{rad} + q_{conv} \quad (3.1)$$

onde:

- $Q$  – fluxo total de calor do corpo de prova para o meio ambiente;
- $q_{cond}$  – fluxo do calor perdido através do corpo de prova por condução;
- $q_{rad}$  – fluxo do calor perdido através do corpo de prova por radiação;
- $q_{conv}$  – fluxo do calor perdido através do corpo de prova por convecção.

No caso do experimento básico a expressão (3.1) torna-se:

$$Q_{básico} = q_{cond} + q_{rad} + q_{conv} \quad (5.15)$$

onde:

- $q_{cond}$  – perdas condutivas de calor do corpo através do material do isolante;

No caso do experimento adicional a expressão (3.1) torna-se:

$$Q_{adicional} = q_{cond} \quad (5.16)$$

onde:

- $q_{cond}$  – perdas condutivas de calor do corpo através do material da caixa do isolante;

A perda condutiva de calor do corpo de prova através da zona de contato com o material do isolante, é dada por fórmula empírica [1]:

$$q_{cond} = \alpha \cdot A_{cond} \cdot \Delta T \quad (5.17)$$

onde:

$\alpha$  – coeficiente de transferência de calor, através da peça forjada para a ferramenta;

$A_{cond}$  – área de contato do corpo de prova com o isolante;

$\Delta T$  – diferença das temperaturas superficiais da interface peça-ferramenta.

Aplicando a fórmula (5.17) para o processo de transferência de calor condutivo do corpo de prova para o material do isolante, obtém-se:

$$Q_{adicional} = \alpha \cdot A_{cond} \cdot (T_{sup.corpo} - T_{sup.isolante}) \quad (5.18)$$

onde:

$T_{sup.corpo}$  – temperatura superficial na zona de contato do corpo resfriado;

$T_{sup.isolante}$  – temperatura superficial na zona de contato do isolante.

A análise da expressão (5.18) mostra que o fluxo condutivo de calor, perdido pelo corpo de prova, é proporcional à área da superfície resfriada e depende da temperatura desta superfície. Portanto, as perdas condutivas de calor que ocorrem no experimento básico e adicional através das superficiais de temperatura igual, são proporcionais às suas áreas de contato com o material do isolante.

Levando em conta os valores das superfícies de transferência de calor por condução no experimento básico e adicional, a comparação dos fluxos do calor  $q_{cond}$  e  $Q_{adicional}$  pode ser representada:

$$\frac{q_{cond}}{Q_{adicional}} = \frac{A_{cond}}{A(total)} = \frac{4,672 \cdot 10^{-3} (m^2)}{14,016 \cdot 10^{-3} (m^2)} = \frac{1}{3} \quad (5.19)$$

ou:

$$Q_{adicional} = 3 \cdot q_{cond} \quad (5.20)$$

Aplicando a equação básica (3.5) para o processo de transferência de calor no experimento básico e adicional e substituindo nesta equação o valor de  $Q_{adicional}$ , obtido pela expressão (5.20), são obtidas as fórmulas para determinar o valor de  $q_{cond}$ :

$$m \cdot C_p \cdot \left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{básico} = Q_{básico} \quad (5.21)$$

$$m \cdot C_p \cdot \left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{adicional} = Q_{adicional} = 3 \cdot q_{cond} \quad (5.22)$$

Dividindo a expressão (5.21) por expressão (5.22), obtém-se a fórmula para comparar os fluxos totais do calor, perdidos, através do corpo de prova no experimento básico, com o fluxo total de calor no experimento adicional:

$$\frac{\left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{\text{básico}}}{\left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{\text{adicional}}} = \frac{Q_{\text{básico}}}{Q_{\text{adicional}}} = \frac{Q_{\text{básico}}}{3 \cdot q_{\text{cond}}} \quad (5.23)$$

ou:

$$q_{\text{cond}} = \frac{1}{3} \cdot Q_{\text{básico}} \cdot \frac{\left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{\text{adicional}}}{\left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{\text{básico}}} \quad (5.24)$$

onde:

$\left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{\text{adicional}}$  – taxa do resfriamento do corpo de prova no experimento básico.

$\left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{\text{básico}}$  – taxa do resfriamento do corpo de prova no experimento adicional.

Para calcular a relação das taxas do resfriamento do corpo de prova no experimento adicional e básico, consideramos as suas curvas do resfriamento, mostradas na figura 5.17.

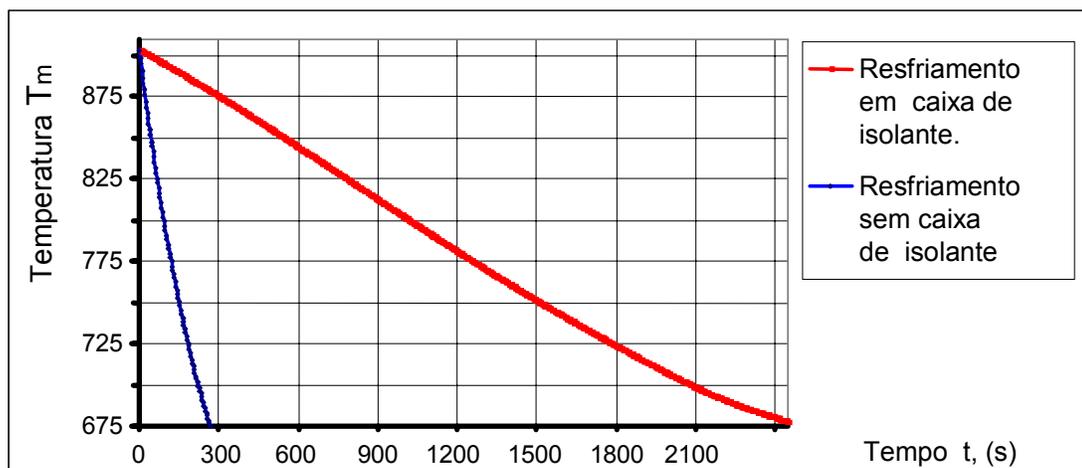


Fig. 5.17 - Curvas do resfriamento dos corpos idênticos de prova do aço ABNT 1045, obtidas nos experimentos básico e adicional e mostradas nas temperaturas médias.

A curva azul na figura 5.17, obtida no experimento básico, mostra o processo combinado do resfriamento por convecção natural, por radiação e por convecção do corpo de prova colocado entre as duas placas paralelas de isolante.

A curva vermelha na figura 5.17, obtida no experimento adicional, mostra o resfriamento por condução do corpo idêntico colocado em caixa de isolante do mesmo material.

A análise visual das curvas da figura 5.17 mostra que o processo de resfriamento através da caixa de isolante transcorre mais devagar do que o resfriamento através das placas de isolante. A análise matemática dessas curvas mostra que as taxas do resfriamento dos corpos, utilizados nos experimentos, são as derivadas primeiras das funções  $T_{m(básico)}(t)$  e  $T_{m(adicional)}(t)$  pela variável  $t$ .

A figura 5.17 permite comparar o tempo  $t$  do resfriamento dos corpos de prova para as temperaturas  $T_{m(adicional)} \neq T_{m(básico)}$  diferentes. Com fim de comparar o tempo de resfriamento dos corpos de prova para as temperaturas iguais  $T_{m(adicional)} = T_{m(básico)}$  é necessário converter as funções  $T_{m(básico)}(t)$  e  $T_{m(adicional)}(t)$  nas funções de forma inversa:  $t\{T_{m(básico)}\}$  e  $t\{T_{m(adicional)}\}$ . Os resultados desta conversão são mostrados na figura 5.18.

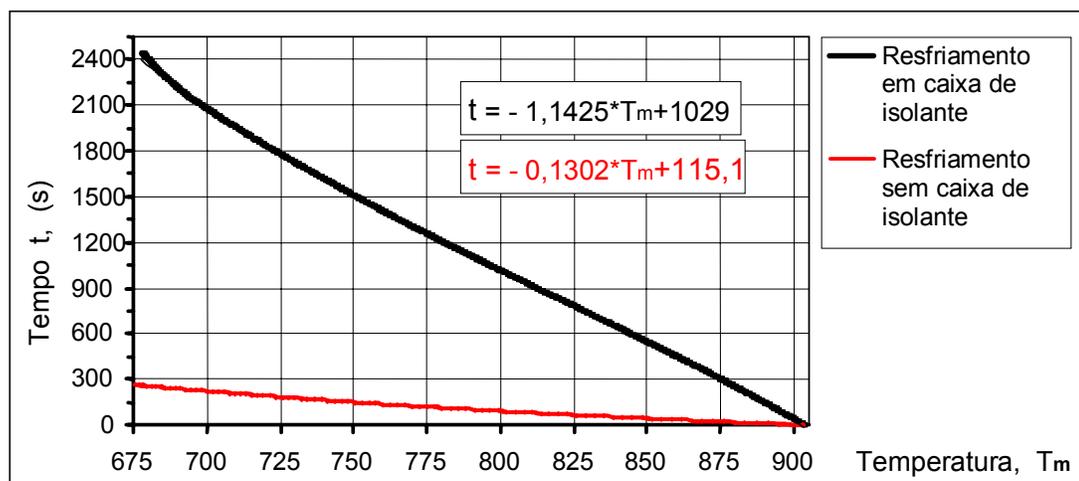


Fig. 5.18 - Curvas do resfriamento dos corpos de prova do aço ABNT 1045, mostradas na forma das funções  $t\{T_{m(básico)}\}$  e  $t\{T_{m(adicional)}\}$ , com as suas equações encontradas a serem aproveitadas nos cálculos.

As equações das curvas da figura 5.18 foram obtidas pelo programa “Microsoft Excel 2002” por meio de seleção das linhas de tendência correspondentes.

A figura 5.18 permite comparar o tempo  $t$  do resfriamento dos corpos de prova para as temperaturas iguais  $T_{m(adicional)} = T_{m(básico)}$ . Essa comparação foi feita por fórmula (5.24) convertida na forma a seguir:

$$q_{cond} = \frac{1}{3} \cdot Q_{básico} \cdot \frac{\left[ \frac{dt}{dT_m} \right]_{adicional}}{\left[ \frac{dt}{dT_m} \right]_{básico}} \quad (5.25)$$

onde:

$$Q_{básico} = m \cdot C_p \cdot \left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{básico} \quad (5.21)$$

$$\left[ \frac{dt}{dT_m} \right]_{básico} \quad \text{- função inversa da derivada} \left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{básico} ;$$

$$\left[ \frac{dt}{dT_m} \right]_{adicional} \quad \text{- função inversa da derivada} \left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{adicional} ;$$

Os resultados dos cálculos da expressão (5.25) são mostrados nas figuras 5.19 e 5.20.

A figura 5.19 apresenta graficamente a função (5.25) que descreve o processo do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045 por condução no experimento básico na faixa das temperaturas [1220-970]K, em relação ao tempo  $t$  do resfriamento:

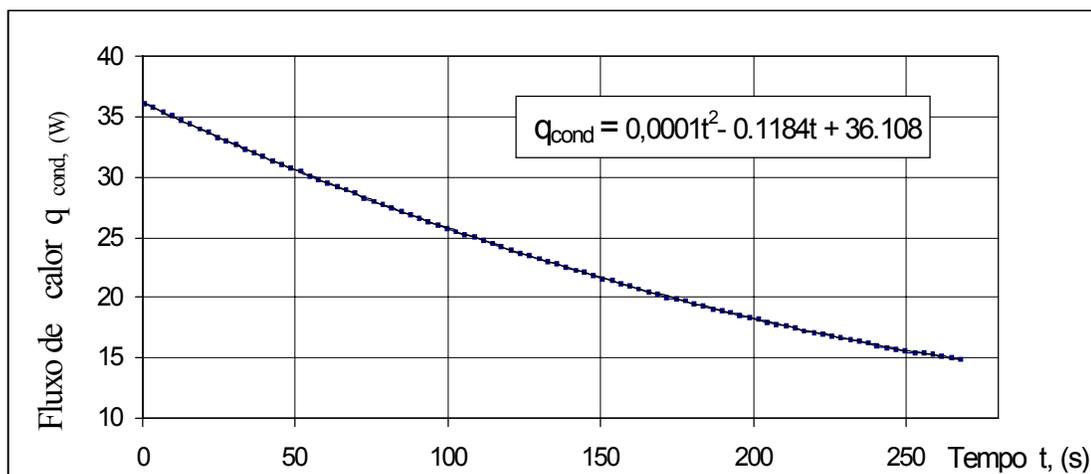


Figura 5.19. Perda condutiva do calor  $q_{cond}$  do corpo de prova do aço ABNT 1045, em função do tempo do resfriamento. Experimento básico. Faixa de [1220 -970]K.

A equação da curva da figura 5.19 foi obtida pelo programa “Microsoft Excel 2002”, por meio de seleção da linha de tendência correspondente:

$$q_{cond} = 0,0001 \cdot t^2 - 0,1184 \cdot t + 36,108 [W] \quad (5.26)$$

ou na forma utilizada nos cálculos posteriores:

$$q_{cond} = \frac{1}{3} \cdot (0,000009 \cdot t_0^2 - 1,0735 \cdot t_0 + 109,39) \cdot [W], \quad (5.27)$$

onde :

$t_0$  – tempo em unidades do “Spider-8”. Para o experimento básico 1 unidade=3(s).

A figura 5.20 mostra, graficamente e analiticamente, a quantidade do calor  $q_{cond}$  perdida pelo corpo de prova do aço ABNT 1045 no experimento básico na faixa das temperaturas [1220-970]K, em função da temperatura  $T_m$  média:

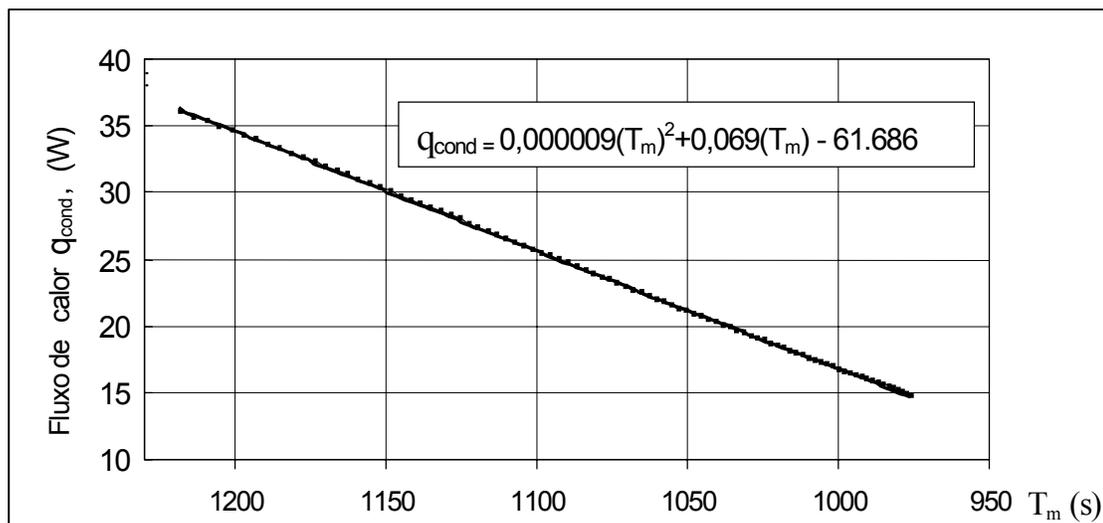


Figura 5.20. Perda condutiva do calor  $q_{cond}$  do corpo de prova do aço ABNT 1045 em função da temperatura média do corpo. Experimento básico. Faixa de [1220-970]K.

Os resultados dos cálculos da quantidade de calor  $q_{cond}$ , - que foram feitos pela fórmula (5.27) na faixa das temperaturas [1220 - 970]K, - são a seguir:

$$q_{cond} = 0,038 \cdot Q_{básico};$$

$$q_{cond} (\text{máximo}) = 36 (W);$$

$$q_{cond} (\text{mínimo}) = 15 (W);$$

$$q_{cond}(\text{média}) = 24 \text{ (W)}.$$

A incerteza  $i$  das perdas térmicas  $q_{cond}$  foi calculada pela fórmula (1) do Holman, J.P., mostrada no Anexo 2, e é desprezível.

### 5.4.3.3 Determinação da taxa do resfriamento do corpo de prova no experimento básico

A taxa  $v_{\text{básico}}$  do resfriamento do corpo de prova, que ocorreu no experimento básico, foi definida como a derivada primeira da função  $T_m(t)$  que expressa a dependência da temperatura  $T_m$  média deste corpo do tempo  $t$  de resfriamento:

$$v_{\text{básico}} = \left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{\text{básico}} \quad (5.28)$$

A função  $T_m(t)$  é mostrada na figura 5.16 como a equação da curva (azul) de resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045, em temperaturas  $T_m$  médias obtidas no experimento básico, na faixa das temperaturas [1220 - 970].

A taxa do resfriamento do corpo de prova no experimento básico, calculada como a derivada primeira da função  $T_m(t_0)$  em relação de tempo  $t_0$ , é a seguir:

$$v_{\text{básico}} = -\frac{1}{3} \cdot (0,00015 \cdot t_0^2 + 0,041 \cdot t_0 - 4,1779) \cdot \left[ \frac{\text{K}}{\text{s}} \right], \quad (5.29)$$

### 5.4.3.4 Parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$ do aço ABNT 1045

O valor médio da emissividade total ( $\varepsilon$ ) e o coeficiente médio de transferência de calor por convecção ( $h$ ) foram calculados pelo procedimento descrito no item 3.6 (p.25) deste trabalho. Introduzindo na equação básica (3.5) o valor da perda térmica condutiva (5.27) do corpo de prova do aço ABNT 1045, o valor da taxa do seu resfriamento (5.29), os valores numéricos  $A$ ,  $\sigma$ ,  $T_\infty$ ,  $m$  e  $C_p$  que foram determinados no item 5.4.3.1, o valor mencionado de  $h$  e o valor arbitrário de  $\varepsilon$ , obtém-se a expressão para calcular as curvas teóricas do resfriamento para cada valor escolhido arbitrariamente de  $\varepsilon$ :

$$-0,957 \cdot 720 \cdot \frac{-0,00015 \cdot t_0^2 + 0,041 \cdot t_0 - 4,1779}{3} = \frac{9 \cdot 10^{-6} \cdot t_0^2 - 1,0735 \cdot t_0 + 109,39}{3} + \quad (5.30)$$

$$+ 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,009344 \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - 297^4) + h \cdot 0,009344 \cdot (T - 297).$$

Os valores  $\varepsilon$ ,  $h$  e o desvio padrão médio da temperatura ( $d$ ) da curva calculada do resfriamento em relação à curva experimental do corpo de prova do aço ABNT 1045, obtidos pela expressão (5.30), são mostrados na tabela 5.5.

Tab. 5.5 - Parâmetros [ $\varepsilon$ ,  $h$ ] do corpo de prova do aço ABNT 1045, e desvio  $d$ , calculados para a faixa das temperaturas [950 - 700]°C.

$\varepsilon$	-	<b>0,83</b>	0,80	0,70	0,69
$h$	W / (m <sup>2</sup> K)	<b>3,53</b> *	6,28	15,82	15,9
$d$	K	<b>5,14</b>	5,91	9,77	10,1

Obs.:

- 1). Sinal (\*) marca o valor mínimo possível de  $h$ . Abaixo deste valor mínimo, a função  $h_T(T)$  no intervalo das temperaturas [1205 – 970]K torna os valores negativos, o que não corresponde à natureza física do parâmetro a ser calculado.
- 2). Valores mostrados em negrito representam os resultados finais dos cálculos.

Os resultados dos cálculos, representados na tabela 5.5, são mostrados graficamente na figura 5.21.

A figura 5.21 mostra as curvas teóricas e a curva experimental do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045, na faixa das temperaturas [1200 - 950]K.

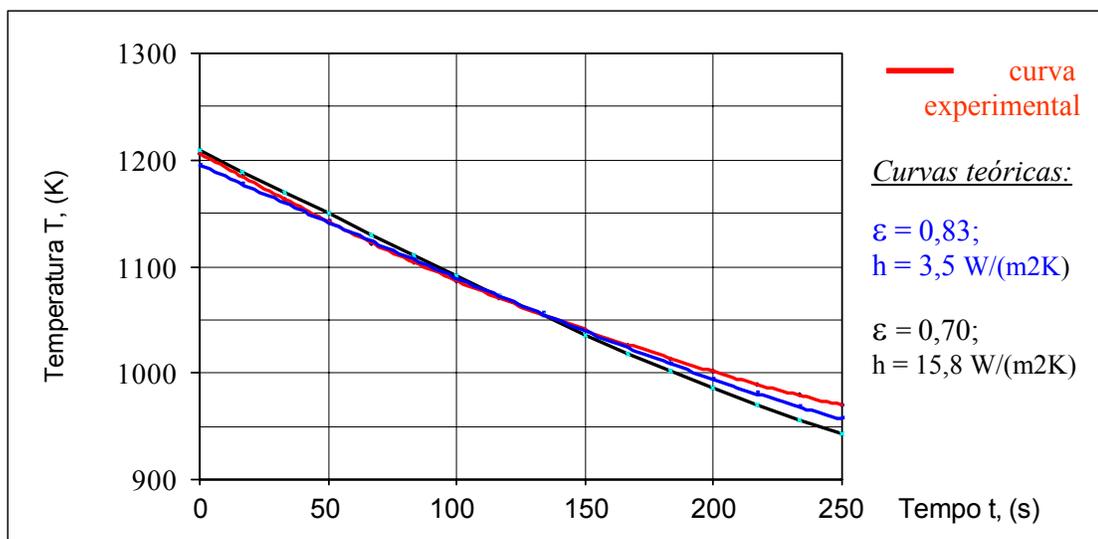


Fig. 5.21 - Curva experimental e as curvas teóricas do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045. Experimento básico na faixa de [1200 - 950]K.

As figuras 5.22 e 5.23 mostram o desvio padrão médio da temperatura da curva teórica em relação à curva experimental do resfriamento no experimento básico do corpo de prova do aço ABNT 1045, calculado para os pares diferentes de  $\varepsilon$  e  $h$ , apresentados na tabela 5.5:

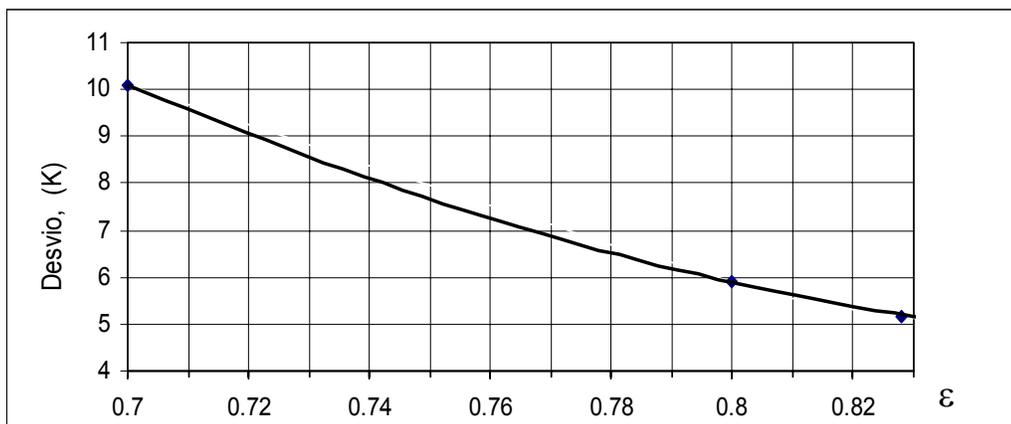


Fig. 5.22 – Desvio padrão médio da temperatura da curva teórica em relação à curva experimental do resfriamento do aço ABNT 1045, em função do valor médio da emissividade total.

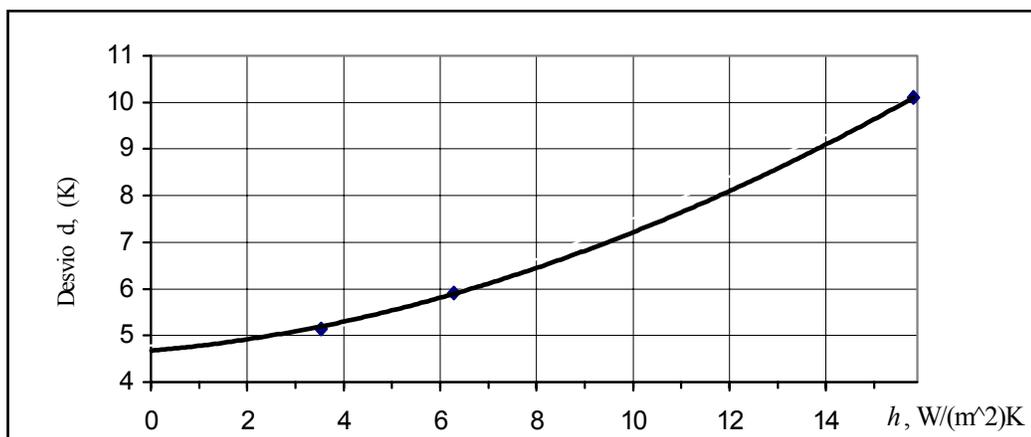


Fig. 5.23 - Desvio padrão médio da temperatura da curva teórica em relação à curva experimental do resfriamento do aço ABNT 1045, em função do coeficiente médio ( $h$ ).

Os parâmetros térmicos [ $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_T$ ,  $h$ ,  $h_T$ ] do corpo de prova do aço ABNT 1045, obtidos pela técnica desenvolvida, são mostrados graficamente nas figuras 5.24, 5.25 e 5.26.

A figura 5.24 ilustra a dependência do coeficiente  $\varepsilon_T$  da temperatura  $T$  superficial do corpo de prova do aço ABNT 1045, na faixa de  $[1205 - 970]K$ , no caso em que o coeficiente  $h=5,74 \text{ W/m}^2K$ . Uma variação (ou incerteza) grande da temperatura superficial provoca uma variação insignificante de  $\varepsilon_T$ :

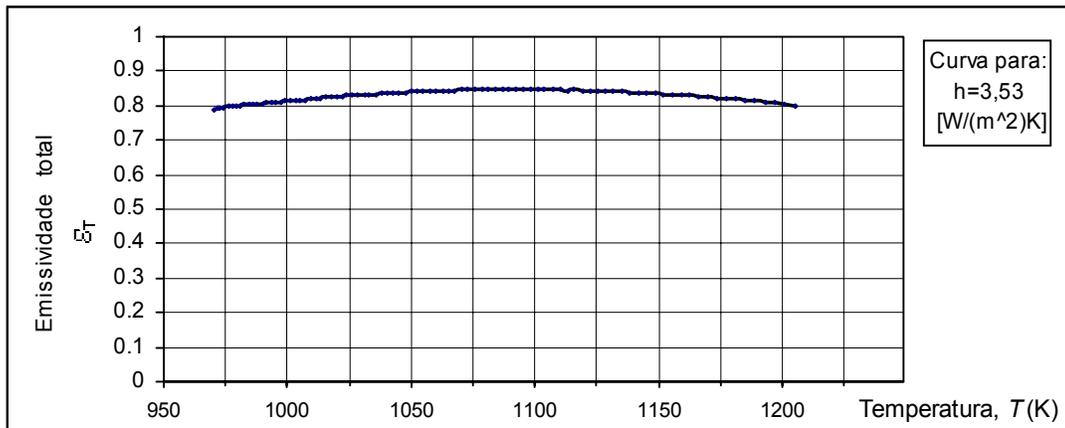


Fig. 5.24 - Variação da emissividade total da superfície do corpo de prova do aço ABNT 1045. Para  $h=3,53 \text{ (W/m}^2K)$ .

A figura 5.25 ilustra a dependência do coeficiente  $h_r$ , da temperatura  $T$  superficial do corpo de prova do aço ABNT 1045, na faixa de  $[970 - 1205]K$ , no caso em que o coeficiente  $\varepsilon = 0,83$ . Uma variação (ou incerteza) insignificante da temperatura superficial provoca uma variação grande de  $h_r$ :

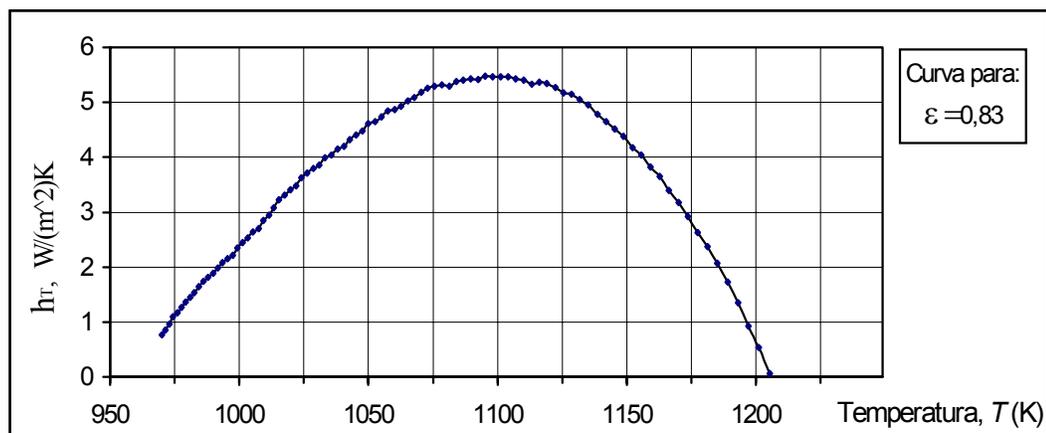


Fig. 5.25 - Variação do coeficiente da transferência de calor por convecção do corpo de prova do aço ABNT 1045. Para  $\varepsilon = 0,83$ .

A figura 5.26 mostra os valores dos fluxos de calor através do corpo de prova do aço SAE 1045 para o meio ambiente e para o material de isolante, o que ocorrem no experimento básico nos processos combinados de radiação, condução e convecção:

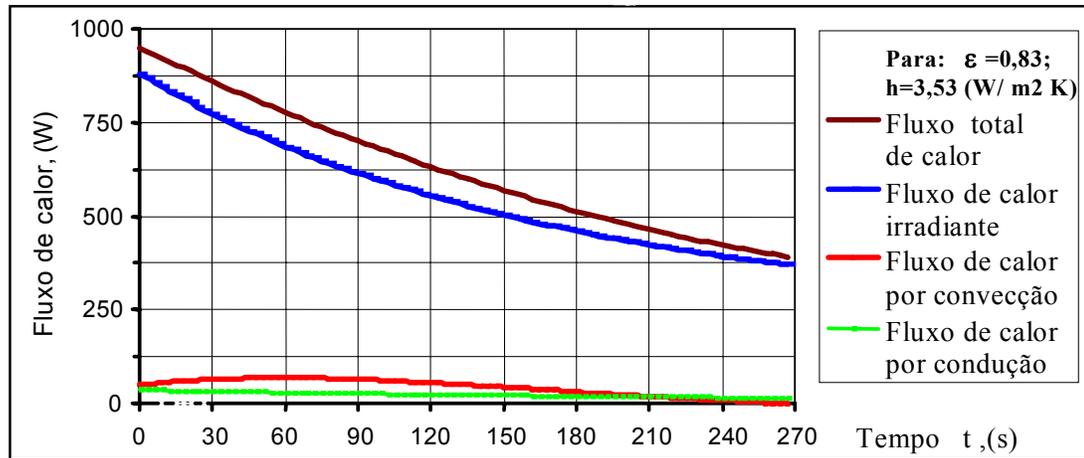


Fig. 5.26 – Perdas térmicas do corpo de prova do aço ABNT 1045, na faixa de  $[950-700]^{\circ}\text{C}$ . Para  $\epsilon = 0,83$ ;  $h = 3,53 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### 5.5 Determinação dos parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$ para a liga de alumínio AA 6061

O objetivo dos experimentos da determinação dos parâmetros térmicos  $\epsilon$  e  $h$  da liga de alumínio AA 6061 foi obtenção dos dados do resfriamento dos corpos de prova dessa liga com fim de utilizar os dados experimentais nos cálculos posteriores. Para obter os dados necessários foram realizados os experimentos seguintes:

#### 1). *Experimento básico.*

O objetivo do experimento básico foi obter as curvas do resfriamento dos corpos 1 e 2 de prova da liga de alumínio AA 6061, na faixa das temperaturas do forjamento de alumínio;

#### 2). *Experimento adicional.*

O objetivo do experimento adicional foi obter a curva do resfriamento do corpo 3 de prova da liga AA 6061, com fim de avaliar as perdas condutivas de calor, que ocorrem no experimento básico, através dos corpos 1 e 2 de prova.

### 3). *Experimentos auxílios.*

O objetivo dos experimentos foi obter os dados sobre as dimensões e massa dos corpos de provas mencionadas.

Todos os corpos de prova, utilizados nos experimentos básico e adicional, foram fabricados com a de mesma barra da liga de alumínio AA 6061. As dimensões e massa dos corpos 1, 2 e 3 de prova foram quase iguais.

#### 6.5.1 **Montagem experimental para determinar os parâmetros térmicos $\epsilon$ e $h$**

O esquema do experimento básico para a liga do alumínio AA 6061 é idêntico ao esquema do experimento básico com aço SAE 1045, e é mostrado na figura 5.9 do item 5.4.1 (p.40).

A descrição do experimento básico com liga de alumínio AA 6061, é a seguinte:

Após a montagem, o corpo (1, 2) de prova da liga AA 6061, junto com os dois termopares tipo “K”, para medir as temperaturas em seu centro e em sua superfície, foi colocado no forno de mufla, aquecido até 500°C, e os termopares foram ligados ao equipamento de aquisição de dados “Spider-8”. A temperatura do forno foi controlada pelos medidores internos do forno. E a do corpo (1, 2) foi controlada pelos termopares. No processo de aquecimento no forno o corpo (1, 2) eleva a sua temperatura até (560±15)°C por duas horas.

No fim do período de aquecimento, o corpo (1, 2) de prova, junto com os termopares, foi removido para uma mesa e colocado entre duas placas aquecidas de isolante de silicato (amianto). O aquecimento preliminar das placas foi realizado para melhorar a forma da curva de resfriamento do corpo, com fim de simplificar os cálculos posteriores.

Nesta posição o corpo (1, 2) de prova foi resfriado por convecção natural, condução e radiação até 170°C no período de 0,5 hora, ou 1800 segundos. No processo de resfriamento do corpo (1, 2) os valores das temperaturas  $T_{centro}$  no seu centro e  $T$  na sua superfície foram registrados com frequência 1/s como as funções  $T_{centro}(t)$  e  $T(t)$ .

O esquema dos corpos (1, 2) de prova, utilizado no experimento básico, é representado na figura 5.27:

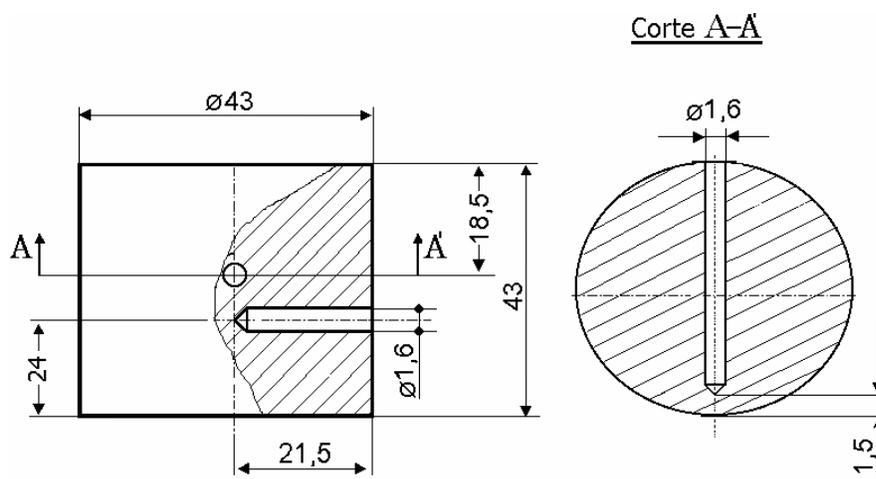


Fig. 5.27 - Esquema dos corpos (1, 2) de prova da liga AA 6061, utilizados no experimento básico.

A descrição do corpo (1, 2) de prova, utilizado no experimento básico, é a seguinte:

O corpo de prova, representado na figura 5.27, é um cilindro da liga AA 6061 de alumínio. No experimento o eixo de cilindro foi orientado verticalmente. Os furos no corpo servem para colocar os termopares e medir as temperaturas no seu centro e em sua superfície. As dimensões do corpo de prova estão em mm.

O esquema do experimento adicional para a liga de alumínio AA 6061 é idêntico ao esquema do experimento adicional com aço SAE 1045, e é mostrado na figura 5.11 (p.41).

A descrição do experimento adicional é a seguinte:

O corpo 3 de prova da liga AA 6061, junto com os dois termopares tipo “K”, para medir as temperaturas em seu centro e em sua superfície, foi colocado no forno de mufla, aquecido até 500°C e os termopares foram ligados ao equipamento de aquisição de dados “Spider-8”. A temperatura do forno foi controlada pelos medidores internos do forno e a do corpo foi controlada pelos termopares. No processo de aquecimento, no forno, o corpo 3 eleva a sua temperatura até (560±15)°C por duas horas.

No fim do período de aquecimento o corpo 3 de prova, junto com os termopares, foi removido para a mesa e colocado na caixa aquecida de isolante de silicato tipo amianto. O

aquecimento preliminar da caixa foi realizado para melhorar a forma da curva de resfriamento do corpo com fim de simplificar os cálculos posteriores.

Nessa posição o corpo 3 de prova foi resfriado por condução até 170°C, no período de 1,6 hora ou 5800 segundos. No processo de resfriamento do corpo 3 os valores das temperaturas  $T_{centro}$ , no seu centro e  $T$  na sua superfície, foram registrados com frequência 1/s como a funções  $T_{centro}(t)$  e  $T(t)$ .

A descrição do corpo 3 de prova da liga AA 6061, utilizado no experimento adicional, é a seguinte:

O corpo 3 de prova é idêntico aos corpos 1 e 2.

O esquema da caixa de isolante, utilizada no experimento adicional, é mostrado na figura 5.28:

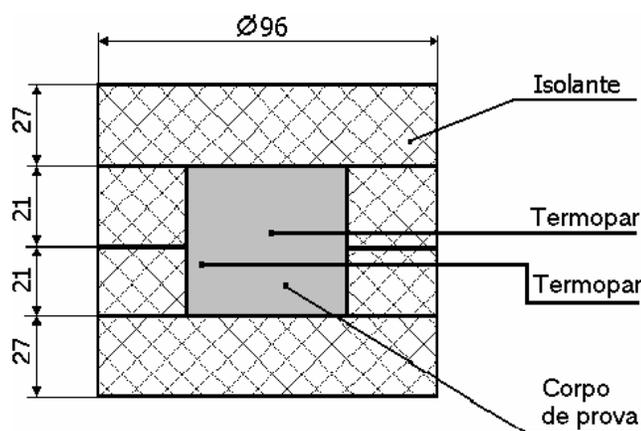


Fig.5.28 - Esquema da caixa de isolante.

A descrição da caixa de isolante, utilizada no experimento adicional, é a seguinte: A caixa de isolante foi fabricada de quatro placas separadas de isolante amianto. A espessura das paredes da caixa é a mesma. As dimensões internas da caixa são iguais às dimensões externas do corpo 3 de prova e estão em mm.

### 5.5.2 Dados experimentais, obtidos para liga de alumínio AA 6061

Todos os dados experimentais, obtidos no processo de resfriamento desses corpos de prova, estão armazenados na forma dos arquivos do programa “Microsoft Excel 2002”. A parte principal desses dados é representada neste item na forma gráfica.

Os dados primários experimentais do resfriamento dos corpos 1, 2 e 3 de prova da liga de alumínio AA 6061, na forma das curvas do resfriamento, são mostrados nas figuras 5.29, 5.30 e 5.31.

As temperaturas das superfícies dos corpos 1, 2 e 3 de prova da liga de alumínio AA 6061, obtidos num experimento complexo e registradas em temperaturas  $T_i$  indicadas pelo equipamento de aquisição de dados “Spider-8” em função do tempo de resfriamento, são mostradas na figura 5.29:

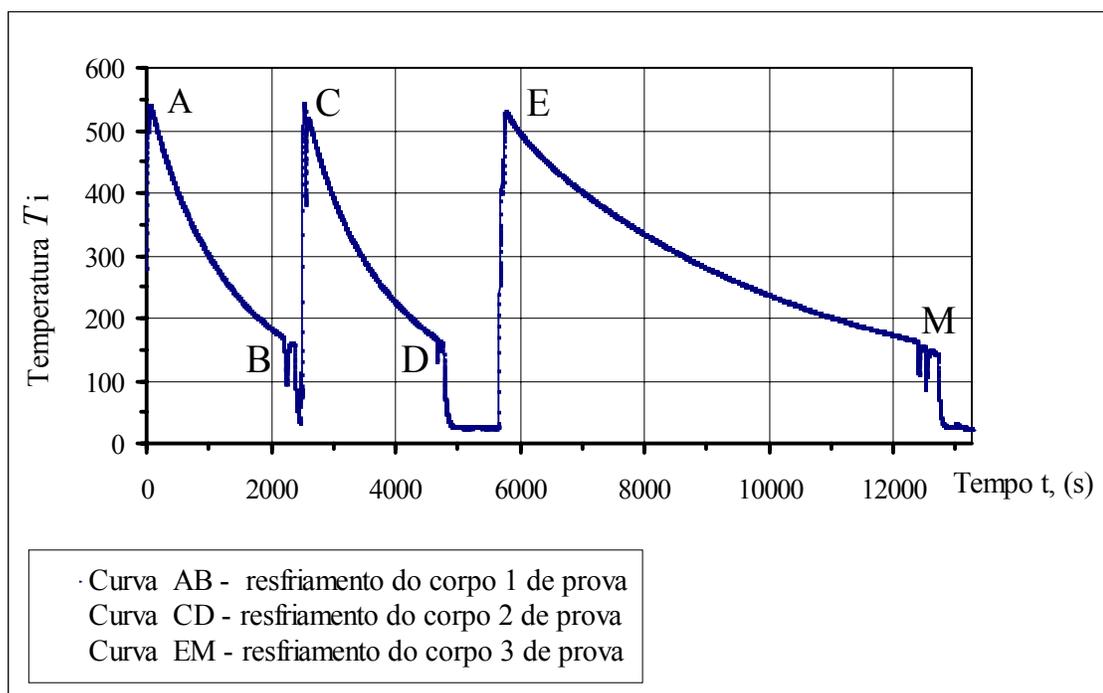


Fig. 5.29 - Curvas do resfriamento das superfícies dos corpos 1, 2 e 3 de prova da liga AA 6061 resfriados nos experimentos básicos, para a faixa de  $[560-170]^{\circ}\text{C}$ .

Para utilizar os dados experimentais primários nos cálculos posteriores foi necessário os normalizá-los relativamente ao ponto comum das temperaturas iniciais.

Os dados primários experimentais do resfriamento dos corpos 1, 2 e 3 de prova da liga de alumínio AA 6061, na forma das curvas do resfriamento, em temperaturas  $T_i$  das superfícies do corpo a resfriar, normalizadas relativamente ao ponto comum das temperaturas iniciais, são mostrados na figura 5.30:

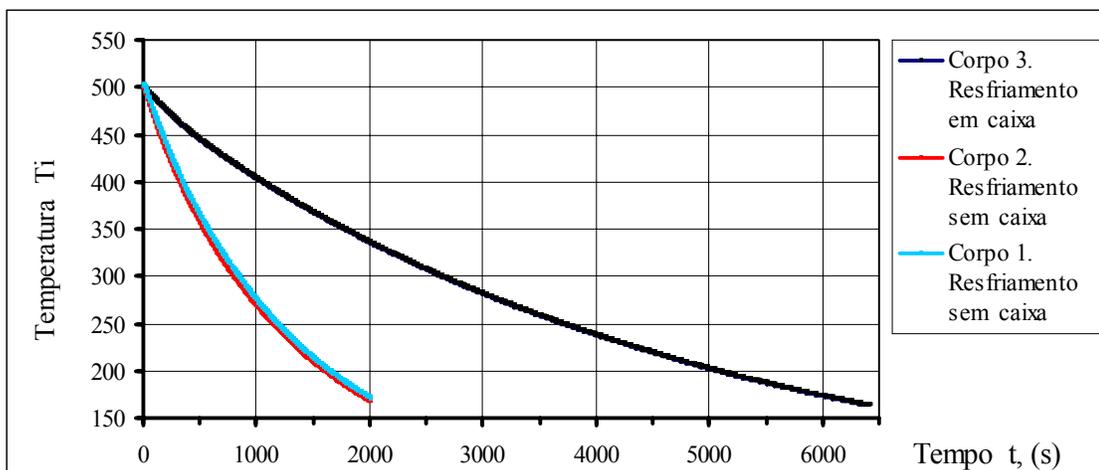


Fig. 5.30 - Temperaturas das superfícies dos corpos 1, 2 e 3 de prova da liga AA 6061, normalizadas relativamente ao ponto comum da temperatura inicial, na faixa de  $[520-170]^{\circ}\text{C}$ .

A parte mais detalhada das curvas do resfriamento do corpo 1 de prova da liga de alumínio AA 6061, que ilustra uma diferença das temperaturas da sua superfície e do seu centro, é mostrada na figura 5.31:

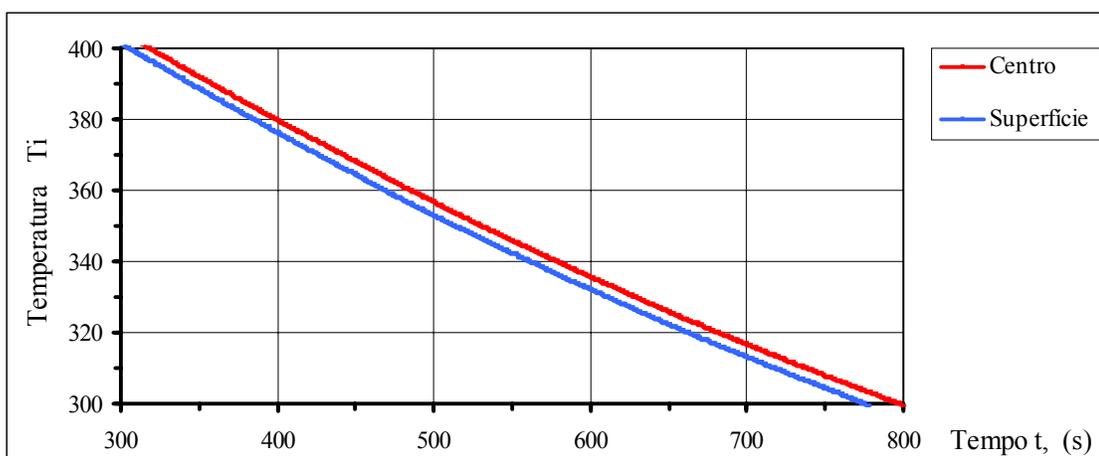


Fig. 5.31 - Temperaturas do centro e da superfície do corpo 1 de prova da liga AA 6061, na faixa de  $[420-310]^{\circ}\text{C}$ .

Observação:

Os corpos 1 e 2 de prova da liga de alumínio AA 6061 são idênticos. As curvas do resfriamento destes corpos são quase iguais. Portanto, nos cálculos posteriores, será

considerado em lugar desses corpos, o corpo 4 de prova, que integra as características médias entre os corpos 1 e 2 de prova.

As dimensões dos corpos de prova da liga de alumínio AA 6061, que foram medidas pelo micrômetro, e as suas massas, que foram medidas nos experimentos pela balança, são a seguir:

Para o corpo 1 de prova:

$$\text{Diâmetro do cilindro: } D_1 = (42,99 \pm 0,01) \text{ mm};$$

$$\text{Altura do cilindro: } l_1 = (42,98 \pm 0,01) \text{ mm};$$

$$\text{Massa: } m_1 = (0,1670 \pm 0,0000005) \text{ kg}.$$

Para o corpo 2 de prova:

$$\text{Diâmetro do cilindro : } D_2 = (43,00 \pm 0,01) \text{ mm};$$

$$\text{Altura do cilindro: } l_2 = (43,01 \pm 0,01) \text{ mm};$$

$$\text{Massa: } m_2 = (0,1666 \pm 0,0000005) \text{ kg}.$$

Para o corpo 4 de prova:

$$\text{Diâmetro do cilindro : } D = (42,995 \pm 0,01) \text{ mm};$$

$$\text{Altura do cilindro: } l = (42,995 \pm 0,01) \text{ mm};$$

$$\text{Massa: } m = (0,1668 \pm 0,0000005) \text{ kg}.$$

Para o corpo 3 de prova:

$$\text{Diâmetro do cilindro : } D_2 = (43,00 \pm 0,01) \text{ mm};$$

$$\text{Altura do cilindro: } l_2 = (43,01 \pm 0,01) \text{ mm};$$

$$\text{Massa: } m_3 = (0,1664 \pm 0,0000005) \text{ kg}.$$

A temperatura do ar foi registrada por termopar como  $T_\infty = 297\text{K}$ , ou  $24^\circ\text{C}$ .

### 5.5.3 Elaboração dos dados experimentais

Todos os dados experimentais, obtidos no processo de resfriamento dos corpos de prova da liga do alumínio AA 6061, foram elaborados pelo programa “Microsoft Excel 2002” e “Mathematica-4”. As incertezas dos cálculos que foram feitos neste item estão mostradas no Anexo 1.

### 5.5.3.1 Preparação dos dados experimentais para os cálculos computacionais

Todos os dados numéricos, adquiridos nos experimentos pelo sistema de aquisição dos dados, estão representados em unidades da temperatura  $T_i$  indicada pelo equipamento de aquisição de dados “Spider-8”. Estas unidades são aproximadas, mas não são iguais aos graus Celsius.

A diferença entre as indicações da temperatura do “Spider-8” e as temperaturas correspondentes em graus Celsius, aumenta com a temperatura medida. Já, no ponto da fusão de alumínio essa diferença chega a  $(10-25)^\circ\text{C}$ . Portanto todas as indicações do “Spider-8” foram convertidas nos graus Celsius.

Para converter os valores das temperaturas indicadas pelo “Spider-8”, nos valores das temperaturas em graus da temperatura de Celsius, foi utilizada a fórmula (5.1) (p. 35). Para converter os valores das temperaturas, calculados pela fórmula (5.1), nos valores das temperaturas em graus Kelvin, foi utilizada a fórmula (5.7) (p.45).

As faixas das temperaturas da liga de alumínio ABNT 6061, escolhidas para os cálculos de parâmetros térmicos, são mostradas nas tabelas 5.6 e 5.7:

Tab. 5.6 - Faixas das temperaturas do corpo 4 de prova da liga ABNT 6061, escolhidas para os cálculos dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ .

Medida	Temperatura média da superfície do corpo 4 de prova			Temperatura média do centro do corpo 4 de prova			Temperatura média do corpo 4 de prova		
	Indicações do Spider-8	$^\circ\text{C}$	K	Indicações do Spider-8	$^\circ\text{C}$	K	Indicações do Spider-8	$^\circ\text{C}$	K
0	475	497	770	481	503	776	477	500	773
878	286	300	574	291	305	578	289	303	576

Tab. 5.7 - Faixas das temperaturas do corpo 3 de prova da liga ABNT 6061, escolhidas para os cálculos dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ .

Medida	Temperatura da superfície do corpo 3 de prova			Temperatura do centro do corpo 3 de prova			Temperatura média do corpo 3 de prova		
	Indicações do Spider-8	$^\circ\text{C}$	K	Indicações do Spider-8	$^\circ\text{C}$	K	Indicações do Spider-8	$^\circ\text{C}$	K
0	476	499	772	478	501	774	477	500	773
2633	288	302	575	290	304	577	289	303	576

A figura 5.32 mostra as curvas do resfriamento do corpo 4 em suas temperaturas médias e as temperaturas da sua superfície livre. A equação da curva das temperaturas médias do corpo 4 foi utilizada nos cálculos posteriores para determinar a taxa do seu resfriamento:

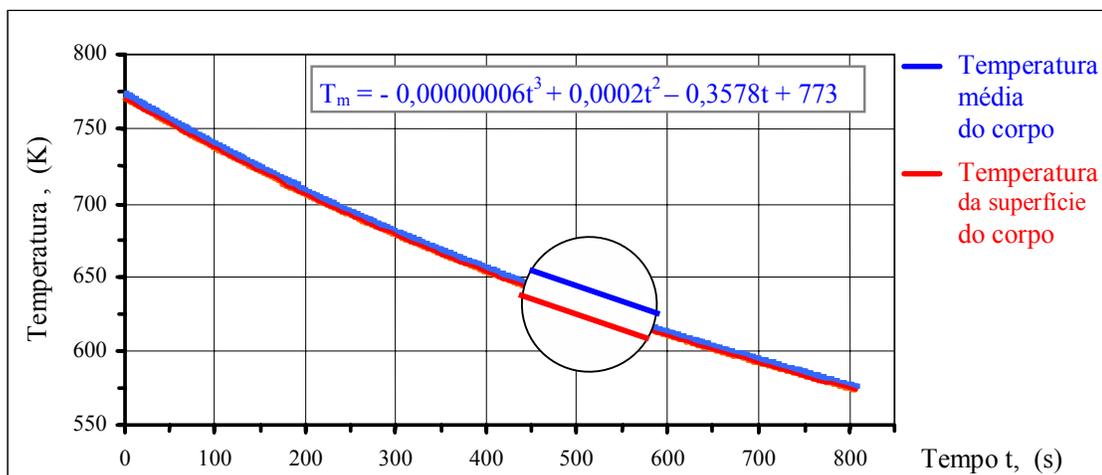


Fig. 5.32 – Curvas do resfriamento do corpo 4 de prova da liga ABNT 6061, obtidas no experimento básico, com a equação encontrada a ser aproveitada nos cálculos.

#### Áreas de troca de calor do corpo de prova

As áreas de troca de calor dos corpos de prova foram determinadas pelas fórmulas (5.10) e (5.11) do item 5.4.3.1 (p.47). As áreas calculadas do corpo de prova da liga de alumínio AA 6061 são:

Para o corpo 4 de prova:

$$A_{rad} = A_{conv} = A,$$

onde:

$A_{rad}$  - área de troca de calor por radiação;

$A_{conv}$  - área troca de calor por convecção;

$A$  - área de troca de calor por radiação e por convecção.

Levando em conta o fenômeno da dilatação térmica, o valor da área de troca de calor por radiação e por convecção, na faixa das temperaturas [300 -500]°C, é:

$$A = [(5,842 \pm 0,0012) \cdot 10^{-3}] \cdot m^2$$

$$A_{cond} = 0,5 \cdot A$$

Para o corpo 3 de prova:

A área do corpo 3 de prova é área de troca de calor por condução. O valor desta área utiliza-se no trabalho apresentado, só para avaliar as perdas térmicas condutivas, que ocorrem através do corpo 4 de prova no experimento básico. Tomando em conta o valor insignificante destas perdas, e as dimensões dos corpos mencionados que são quase iguais, admite-se que as áreas correspondentes do corpo 3 de prova e do corpo 4 de prova são iguais.

Os dados necessários para os cálculos computacionais foram definidos com base no modelo matemático de resfriamento de corpo de prova. Os dados são os seguintes:

#### Parâmetros dos experimentos

Parâmetros dos experimentos:

$m = 0,1668$  kg, massa do corpo de prova;

$A = 0,005842(m^2)$ , área de troca de calor por radiação e por convecção;

$T_{\infty} = 297K$ , temperatura do ar do meio ambiente.

#### Constantes usados nos experimentos:

$C_p = 910 \cdot \left( \frac{J}{kg \cdot K} \right)$  – calor específico da liga de alumínio AA 6061, conforme a literatura [35], [36];

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$  – constante de Stefan-Boltzman conforme a literatura [21];

$\varepsilon_T = [0,16-0,41]$  – valores possíveis, conforme a literatura [3] e [5], da emissividade total das ligas de alumínio;

$\varepsilon_T < 0,53$  – valor limiar da emissividade total, obtido teoricamente na base da equação (3.5) do “Modelo matemático do resfriamento de um corpo”, (item 3.1, p.22).

Para  $\varepsilon < 0,53$  o valor do coeficiente médio de transferência de calor por convecção,  $h$ , sempre é mais do que zero, que corresponde à natureza do fenômeno da convecção;

$h = 10 \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$  – valor possível, conforme a literatura [42], do coeficiente  $h$  médio de transferência de calor por convecção.

### 5.5.3.2 Avaliação do fluxo condutivo de calor através do corpo de prova da liga AA 6061 para o material de isolante

Para avaliar o fluxo condutivo de calor através de corpo de prova, se compara em concordância com o procedimento descrito no item 5.4.3.2 o fluxo total do calor perdido, através do corpo 4 de prova no experimento básico com o fluxo total de calor perdido, através do corpo 3 de prova no experimento adicional.

A expressão para os cálculos do fluxo condutivo de calor através do corpo de prova da liga AA 6061 para o material de isolante, obtida pelo procedimento descrito no item 5.4.3.2, é seguinte:

$$q_{cond} = \frac{1}{3} \cdot Q_{básico} \cdot \frac{\left[ \frac{dt}{dT_m} \right]_{adicional}}{\left[ \frac{dt}{dT_m} \right]_{básico}} \quad (5.25)$$

onde:

$$Q_{básico} = m \cdot C_p \cdot \left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{básico} \quad (5.21)$$

$$\left[ \frac{dt}{dT_m} \right]_{básico} \quad (5.31)$$

função inversa da derivada  $\left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{básico}$  ;

$$\left[ \frac{dt}{dT_m} \right]_{adicional} \quad (5.32)$$

função inversa da derivada  $\left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{adicional}$  ;

A figura 5.33 mostra os gráficos das funções (5.31) e (5.32) das curvas do resfriamento dos corpos 3 e 4 de prova da liga AA 6061 com as suas equações escolhidas a serem aproveitadas nos cálculos da fórmula (5.25):

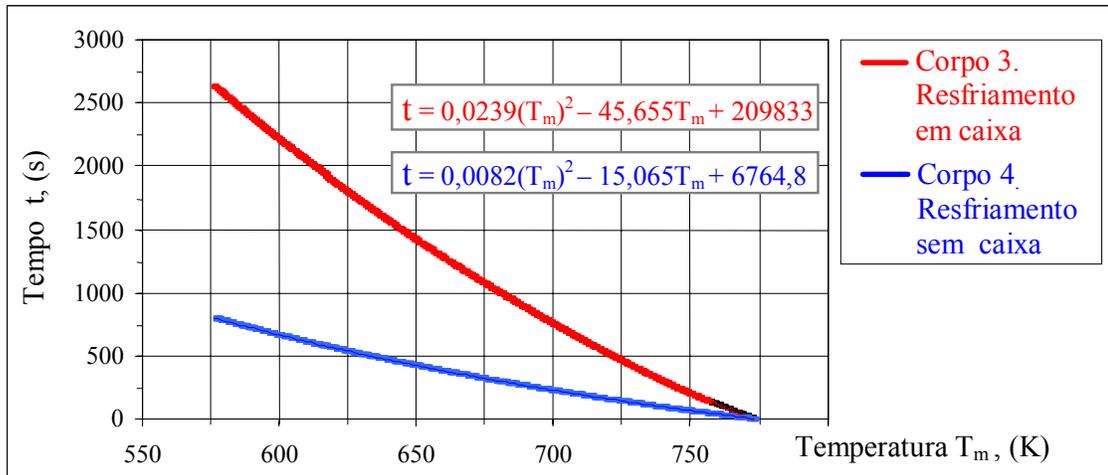


Fig. 5.33 – Curvas do resfriamento dos corpos 3 e 4 de prova da liga AA 6061, mostradas na forma das funções  $t\{T_{m(básico)}\}$  e  $t\{T_{m(adicional)}\}$ , com as suas equações encontradas a serem aproveitadas nos cálculos.

As equações das curvas da figura 5.33 foram obtidas pelo programa “Microsoft Excel 2002” por meio de seleção das linhas de tendência das curvas mencionadas, e foram utilizadas para calcular as funções (5.31) e (5.32).

A função (5.25) foi calculada para todos os momentos indicados do tempo do resfriamento do corpo 4 de prova da liga de alumínio AA 6061. O resultado deste cálculo deu a curva da figura 5.39.

A equação da curva da figura 5.39 foi obtida como a equação da linha de tendência dessa curva e é a seguinte:

$$q_{cond} = 2 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 9 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 0,0038 \cdot t + 4,995 [W] \quad (5.33)$$

A figura 5.34 apresenta graficamente a função (5.25) que descreve o processo do resfriamento do corpo 4 de prova da liga de alumínio AA 6061 por condução no experimento básico na faixa das temperaturas [500-300]°C, em relação o tempo  $t$  do resfriamento.

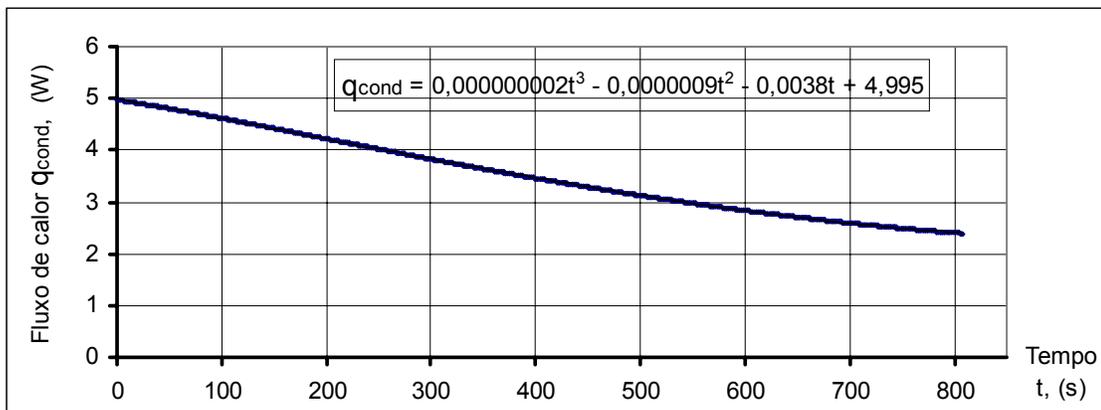


Figura 5.34. Perda condutiva de calor  $q_{cond}$  do corpo de prova da liga AA 6061, em função do tempo do resfriamento. Experimento básico. Faixa de [500 -300]°C.

Os resultados dos cálculos da quantidade de calor  $q_{cond}$ , que foram feitos pela fórmula (5.19) na faixa das temperaturas [300 -500]°C, são a seguir:

$$q_{cond} \text{ (média)} = 0,099 \cdot Q_{básico};$$

$$q_{cond} \text{ (máximo)} = 0,10 \cdot Q_{básico};$$

$$q_{cond} \text{ (mínimo)} = 0,09 \cdot Q_{básico};$$

A incerteza  $i$  das perdas térmicas  $q_{cond}$  foi calculada pela fórmula (1) do Holman, J.P., mostrada no Anexo 2 e é desprezível.

### 5.5.3.3 Determinação da taxa do resfriamento do corpo 4 de prova

A taxa  $v_{básico}$  do resfriamento do corpo de prova, que ocorreu no experimento básico, foi definida como a derivada primeira da função  $T_m(t)$  que expressa a dependência da temperatura  $T_m$  média deste corpo do tempo  $t$  de resfriamento:

$$v_{básico} = \left[ \frac{dT_m}{dt} \right]_{básico} \quad (5.28)$$

A figura 5.37 (p.67) mostra a curva do resfriamento do corpo de prova da liga de alumínio AA 6061, obtida no experimento básico para a faixa das temperaturas [500 -300]°C, junto com sua equação na forma da função  $T_m(t)$ . A equação que expressa a função  $T_m(t)$  é a seguinte:

$$T_m = -0,00000006 \cdot t^3 + 0,0002 \cdot t^2 - 0,3578 \cdot t + 773[K] \quad (5.34)$$

A taxa  $V_{básico}$ , calculada como a derivada primeira da função  $T_m(t)$ , é a seguir:

$$V_{básico} = -0,00000018 \cdot t^2 + 0,0004 \cdot t - 0,3578 \left[ \frac{K}{s} \right] \quad (5.35)$$

#### 5.5.3.4 Parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$ da liga de alumínio AA 6061

O valor médio da emissividade total ( $\varepsilon$ ) e o coeficiente médio de transferência de calor por convecção ( $h$ ) foram calculados pelo procedimento descrito no item 3.6 (p.25) deste trabalho. Introduzindo na equação básica (3.5) o valor da perda térmica condutiva (5.33) do corpo de prova do aço ABNT 1045, o valor da taxa do seu resfriamento (5.35), os valores numéricos  $A$ ,  $\sigma$ ,  $T_\infty$ ,  $m$  e  $C_p$  que foram determinados no item 5.4.3.1, o valor mencionado de  $h$  e o valor arbitrário de  $\varepsilon$ , obtém-se a expressão para calcular as curvas teóricas do resfriamento para cada valor escolhido arbitrariamente de  $\varepsilon$ :

$$\begin{aligned} & -0,1668 \cdot 910 \cdot (-0,00000018 \cdot t^2 + 0,0004 \cdot t - 0,3578) = \\ & = (2 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 9 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 0,0038 \cdot t + 4,995) + \\ & + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,005842 \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - 297^4) + h \cdot 0,005842 \cdot (T - 297). \end{aligned} \quad (5.36)$$

Os valores  $\varepsilon$ ,  $h$  e o desvio padrão médio da temperatura ( $d$ ) da curva calculada do resfriamento em relação à curva experimental do corpo de prova do aço ABNT 1045, obtidos pela expressão (5.36), são mostrados na tabela 5.8.

Tab. 5.8 - Parâmetros [ $\varepsilon$ ,  $h$ ] do corpo de prova da liga AA 6061, e desvio  $d$ , calculados para a faixa das temperaturas [500-300]°C.

Parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$ obtidos pela técnica desenvolvida											
$\varepsilon$	-	0,09	0,11	0,18	0,21	0,23	0,25	<b>0,27</b>	0,28	0,29	0,31
$h$	$\left( \frac{W}{m^2 K} \right)$	13,2	11,83	9,82	8,95	8,38	7,80	<b>7,23</b>	6,94	6,65	6,08
$d$	$K$	21	15,52	7,58	4,9	3,22	2,30	<b>1,63</b>	1,67	2,09	3,70

Obs.:

Os valores mostrados, em **negrito**, representam os resultados finais dos cálculos. Estes valores correspondem à combinação de dois critérios que são:

- inexistência dos valores negativos do coeficiente  $h_T$  para quaisquer temperaturas no intervalo [500 -300] °C;
- valor mínimo do desvio padrão entre a curva calculada e experimental.

Os resultados dos cálculos, representados na tabela 5.8, são mostrados graficamente na figura 5.35.

A figura 5.35 mostra a curva calculada ótima e a curva experimental do resfriamento do corpo de prova da liga AA 6061, na faixa das temperaturas [770 - 570]K, ou de [500 - 300]°C.

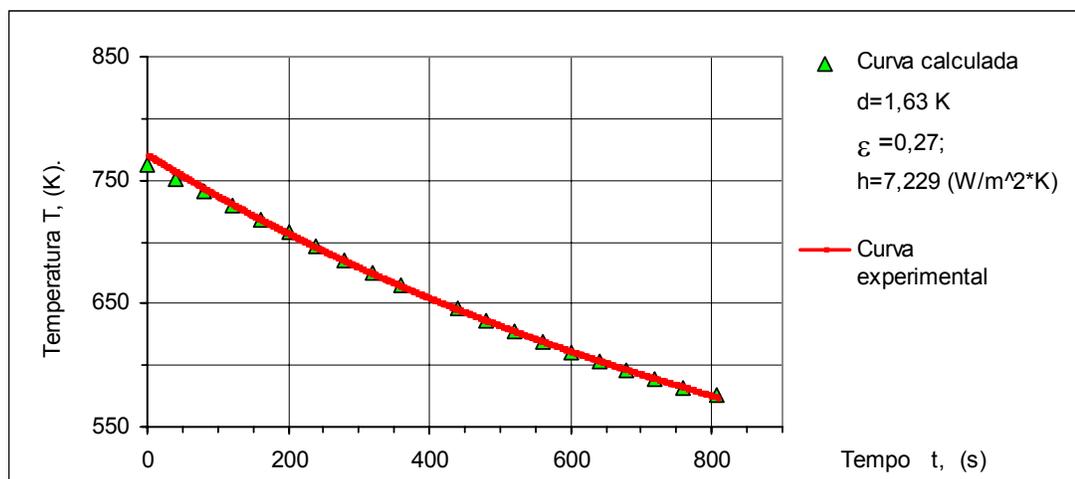


Fig. 5.35 - Curva experimental e a curva calculada ótima do resfriamento do corpo 4 de prova da liga AA 6061. Experimento básico na faixa de [770 - 570]K.

Os parâmetros térmicos [ $\varepsilon_T$ ,  $h$ ,  $h_T$ ] da liga do alumínio AA 6061, obtidos pela técnica desenvolvida, são mostrados graficamente nas figuras 5.36, 5.37 e 5.38.

A figura 5.36 ilustra a dependência do coeficiente  $\varepsilon_T$  da temperatura  $T$  superficial do corpo de prova do alumínio AA 6061, na faixa de [570-770]K, no caso em que o coeficiente  $h=7,23$  W/m<sup>2</sup>K. Uma variação (ou incerteza) grande da temperatura superficial provoca uma variação insignificante de  $\varepsilon_T$ :

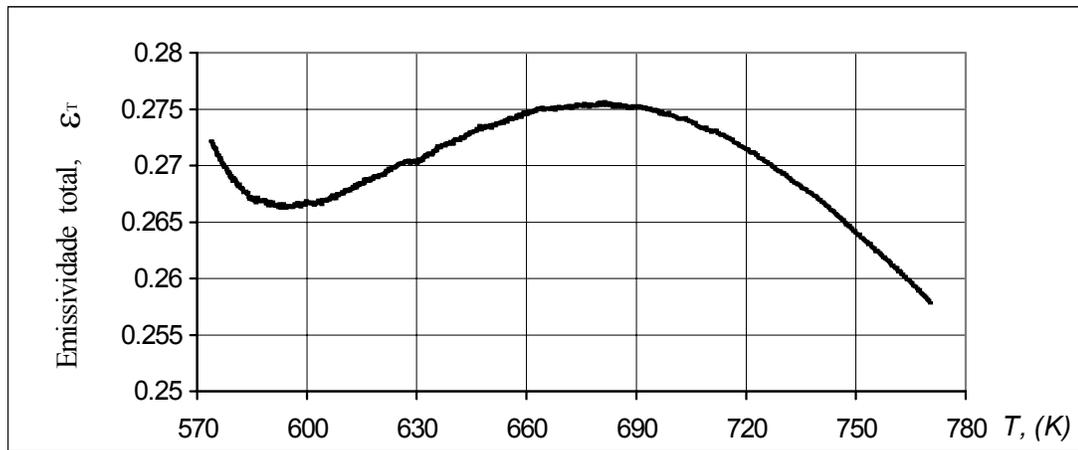


Fig. 5.36 - Variação da emissividade total da superfície do corpo de prova da liga AA 6061. Para o coeficiente  $h=7,23$  (W/m<sup>2</sup>K).

A curva da variação da emissividade total mostra que a variação de  $\epsilon_T$  com a temperatura  $T$  é insignificante.

A figura 5.37 ilustra graficamente a dependência do coeficiente  $h_T$ , da temperatura  $T$  superficial do corpo de prova da liga de alumínio AA, na faixa de [570-770]K, no caso em que o coeficiente  $\epsilon = 0,27$ .

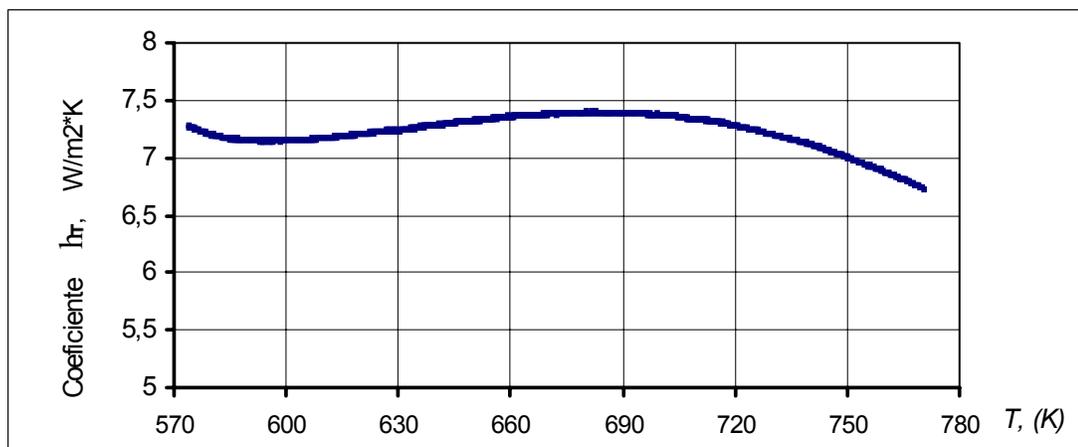


Fig. 5.37 - Variação do coeficiente da transferência de calor por convecção do corpo de prova da liga AA 6061. Para  $\epsilon = 0,27$ .

A variação do coeficiente de transferência de calor por convecção com a temperatura é insignificante.

A figura 5.38 mostra as perdas térmicas do corpo 4 de prova da liga AA 6061, resfriado no experimento básico nos processos combinados de radiação, convecção e condução.

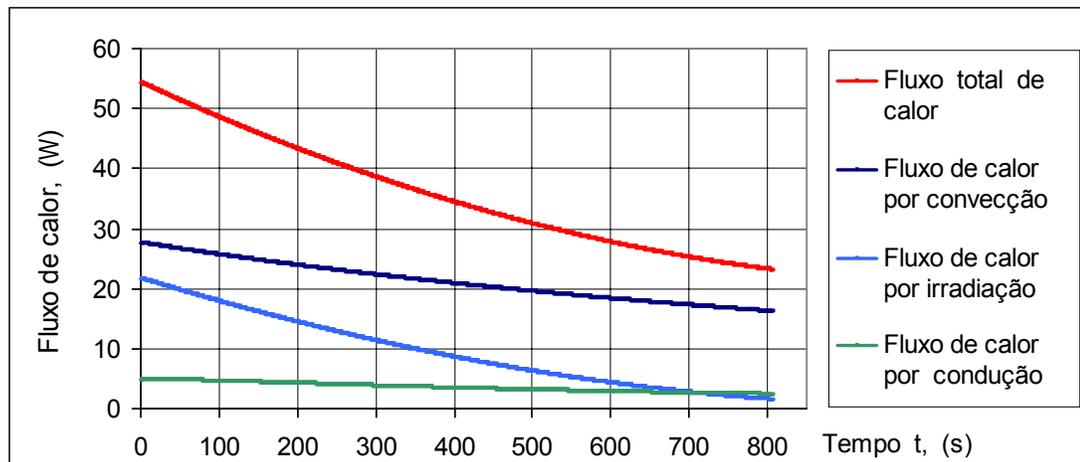


Fig.5.38 - Perdas térmicas do corpo 4 de prova da liga AA 6061

na faixa de [500 - 300]°C. Para  $\varepsilon=0,27$ ;  $h=7,23$  (W/m<sup>2</sup>K).

## 6. APLICAÇÃO DO MÉTODO DO IBF PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS TÉRMICOS $\epsilon$ E $h$ DE UM CORPO SÓLIDO

O método do IBF foi utilizado para determinar a emissividade total do corpo de prova de aço ABNT 1045 e do corpo de prova da liga de alumínio AA 6061.

A dificuldade da aplicação do método do IBF é causada por falta da informação sobre os elementos principais do método mencionado. O IBF não mostra, na literatura ([1], [43]) os elementos seguintes do seu método:

- sua montagem experimental;
- seu programa computacional das simulações do resfriamento dos corpos de prova.

Portanto, nessa obra foram utilizados os elementos principais do método do IBF, descritos no seu procedimento (item 2.1.2, p.5) para determinar os parâmetros  $\epsilon$  e  $h$ . Os dados de literatura e experimentais, para determinar os parâmetros  $\epsilon$  e  $h$ , e a fórmula para calcular o valor da emissividade, foram os mesmos dados e a fórmula, utilizados na inovação. Esses dados e a fórmula são os seguintes:

- fórmula empírica do IBF [1] para determinar o parâmetro  $h$  (item 2.1.2);
- curvas experimentais do resfriamento do corpo de prova de aço ABNT 1045 e do corpo de prova da liga de alumínio AA 6061, obtidos pela técnica desenvolvida (item 5.4.2 e 5.5.2);
- parâmetros físicos de aço ABNT 1045 e da liga de alumínio AA 6061 (item 2.3) que foram utilizados nos cálculos;
- equação (3.5) básica da inovação (item 3.1, p.22) para calcular as curvas teóricas do resfriamento do corpo de prova;
- Programa dos cálculos computacionais “Mathematica-4” of Wolfram Research, Inc., utilizado na inovação para calcular as curvas teóricas do resfriamento do corpo de prova.

### 6.1 Determinação do coeficiente $h$ do corpo de prova do aço ABNT 1045 e da liga AA 6061

O coeficiente médio da transferência de calor por convecção ( $h$ ) foi calculado

pela equação<sup>1</sup> empírica da literatura [1]:

$$h = 3 \cdot \left( \frac{v - v_{\infty}}{1 \cdot K} \right)^{0,25} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (6.1)$$

onde:

$v$  – temperatura da superfície do corpo de prova, (K);

$v_{\infty}$  – temperatura do meio ambiente, (K).

Os resultados dos cálculos de  $h$ , que foram feitos pela formula (6.1) são seguintes:

$$\text{Para } 400^{\circ}\text{C:} \quad h \approx 13,20 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (6.2)$$

$$\text{Para } 800^{\circ}\text{C:} \quad h \approx 15,82 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (6.3)$$

onde:

$v = 400^{\circ}\text{C}$ , é igual à temperatura média da faixa de  $[300 - 500]^{\circ}\text{C}$  das temperaturas do resfriamento do corpo de prova de alumínio AA 6061;

$v = 800^{\circ}\text{C}$ , temperatura média da faixa de  $[700 - 900]^{\circ}\text{C}$  das temperaturas do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045.

Os resultados obtidos foram calculados para a temperatura do ar do meio ambiente

$$v_{\infty} = (24^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}\text{C}) = 297\text{K}.$$

## 6.2 Determinação do coeficiente $\varepsilon$ do aço ABNT 1045

As curvas teóricas do resfriamento do corpo de prova de prova do aço ABNT 1045 foram calculadas pela equação (3.5) básica, na base dos valores arbitrários de  $\varepsilon$  e do valor do coeficiente  $h$  seguinte:

$$h \approx 15,82 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

---

<sup>1</sup> A equação citada é escrita nos símbolos utilizados na literatura [1].

Introduzindo na equação básica (3.5) o valor da perda térmica condutiva (5.27) do corpo de prova do aço ABNT 1045; o valor da taxa do seu resfriamento (5.29); os valores numéricos  $A$ ,  $\sigma$ ,  $T_\infty$ ,  $m$  e  $C_p$  que foram determinados no item 5.4.3.1; o valor mencionado de  $h$  e o valor arbitrário de  $\varepsilon$  obtém-se a expressão para determinar as curvas teóricas do resfriamento para cada valor escolhido arbitrariamente da emissividade  $\varepsilon$ :

$$-0,957 \cdot 720(-0,00015 \cdot t^2 + 0,041 \cdot t - 4,1779) = (9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 1,0735 \cdot t + 109,39) + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 0,009344 \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - 297^4) + 15,82 \cdot 3 \cdot 0,009344 \cdot (T - 297). \quad (6.4)$$

A estrutura da expressão (6.4) mostra as possibilidades de determinar o valor de  $\varepsilon$  para cada par dos parâmetros ( $t$ ,  $T$ ). Estes são conhecidos como as características da curva experimental do resfriamento do corpo de prova de prova do aço ABNT 1045:

$t$  – tempo do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045;

1 unidade de tempo, utilizado nos cálculos, é igual a 3(s);

$t \subset [0, 89]$  unidades de tempo;

$T \subset [970, 1205]$ K.

Os resultados dos cálculos da expressão 6.4 estão representados na tabela 6.1.

Tab. 6.1 - Parâmetros [ $h$ ,  $\varepsilon$ ] do aço ABNT 1045 e desvio  $d$ , obtidos pelo método do IBF, na faixa de [900 - 700]°C.

$h$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	15,82					
$\varepsilon$	-	0,60	0,70	<b>0,705</b> *	0,72	0,74	0,76
$d$	$K$	36,4	10,1	9,8	10,4	15,3	21,8

\* - solução ótima. Esta solução corresponde à curva calculada que é a mais próxima em relação à curva experimental do resfriamento.

A figura 6.1 mostra a curva calculada ótima e a curva experimental do resfriamento do corpo de prova de aço ABNT 1045.

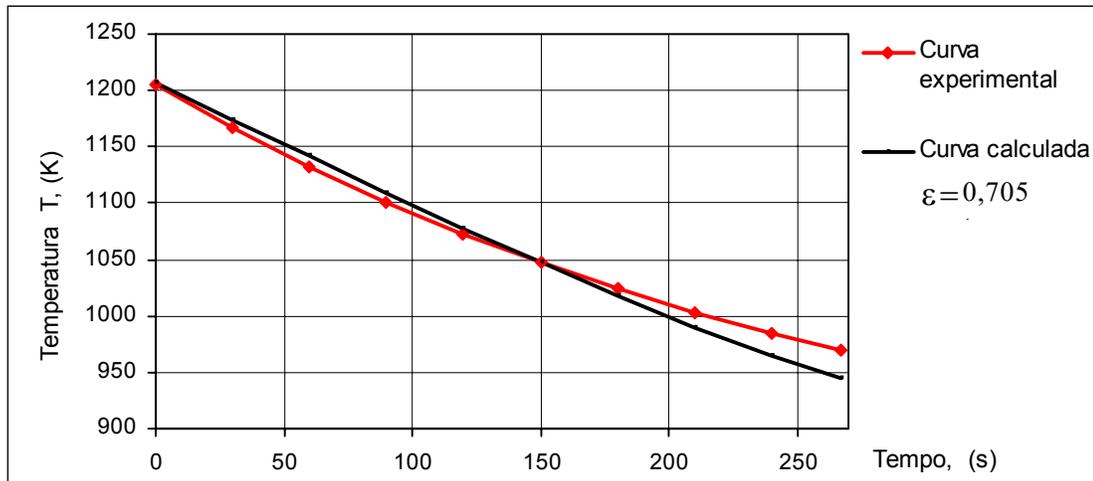


Fig. 6.1 – Curva calculada pelo método do Instituto IBF e a curva experimental do resfriamento do corpo de prova do aço ABNT 1045 na faixa de [1220 - 970]K.

Para o coeficiente  $h(T) = 15,82$  (W/m<sup>2</sup>K).

### 6.3 Determinação do coeficiente $\varepsilon$ da liga de alumínio AA 6061

As curvas teóricas do resfriamento do corpo de prova de prova de alumínio AA 6061 foram calculadas pela equação (3.5) básica, na base dos valores arbitrários de  $\varepsilon$  e do valor do coeficiente  $h$  seguinte:

$$h \approx 13,20 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Introduzindo na equação básica (3.5) o valor da perda térmica condutiva (5.19) do corpo de prova do aço ABNT 1045, o valor da taxa do seu resfriamento (5.21), os valores numéricos  $A$ ,  $\sigma$ ,  $T_\infty$ ,  $m$  e  $C_p$  que foram determinados no item 5.5.3.1, o valor mencionado de  $h$  e o valor arbitrário de  $\varepsilon$ , obtém-se a expressão (6.5) para determinar as curvas teóricas do resfriamento, para cada valor escolhido arbitrariamente da emissividade  $\varepsilon$ :

$$\begin{aligned} & -0,1668 \cdot 910 \cdot (-0,00000018 \cdot t^2 + 0,0004 \cdot t - 0,3578) = \\ & = \left( 2 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 9 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 0,0038 \cdot t + 4,995 \right) + \\ & + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,005842 \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - 297^4) + 13,20 \cdot 0,005842 \cdot (T - 297). \end{aligned} \quad (6.5)$$

Os resultados dos cálculos da expressão 6.5 estão representados na tabela 6.2.

Tab. 6.2 - Parâmetros  $[h, \varepsilon]$  do alumínio AA 6061 e desvio  $d$ ,  
obtidos pelo método do IBF, na faixa de  $[500 - 300]^{\circ}\text{C}$ .

$h$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	13,20							
$\varepsilon$	-	0,05	0,07	<b>0,09</b> *	0,10	0,11	0,12	0,13	0,15
$d$	$K$	26,1	21,4	21,0	21,1	23,1	27,0	31,3	39,2

\* - solução ótima. Esta solução corresponde à curva calculada ótima que é a mais próxima em relação à curva experimental do resfriamento.

A figura 6.2 mostra a curva calculada ótima e a curva experimental do resfriamento do corpo de prova da liga de alumínio AA 6061.

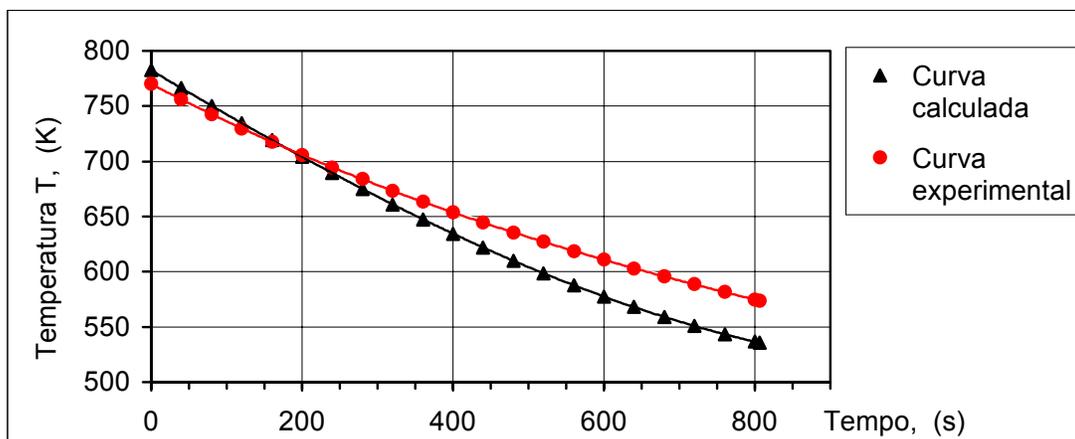


Fig. 6.2 – Curva calculada pelo método do Instituto IBF e a curva experimental do resfriamento do corpo de prova da liga de alumínio AA 6061 na faixa de  $[770 - 570]\text{K}$ .

Para o coeficiente  $h(T) = 13,2 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ .

## 7 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação dos resultados obtidos no trabalho representado foi feita na forma das tabelas e organogramas. A discussão sobre os resultados comparados foi feita com base nos dados mostrados nessas tabelas e organogramas. A comparação dos resultados mencionados e a discussão sobre eles estão a seguir:

### 7.1 Comparação da técnica desenvolvida com o método do Instituto IBF

A comparação da técnica desenvolvida com o princípio do Instituto IBF foi feita por critérios a seguir:

- essência da técnica de determinar dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ ;
- dados necessários para a técnica de determinar dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ ;

As essências das técnicas mencionados de determinar dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$  de um corpo sólido estão comparadas na tabela 7.1.

Tab. 7.1 – Essência da técnica desenvolvida e do método do Instituto IBF para determinar dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ .

Técnica desenvolvida	Método do Instituto IBF
<p>Obtenção, através dos cálculos térmicos, da curva teórica do resfriamento do corpo de prova, que é a mais próxima em relação à curva experimental. Os parâmetros <math>\varepsilon</math> e <math>h</math> da equação desta curva são os valores térmicos procurados.</p> <p>O par dos parâmetros <math>\varepsilon</math> e <math>h</math> da equação da curva teórica obtém-se como as raízes da equação da curva experimental do resfriamento.</p>	<p>Obtenção, através dos cálculos térmicos da curva teórica do resfriamento do corpo de prova, que é a mais próxima em relação à curva experimental. O parâmetro <math>\varepsilon</math> da equação desta curva é o valor médio procurado do coeficiente da emissividade total.</p> <p>O parâmetro <math>\varepsilon</math> da equação da curva teórica escolhe-se arbitrariamente. O valor de <math>h</math> que se utiliza para obter a curva teórica calcula-se pela fórmula aproximada de literatura.</p>

Os dados necessários para utilização da técnica desenvolvida de determinar os parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$  e para utilização do método do Instituto IBF são mostrados na tabela 7.2:

Tab. 7.2 – Dados necessários para determinar dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ .

n	Técnica desenvolvida	Método do Instituto IBF
1	Parâmetros geométricos do corpo	Parâmetros geométricos do corpo
2.	Curva do resfriamento do centro do corpo	Curva do resfriamento do centro do corpo
3.	Curva do resfriamento da superfície do corpo examinado	-
4.	Perdas de calor através do corpo para o dispositivo de suporte	Perdas de calor através do corpo para o dispositivo de suporte
5.	Calor específico do material	Calor específico do material
6.	Massa do corpo	-
7.	-	Densidade do material
8.	-	Condutibilidade térmica do material
9.	-	Coefficiente $h$ médio da transferência de calor através do corpo para o meio ambiente

A comparação das técnicas (desenvolvida e do IBF) de determinar dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$  foi feita na forma de organogramas. Os organogramas, junto com as suas unidades constitutivas e as inter-relações, representam, graficamente, todos os passos necessários para determinar os valores dos parâmetros  $\varepsilon$  e  $h$ . Os organogramas mencionados são mostrados nas figuras 7.1 e 7.2.

A figura 7.1 mostra o organograma da determinação pela inovação da curva teórica do resfriamento:

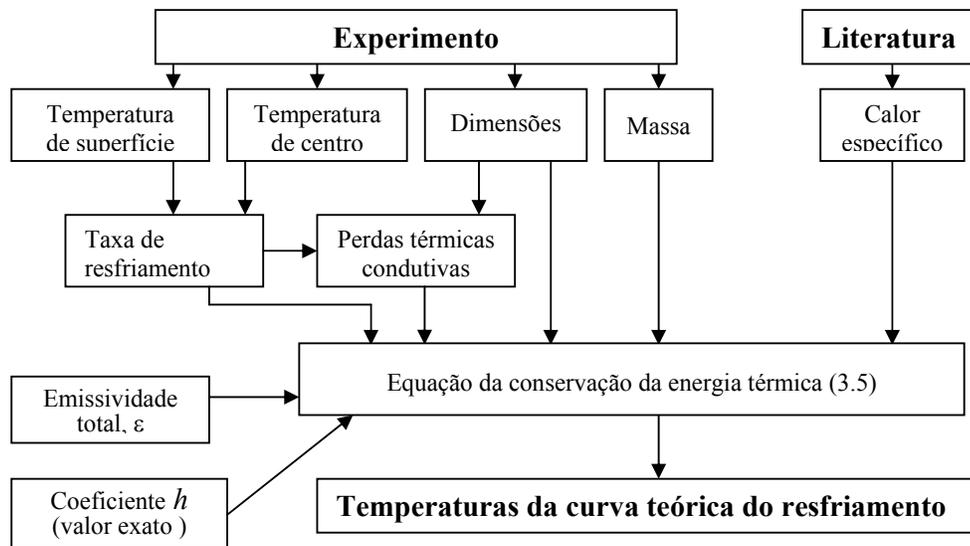


Fig. 7.1 - Organograma para determinar as temperaturas da curva teórica do resfriamento de um corpo sólido pela técnica desenvolvida.

A figura 7.2 mostra a organograma da determinação, pelo método do IBF, da curva teórica do resfriamento de um corpo sólido:

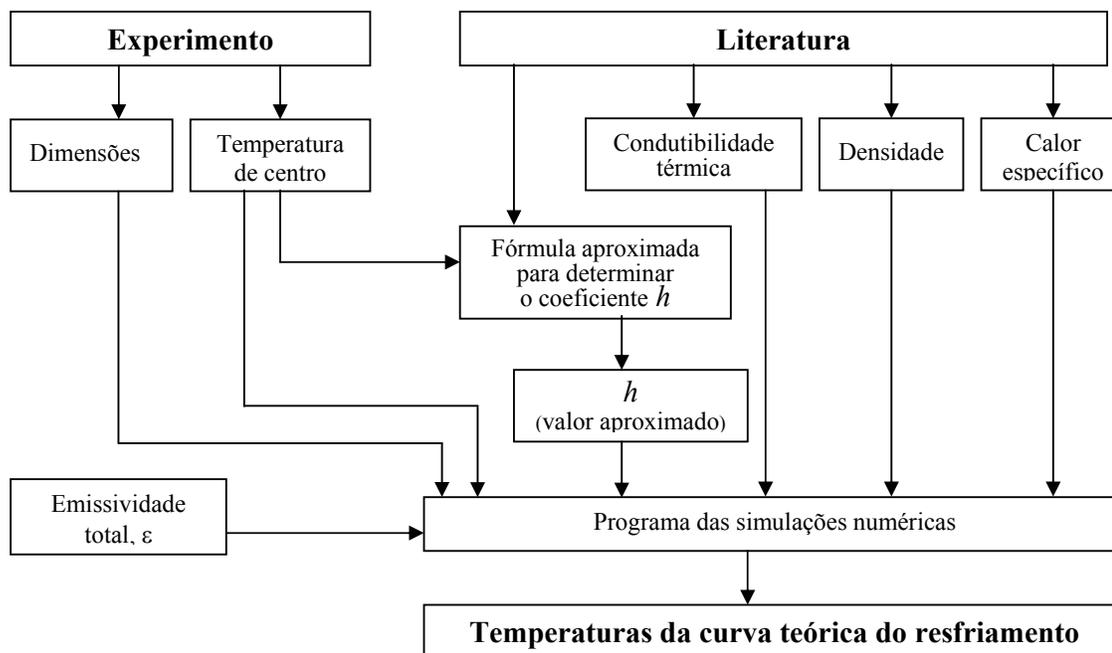


Fig. 7.2 - Organograma para determinar as temperaturas da curva teórica do resfriamento de um corpo sólido pelo método do IBF.

## 7.2 **Discussão sobre o método do Instituto IBF**

A descrição do método do IBF, representada na literatura [1] e [43], foi feita em linhas gerais, insuficientemente para a sua utilização e teve o caráter muito resumido. Portanto, é impossível utilizar este método na prática. Mas é possível analisar em geral as vantagens e desvantagens deste método.

A comparação dos valores dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ , representados nas tabelas 5.5, 5.8, 6.1 e 6.2, mostra que todos os resultados definitivos, obtidos pelo método do IBF são os resultados aproximados intermediários, obtidos através da técnica desenvolvida. Esta observação significa:

- o método do Instituto IBF é um caso particular da técnica desenvolvida;
- o método do Instituto IBF pode fornecer o valor exato de  $\varepsilon$ , se o for calculado na base exata de  $h$ .

## 7.3 **Discussão sobre a comparação do método desenvolvido para determinar os parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$ , e o método do Instituto IBF.**

A comparação do método desenvolvido e do método do Instituto IBF para determinar os parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ , feita nas tabelas 7.1, 7.2 e nas figuras 7.1 e 7.2, mostra o seguinte:

- 1). o método desenvolvido e o método do Instituto IBF para determinar dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$  são os métodos bem diferentes;
- 2). os dados experimentais que são necessários para utilizar os métodos mencionados são quase mesmos;
- 3). os dados de literatura que são necessários para utilizar os métodos mencionados são muito diferentes por causas a seguir:
  - para utilizar o método desenvolvido exige-se só um dado de literatura;
  - para utilizar o método do Instituto IBF exigem-se os quatro dados de literatura.

Portanto, o método desenvolvido fornece os valores mais exatos dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$  do que o método do Instituto IBF.

#### 7.4 Comparação dos valores dos parâmetros $\varepsilon$ e $h$ , obtidos pela técnica desenvolvida e pelo princípio do IBF aplicado para mesma técnica

A comparação dos valores dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ , obtidos pela técnica desenvolvida e pelo princípio do IBF, aplicado para a mesma técnica, é representada na forma das tabelas.

A tabela 7.3 mostra os valores dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ , obtidos pelo corpo de prova do aço ABNT 1045, pela técnica desenvolvida e pelo método do IBF aplicado para a mesma técnica:

Tab.7.3 – Comparação dos valores dos parâmetros  $\varepsilon$  e  $h$ , obtidos para o corpo de prova do aço ABNT 1045 pela técnica desenvolvida e pelo método do IBF aplicado para a mesma técnica, com os dados de literatura.

Método de determinação de parâmetro	Parâmetro do corpo de prova do aço ABNT 1045		Desvio padrão médio da curva teórica em relação a curva experimental do resfriamento
	$\varepsilon$	$h$	$d$
	-	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$^{\circ}C$
Técnica desenvolvida	0,83± 0,03	3,5 ± 3	5,14
Método do IBF aplicado para a mesma técnica	0,70± 0,03	15,82	9,8
Dados de literatura	0,78 - 0,90 fontes: [1], [3], [5], [24]	(-)*	-

\* - A pesquisa profunda na literatura não encontrou os valores ou fórmulas para determinar o coeficiente  $h$  médio de transferência de calor por convecção, aplicados para o esquema do resfriamento do corpo de prova mostrado na fig. 5.9.

A tabela 7.4 mostra os valores dos parâmetros térmicos  $\varepsilon$  e  $h$ , obtidos para o corpo de prova da liga de alumínio AA 6061, pela técnica desenvolvida, e pelo método do IBF aplicado para a mesma técnica:

Tab.7.4 – Comparação dos valores dos parâmetros  $\varepsilon$  e  $h$ , obtidos para o corpo de prova da liga de alumínio AA 6061 pela técnica desenvolvida e pelo método do IBF aplicado para a mesma técnica, com os dados de literatura.

Método de determinação de parâmetro	Parâmetro do corpo de prova da liga de alumínio AA 6061		Desvio padrão médio da curva teórica em relação a curva experimental do resfriamento
	$\varepsilon$	$h$	$d$
	-	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$^{\circ}C$
Técnica desenvolvida	0,27± 0,03	7,2 ± 0,4	1,6
Método do IBF aplicado para a mesma técnica	0,09± 0,03	13,2	21
Dados de literatura	0,16 - 0,41 fontes: [3], [5]	(-)*	-

\* - A pesquisa profunda na literatura não encontrou os valores ou fórmulas para determinar o coeficiente  $h$  médio da transferência de calor por convecção, aplicados para o esquema do resfriamento de corpo de prova mostrada na fig. 5.9.

### 7.5 Discussão sobre os valores obtidos dos parâmetros térmicos $\varepsilon$ e $h$

A comparação dos resultados obtidos pela técnica desenvolvida e pelo método do IBF aplicado para a mesma técnica, que são representados nas tabelas 7.3 e 7.4, mostra seguinte:

- 1). As curvas teóricas do resfriamento dos corpos de prova do aço ABNT 1045 e

do alumínio AA 6061, obtidos pela técnica desenvolvida, têm o desvio padrão médio da temperatura da curva experimental menor do que as curvas teóricas do resfriamento de mesmos corpos, obtidas pelo método do IBF aplicado para a mesma técnica;

- 2). Os valores de  $\varepsilon$ , obtidos através da técnica desenvolvida para os corpos de prova do aço ABNT 1045 e do alumínio AA 6061, estão em concordância com os dados de literatura.
- 3). Os valores de  $\varepsilon$ , obtidos pelo método do IBF aplicado para a técnica desenvolvida, para os corpos de prova do aço ABNT 1045 e do alumínio AA 6061, ficam fora de dados de literatura.
- 4). Os valores de  $h$ , obtidos pela técnica desenvolvida para os corpos resfriados de prova do aço ABNT 1045 e do alumínio AA 6061, são os resultados da elaboração dos dados experimentais do resfriamento destes corpos executado nos condições mostradas na figura 3.1. A pesquisa profunda na literatura não encontrou quaisquer dados obtidos as condições mencionadas para comparar os resultados.
- 5). Os valores de  $h$ , utilizados no método do Instituto IBF para os corpos de prova do aço ABNT 1045 e do alumínio AA 6061, são os dados aproximados de literatura.

## 8. CONCLUSÕES

Os resultados, obtidos no presente trabalho, são seguintes:

1. Foi desenvolvida a técnica para determinar o valor médio da emissividade total de um corpo sólido. A aplicação dessa inovação fornece os resultados mais exatos do que o seu protótipo. O procedimento detalhado para utilizar a inovação está representado no Anexo 2.
2. Foram obtidos os valores médios da emissividade total do corpo de prova do aço ABNT 1045 e da liga de alumínio AA 6061. Todos os valores obtidos correspondem aos dados de literatura;
3. Foi desenvolvida a técnica para determinar o coeficiente médio de transferência de calor por convecção através, de corpo aquecido para o ar. A aplicação dessa técnica junto com a inovação forneceu os resultados exatos no processo de determinação do valor médio da emissividade total de um corpo sólido. A técnica mencionada pode ser utilizada para qualquer área de indústria e de ciência;
4. Foi desenvolvida, favoravelmente, a técnica [44] para avaliação numérica de perdas de calor de peça aquecida, através de dispositivo de suporte de material com as propriedades físicas desconhecidas. A aplicação dessa técnica junto com a inovação forneceu os resultados exatos no processo de determinação do valor médio da emissividade total de um corpo sólido. A técnica mencionada pode ser utilizada para qualquer área da indústria e da ciência.

## **9. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Como sugestões para futuros trabalhos relativos à determinação de parâmetros térmicos de materiais forjados, poderiam ser divididas em duas direções distintas de estudos:

1. Aplicar a técnica desenvolvida para a determinação do valor médio do calor específico do material do corpo forjado.
2. Desenvolver um programa computacional para facilitar a utilização do método da elaboração dos dados.

**REFERÊNCIAS**

1. KOPP, R.; PHILLIP, F.-D. Physical parameters and boundary conditions for the numerical simulation of hot forming processes. **Steel Research**, Verlag Stahlesisen, Dusseldorf, v. 63, n. 9, p. 392-398, set. 1992.
2. FRANK, K. **Princípios da Transmissão de calor**. 2ed. São Paulo: Eduard Blucher, 1977. p. 5 -10, p. 184.
3. WILLIAM, B. R.W. **Measurements of total hemispherical emissivity of variuos oxidized metals at higt temperature**. Langley Field, Va: Langley Aeronautical Laboratory, 1958. 44p. Disponível em: <<http://naca.larc.nasa.gov/reports/1958/naca-tn-4206/naca-tn-4206.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2003.
4. ПРОХОПЕНКО, Н.Н. **Надёжность технологических систем**. Москва, 2002. Disponível em: <<http://www.tnm.ru/Nadezh/NadezhTC.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.  
(PROKHORENCO, N.N. **Segurança de sistemas tecnológicos**. Moscou, 2002. Disponível em: <<http://www.tnm.ru/Nadezh/NadezhTC.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2003).
5. MICHAEL, F. M. **Radioative Heat Transfer**. New York: Academie Press, 1993. p.136-139., p.764-769.
6. HAHN, P.A. et al. A new setup for the determination of emissivity by a dynamic method. Abstract. **High Temperatures - High Pressures**. London, v.31, n.3, p.307 – 320, mar. 1999. Disponível em: <<http://www.hthpweb.com/htabs/h31/htrt136.html>>. Acesso em: 8 abr. 2003.
7. KIRCHHOFF, R; BAUER, W. **Spectral and total emissivities of non-metallic refractory materials**. Duisburg: Gerhard-Mercator-Universität, 1999. Disponível em: <<http://www.zae-bayern.de/ectp/abstracts/kirchhoff1.html>>. Acesso em: 8 abr. 2003.
8. AARON, J.R.; WON-KYU R. Constant-Pressure Specific Heat to Hemispherical Total Emissivity Ratio for Undercooled Liquid Nickel, Zirconium, and Silicon. Abstract. **Metallurgical and materials transactions B**. Varrendale, v. 26B, n.3, 1995. Disponível em: <<http://www.tms.org/pubs/journals/MT/B/9506/abstracts-1996.9506.B.html#8>>. Acesso em: 6 abr. 2003.

9. ZHANG, B.; REDGROVE, J.; CLARK, J. A transient method for total emissivity estimation. In: FIFTEENTH SYMPOSIUM ON THERMOPHYSICAL PROPERTIES, 7., 2003, Boulder. National Institute of Standards and Technology; Committee on Thermophysical Properties, Heat Transfer Division, American Society of Mechanical Engineers. Disponível em: < <http://symp15.nist.gov/pdf/p479.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2003.
10. POCO graphite. **Properties and Characteristics of Graphite**. 2001. Decatur, USA, 2001. p.14.1-14.2. Disponível em: <<http://www.poco.com/Library/semi/SIPChap14.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2003.
11. BRANDT, R. et al. **The IKE group for thermophysical properties**. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für kernenergetik und energiesysteme. Disponível em: <[http://www.ike.uni-stuttgart.de/dienste/tp/thermophys\\_e.htm](http://www.ike.uni-stuttgart.de/dienste/tp/thermophys_e.htm)>. Acesso em: 3 abr. 2003.
12. AMERICAN Society for Testing and Materials. **Standard Test Method for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques: ASTM E408-71(2002)**. Abstract. New York –Washington, 2003. Disponível em: <<http://webstore.ansi.org/ansidocstore/product.asp?sku=ASTM+E408%2D71%282002%29>>. Acesso em: 12 jun. 2003.
13. TSUYOSHI, M.T.; Ono, A.A. **A Measurement Technique for Hemispherical Total Emissivity Using a Feedback-Controlled Pulse Current Heating**. Ibaraki: National Research Laboratory of Metrology, 1999. Disponível em: <<http://www.zae-bayern.de/ectp/abstracts/matsumoto1.html>>. Acesso em: 8 abr. 2003.
14. MARCEL, E.L. et al. **Emissivity Independent Process Control in a Short Wavelength ACC Lamp RTP Chamber**. Vancouver, Canada: Vortek Industries, 2002. Disponível em: < <http://www.vortek.com/papers/paper3.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2003.
15. SPISIAK, J.; RIGHINI, F.; BUSSOLINO, G.C. Mathematical Models for Pulse-Heating Experiments. **International Journal of Thermophysics**. New York, n.22, p.1241-1251, July 2001. Disponível em: <<http://www.imgc.cnr.it/AR2001/Annual%20Report%20001/216pub.htm>>. Acesso em: 3 abr. 2003.
16. SASAMORI, N. Calculation of emissivity by measuring reflectance and transmittance. Papers. **Bulletin of Tokyo metropolitan industrial technology research institute**, Tokyo, n.2, Dec. 1999. Disponível em: <<http://www.iri.metro.tokyo.jp/publish/report/11/ea11.html>>. Acesso em: 2 abr. 2003.

17. MORIMOTO, K. et al. Evaluation of Hemispherical Total Emissivity for Thermal Radiation Calorimetry. Abstract. **International Journal of Thermophysics**, New York, n.21 (4), p.927-940, Jul. 2000. Disponível em: <[http://reo.nii.ac.jp/journal/HtmlIndicate/Contents/SUP0000001000/JOU0001000248/ISS0000001883/ART0000020422/ART0000020422\\_abstract.html](http://reo.nii.ac.jp/journal/HtmlIndicate/Contents/SUP0000001000/JOU0001000248/ISS0000001883/ART0000020422/ART0000020422_abstract.html)>. Acesso em: 6 abr. 2003.
18. AMERICAN Society for Testing and Materials. **Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emisimeters**: ASTM C1371-98. Abstract. New York –Washington, 2003. Disponível em: <<http://webstore.ansi.org/ansidocstore/product.asp?sku=ASTM+C1371%2D98>>. Acesso em: 9 jun. 2003.
19. JONES, B.W.; PANTINAKIS, A. A radiometric method for measuring directional total emittance at ambient temperatures. Abstract. **Measurement Science and Technology**. Bristol, v.3, n.5, p.515-522, Mai. 1992. Disponível em: <<http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-0233/3/5/012>>. Acesso em: 2 maio 2003.
20. COLLECTIVE of autores, Impac Eletronic. **The Pyrometer Handbook**. Frankfurt/Main: IMPAC Eletronic, 1999, 78p. Disponível em: <<http://www.ir-impac.com/englich/Pyrometerhandbook.pdf>>. Acesso em: 29 outubro 2004.
21. HOTTEL, H. C.; SAROFIM A. F. **Radiative Transfer**. New York: McGraw-Hill, 1967. p.19 -159.
22. WELTY, J.R.; WICKS, C. E.; WILSON, R.E. **Fundamentals of momentum, Heat, and mass Transfer**. 3ed. New York: John Wiley, 1984. p.441.
23. IRVING Granet, P.E. **Thermodynamics and Heat Power**. 3ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1985. p.723.
24. АНТОЩЕНКОВ, Ю.М. **Напряжения горячего металла от деформации при ковке**. Электросталь: Электростальский политехнический институт филиал МГИСиС, 2003. Disponível em: <[www.elcomet.narod.ru/omd/omd\\_2.htm](http://www.elcomet.narod.ru/omd/omd_2.htm)>. Acesso em: 23 abr. 2003.  
(ANTOSTENCOV, Yu. M. **Tensões de metal quente, causados pelo forjamento**. Electrostal: Instituto Polotécnico de Electrostal, a sucursal de МГИСиС, 2003. . Disponível em: <[www.elcomet.narod.ru/omd/omd\\_2.htm](http://www.elcomet.narod.ru/omd/omd_2.htm)>. Acesso em: 23 abr. 2003).
25. OZISIK, M. N. **Transferência de calor: um texto básico**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1995. pp.9, 639.

26. КАФЕДРА Теплотехники Пермского Государственного Технического Университета. **Лабораторная работа №4. Исследование теплоотдачи при свободном движении воздуха.** Пермь: 2002. Disponível em: <<http://teplot.pstu.ac.ru/tt/study/metod/lr4/lr4.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2003.  
(CADEIRA da Técnica de Calor da Universidade Federal de Perm. **Trabalho №4 para os estudantes de graduação. Estudo do processo da transferência de calor por convecção natural.** Perm: 2002. Disponível em: <<http://teplot.pstu.ac.ru/tt/study/metod/lr4/lr4.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2003).
27. DUFLIE, J. A.; BECKMAN, W.A. **Solar Engineering of Thermal processes.** 2ed. Nev York: John Wiley, 1991. p.185-186.
28. HOLMAN, J. P. **Heat Transfer.** 8 ed. New York: McGraw– Hill, 1997. p.651.
29. INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** New York: John Wiley, 1981. p. 429-445.
30. De WINTER, F. **Heat transfer (loss or gain) coefficients from bare flat plate solar heat collectors. Historical values and current understanding.** Albuquerque, New Mexico, 2003. 18p. Disponível em: <[www.zomeworks.com/tech/doubleplay/pdf/FrankdeWinter/FdW\\_ExternalHeatTransfer.pdf](http://www.zomeworks.com/tech/doubleplay/pdf/FrankdeWinter/FdW_ExternalHeatTransfer.pdf)>. Acesso em: 7 abr. 2003.
31. POLOZINE, A.; SCHAEFFER, L. Influência dos parâmetros térmicos no processo de forjamento. In: **VIII CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO – XXIV SENAFOR**, 2004, Porto Alegre-RS. Anais 2004 Porto Alegre-RS: Brasul, 2004. pp.137-150.
32. JANNA, S.W. **A manual for the heat transfer laboratory.** Memphis: Department of Mechanical Engineering of University of Memphis, 2002. p.38-41. Disponível em: <[http://www.me.memphis.edu/faculty/janna/Heat\\_Tr\\_Manual.pdf](http://www.me.memphis.edu/faculty/janna/Heat_Tr_Manual.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2003.
33. ROMEIRO, S. B. B. **Química na Siderurgia.** Porto Alegre: Instituto de Química da UFRGS, 1997. Disponível em:<[www.ulbra.itumbiara.com.br/iles/arquivos/siderurgia.pdf](http://www.ulbra.itumbiara.com.br/iles/arquivos/siderurgia.pdf)>. Acesso em: 2 abr. 2003.
34. СОРОКИН, В. Г. **Марочник сталей и сплавов.** Москва: Машиностроение, 1989. с. 238.  
(SOROKIN, V.G. **Marcador de aços e ligas.** Moscou: Maxinostroenie, 1989. p.238).
35. ROJÉRIO, A.O. **O Forjamento de Ligas de Alumínio** - Um estudo para a Liga

- ABNT 6061. Porto Alegre, 2001. p.19. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM.
36. MENDEZ , B.Y. P. F.; RICE, C.S.; BROWN, S.B. Joining Using Semisolid Metals. **Welding Journal**, Boston, Sep. 2002. Disponível em: <[www.aws.org/wj/supplement/09-2002-MENDEZ-s.pdf](http://www.aws.org/wj/supplement/09-2002-MENDEZ-s.pdf)>. Acesso em: 2 abr. 2003.
37. SLAVOLHUB, G. P. et al. **Calibração de termopares por pontos fixos no INMETRO**. In: Congresso “Metrologia 2000”, 2000, São Paulo. Disponível em: <[www.metrologia.org.br/docs/portugues/eventos-R-sbm.htm](http://www.metrologia.org.br/docs/portugues/eventos-R-sbm.htm)>. Acesso em: 2 abr. 2003.
38. **REALISING the ITS-90 Fixed Points**. Disponível em: <<http://www.its-90.com/realise.html>>. Acesso em: 2 abr. 2003.
39. ROSSEL messtechnik. **Produktinformation 071**. Dresden, 2002. Disponível em: <[www.roesseldresden.de/german/inhalt-home.asp](http://www.roesseldresden.de/german/inhalt-home.asp)>. Acesso em: 28 fev. 2003.
40. NATIONAL Institute of Standart and Technology. **Reference Tables N.I.S.T., Monograph 175, Type “K”**. Disponível em: <<http://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z204-206.pdf>>. Acesso em: 6 abr. 2003.
41. **MANUAL de Operação. Eletrônica de medição para PC. Spider8. Spider8-30**. Darmstadt: HBM, 1999. p. D-25.
42. SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. p. 47.
43. CALISKANOGLU, D.; ALBAOUNI, M.; VOLLES, R.; LEISTEN,B.; KOPP. R.; EBNER, E.; LEITNER, H. Influence of heat-transfer-coefficient on the temperature stress of hot forming tools. **Friction and Wear in Metalforming**. Euromech435, June 18th-20th. 2002, Valenciens.
44. POLOZINE A.; SCHAEFFER L. Numerical estimation of the heat losses from a workpiece to some supporting device,made of material with unknown thermophysical properties. **Blanking productions in mechanical engineering**. Mashinostroenie – 1publishers. Moscow, n.4, p.23-26, 2004.
45. HOLMAN, J. P. **Metodos Experimentales para ingenieros**. Mexico: McGraw-Hill, 1977. p. 57.

## ANEXOS

### DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DOS PARÂMETROS QUE FORAM CALCULADOS NO TRABALHO APRESENTADO

A incerteza  $W_R$  do parâmetro  $R=R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  determina-se pela fórmula<sup>1</sup> [45]:

$$W_R = \left[ \left( \frac{dR}{dx_1} \cdot W_1 \right)^2 + \left( \frac{dR}{dx_2} \cdot W_2 \right)^2 + \left( \frac{dR}{dx_3} \cdot W_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{dR}{dx_n} \cdot W_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

onde:

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – são as variáveis independentes de  $R$ ,

$W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$  – são as incertezas da determinação das variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

As incertezas dos parâmetros  $m$ ,  $A$ ,  $\varepsilon$  e  $h$  do corpo de prova do aço ABNT 1045 são calculadas pela fórmula (1) com base nas expressões 5.8 - 5.11 e 5.30.

A incerteza do valor do calor específico do aço ABNT 1045 está aceita igual a  $0,5 \cdot \left( \frac{J}{kg \cdot K} \right)$ .

A incerteza média das medições das temperaturas  $T$  superficiais do corpo de prova do aço ABNT 1045 é calculada pela fórmula 5.1 para a faixa de [900-700]°C.

Estas incertezas são seguintes:

$W_m = \pm 0,001(\text{kg})$  – incerteza de  $m$ ;

$W_A = \pm 0,0000012 (\text{m}^2)$  - incerteza de  $A$ ;

$W_T = \pm 9(^{\circ}\text{C})$ ; – incerteza média da temperatura  $T$ ;

$W_c = \pm 0,5 \left( \frac{J}{kg \cdot K} \right)$  - incerteza do calor específico  $C_p$ ;

$W_{\varepsilon} = \pm 0,03$  – incerteza de  $\varepsilon$ ;

$W_h = \pm 3,00 (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$  - incerteza de  $h$ ;

<sup>1</sup> A fórmula citada é descrita nos símbolos utilizados na fonte [45]

As incertezas dos parâmetros  $A$ ,  $\varepsilon$  e  $h$  do corpo de prova da liga de alumínio AA 6061 são calculadas pela fórmula (1) com base nas expressões 5.8 - 5.11 e 5.36.

A incerteza da massa  $m$  do corpo de prova da liga de alumínio AA 6061 foi definida pela precisão da balança utilizada nos experimentos (v. item 5.1 “Equipamento e materiais utilizados nos experimentos”).

A incerteza do valor do calor específico da liga do alumínio AA 6061 está aceita igual a  $0,5 \cdot \left( \frac{J}{kg \cdot K} \right)$ .

A incerteza média das medições das temperaturas  $T$  superficiais do corpo de da liga de alumínio AA é calculada pela fórmula 5.1 para a faixa de  $[500-300]^{\circ}C$ .

Estas incertezas são seguintes:

$W_m = \pm 0,0000005(kg)$  - incerteza da massa  $m$ ;

$W_A = \pm 0,000001(m^2)$  - incerteza da área  $A$ ;

$W_T = \pm 5(^{\circ}C)$ ; - incerteza média da temperatura  $T$ ;

$W_c = \pm 0,5 \left( \frac{J}{kg \cdot K} \right)$  - incerteza do calor específico  $C_p$ ;

$W_{\varepsilon} = \pm 0,01$  - incerteza de  $\varepsilon$ ;

$W_h = \pm 0,40 (W/m^2 \cdot K)$  - incerteza de  $h$ ;

A influência da incerteza da massa, da área e do calor específico do material é desprezível sobre os resultados dos cálculos dos parâmetros  $\varepsilon$  e  $h$  do aço ABNT 1045 e da liga de alumínio AA 6061. A incerteza dos parâmetros  $\varepsilon$  e  $h$  é provocada, em geral, pela precisão das medições das temperaturas.

## PROCEDIMENTO DETALHADO PARA OBTENÇÃO DOS VALORES DE $\epsilon$ E $h$

A determinação dos valores de  $\epsilon$  e de  $h$  é baseada numa elaboração de dados de literatura e de dados obtidos nos experimentos.

### 1. Dados necessários para determinar de $\epsilon$ e de $h$ .

Os dados de literatura são o valor do calor específico do corpo de prova; Os e dados obtidos nos experimentos são as temperaturas do corpo de prova, as suas dimensões e a sua massa.

#### 1.1 Montagem experimental para obtenção dos dados experimentais.

A montagem experimental para adquirir as temperaturas do corpo de prova é descrita nas páginas 40-42.

A montagem experimental, para medir as dimensões do corpo de prova e a sua massa, está comum e, portanto, não está descrita nesta obra.

#### 1.2 Procedimento para obtenção dos dados experimentais.

a). Realização do experimento básico:

- registrar as temperaturas do centro de corpo de prova resfriado.
- registrar as temperaturas da superfície de corpo idêntico de prova resfriado.
- medir as dimensões do corpo de prova.
- medir a massa do corpo de prova.

b). Realização do experimento adicional é igual ao experimento básico.

### 2. Elaboração dos dados experimentais.

#### 2.1 Preparação dos dados obtidos nos experimentos na literatura.

As dimensões dos corpos de prova, as suas temperaturas e as suas massas, determinadas nos experimentos, são, necessariamente, convertidas em unidades do sistema internacional SI. Também se faz necessário calcular a área da troca de calor por radiação e indicar com exatidão a faixa das temperaturas do resfriamento dos corpos mencionados.

#### 2.2 Elaboração dos dados obtidos no experimento básico.

A elaboração dos dados, obtidos no experimento básico, é necessária com fim de obter a fórmula da velocidade de resfriamento do corpo de prova. A velocidade se determina pelos passos a seguir:

- colocar os dados adquiridos do resfriamento do corpo de prova numa planilha do EXEL.
- construir a curva do resfriamento, como a temperatura média do corpo em função do tempo do resfriamento.
- adicionar a linha da tendência da curva construída e escolher a fórmula desta linha.
- calcular a derivada primeira da função (fórmula) da temperatura relativamente ao tempo.

A derivada obtida é a fórmula procurada da velocidade de resfriamento.

### **2.3      Elaboração dos dados obtidos no experimento adicional.**

A elaboração dos dados, obtidos no experimento adicional, é necessária com fim de obter a fórmula das perdas condutivas de calor que ocorrem no processo de resfriamento do corpo de prova no experimento básico. As perdas condutivas de calor se determinam por passos a seguir:

- colocar os dados adquiridos no experimento básico e adicional numa planilha do EXEL;
- construir as curvas do resfriamento, como o tempo do resfriamento em função da temperatura média do corpo;
- adicionar as linhas da tendência das curvas construídas e escolher as fórmulas destas linhas;
- calcular as derivadas primeiras das funções (fórmulas) do tempo relativamente à temperatura;
- determinar a proporção entre o fluxo de calor total e o fluxo de calor condutivo os quais ocorrem no experimento adicional. O valor desta proporção é definido como a proporção entre a superfície total e a superfície das fases do corpo de prova;
- dividir a derivada, obtida para o experimento básico, por valor da proporção mencionada e por derivada, obtida para o experimento adicional.

A fórmula resultante é a fórmula procurada das perdas condutivas de calor .

## **3.            Determinação de um par dos valores $\epsilon$ e $h$ .**

### **3.1          Obtenção o valor de $\epsilon$ .**

O valor de  $\epsilon$  escolhe-se arbitrariamente na faixa dos valores possíveis da emissividade total do material usado nos experimentos. Os valores possíveis da emissividade total são tomados da literatura.

### **3.2          Obtenção o valor de $h$ .**

O valor de  $h$  calcula-se pelo programa para os cálculos matemáticos através da equação básica (3.5). Os cálculos são executados por passos a seguir:

- construir a equação básica num programa para os cálculos.
- colocar na equação básica as fórmulas da velocidade do resfriamento e as perdas condutivas de calor, os valores da massa, do calor específico, da área, da temperatura do meio ambiente, da emissividade total e o constante de Stefan-Bolzman.
- resolver a equação básica, relativamente à variável  $h$ , para as temperaturas indicadas na faixa do resfriamento.
- calcular o valor médio de  $h$  para a faixa das temperaturas do resfriamento.

### **3.3 Avaliação dos valores obtidos de $\epsilon$ e $h$ .**

Os valores obtidos de  $\epsilon$  e  $h$  avaliam-se por desvio padrão médio da curva teórica do resfriamento relativamente à curva experimental.

#### **3.3.1 Obtenção da curva teórica do resfriamento.**

A curva teórica do resfriamento calcula-se pelo programa para os cálculos matemáticos através da equação básica. Os cálculos são executados por passos a seguir:

- construir a equação básica num programa para os cálculos.
- colocar na equação básica as fórmulas da velocidade do resfriamento e as perdas condutivas de calor, os valores da massa, do calor específico, da área, da temperatura do meio ambiente, de  $\epsilon$ , de  $h$  e o constante de Stefan-Bolzman.
- resolver a equação básica relativamente às temperaturas da faixa do resfriamento.

#### **3.3.2 Obtenção do valor do desvio padrão médio da curva teórica do resfriamento em relação à curva experimental.**

O valor do desvio padrão médio da curva teórica do resfriamento, em relação à curva experimental determina-se através de métodos da estatística descritiva.

### **4. Determinação do par dos valores verdadeiros de $\epsilon$ e $h$ .**

O par dos valores verdadeiros de  $\epsilon$  e  $h$  corresponde a tal curva teórica que tem o valor mínimo do desvio padrão médio em relação à curva experimental. Portanto, para escolher entre outros o par verdadeiro dos valores procurados, é necessário repetir (para os valores diferentes de  $\epsilon$ ) todos os passos descritos no item 3 deste anexo.