

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**PROJETO E MONTAGEM DE MÓDULOS
EXPERIMENTAIS PARA UM CURSO BÁSICO
DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO**

GISELLE PATRICIA BRANDÃO ALVES FURTADO

**VITÓRIA – ES
ABRIL/2004**

GISELLE PATRICIA BRANDÃO ALVES FURTADO

**PROJETO E MONTAGEM DE MÓDULOS
EXPERIMENTAIS PARA UM CURSO BÁSICO
DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Giselle Patricia Brandão Alves Furtado, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheira Mecânica.

**VITÓRIA – ES
ABRIL/2004**

GISELLE PATRICIA BRANDÃO ALVES FURTADO

**PROJETO E MONTAGEM DE MÓDULOS
EXPERIMENTAIS PARA UM CURSO BÁSICO
DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rogério Ramos
Orientador

Prof. Dr. Edson José Soares
Examinador

Prof. M.Sc Rogério Queiroz
Examinador

Engº e Mestrando Dione Alves de Sousa
Examinador

Vitória - ES, dia 26 de Abril, 2004

DEDICATÓRIA

Dedicado a todos aqueles que sempre acreditaram na minha vocação
e me deram forças para que eu concluísse este projeto:
meus pais Rose e Dirceu, minha irmã Carol, meu namorado Luiz
e os grandes amigos Jonathan, Paulo Valiate e André Nogueira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Luiz Carlos Cavarra, pela dedicação, paciência, compreensão, e apoio em todos os momentos que me ajudou a elaborar este projeto.

Ao ITUFES e o DEM, pelo patrocínio do material para os experimentos.

Aos meus amigos Diego Pagoto Calvi (Equipe AeroVitória) e Vitor Luiz Rigoti dos Anjos, pelas contribuições técnicas para este trabalho.

Aos meus pais, por todos os sacrifícios para que eu sempre pudesse estudar.

À minha irmã Carolzinha, que contribuiu muito na elaboração os experimentos e acompanhou todas as dificuldades pelas quais passei.

E ao meu grande amigo Jonathan Lourenço Ferreira, que nunca soube me negar um favor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Termômetro digital e Termômetro de Mercúrio	11
Figura 2 - Aparelho de Condutividade Térmica	17
Figura 3 - Aparelho de Condutividade Térmica sem a cobertura isolante	17
Figura 4 - Corpo de Prova de Cobre Eletrolítico.....	18..
Figura 5 – Capa de Isolante Cerâmico.....	18
Figura 6 - Posicionamento dos Termopares no CP	19
Figura 7 - Posicionamento dos Equipamentos do 3º Experimento.....	28
Figura 8 - Posicionamento dos Termopares na Aleta	29
Figura 9 - Posicionamento dos Aparelhos e Termopares	29
Figura 10 - Posicionamento do Aquecedor	30
Figura 11 - Distribuição de Temperaturas ao Longo da Aleta	34
Figura 12 - Posicionamento dos Equipamentos do 4º Experimento.....	37
Figura 13 - Garrafas de Dewar	38
Figura 14 - Perfil de Temperaturas das Garrafas de Dewar	39
Figura 15 - Aproximação das Curvas Teórica e Experimental para a Garrafa B.....	41
Figura 16 - Aproximação das Curvas Teórica e Experimental para a Garrafa C.....	42
Figura 17 - Efeito Seebeck.....	48
Figura 18 - Tensão de Seebeck.....	49
Figura 19 - Esquema de um termopar.....	49
Figura 20 - Compensação da Temperatura Ambiente	50
Figura 21 - Termopar Tipo K	51
Figura 22 - Termopares: F.E.M X Temperatura.....	61
Figura 23 - Junções de Termopares	64

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Esquema para Anotação de Dados	20
Tabela 2 - Teste em 19/12/2003: Alumínio + Aço Baixo Carbono	22
Tabela 3 - Teste em 30/01/2004: Cobre + Aço Inox:	23
Tabela 4 - Experimento em 19/02/2004 : Cobre sem Isolante	24
Tabela 5 - Experimento em 20/02/2004: Cobre com Isolante	25
Tabela 6 - Comentários e Considerações para o Caso A.....	31
Tabela 7 - Propriedades do Ar Ambiente (para 300K) e da Aleta (experimentais)	32
Tabela 8 - Equações para os Números de Rayleigh e Nusselt e os coeficientes h_s (transferência de calor por convecção na superfície) e coeficiente m	32
Tabela 9 - Valores calculados para Rayleigh, Nusselt, h_s e coeficiente m	32
Tabela 10 - Distribuição de Temperaturas ao Longo da Aleta de Alumínio para o Caso A.....	34
Tabela 11 - Limites de Erros dos Termopares.....	62
Tabela 12 - Limites de Erros para Termopares Convencionais e Minerais.....	63

SIMBOLOGIA

$C_{\text{água}}$ = Calor específico à pressão constante, em J/Kg.K

g = Aceleração da gravidade, em m²/s

h_c = Coeficiente de transferência de calor por convecção, em W/m²K

h_r = Coeficiente de transferência de calor por radiação, em W/m²K

K = Condutividade térmica, em W/mK

Nu = Número de Nusselt

Ra = Número de Rayleigh

Pr = Número de Prandtl

L = Comprimento característico, em m

A = Área, em m²

T = Temperatura, em K

W = Temperatura da água, em K

E = Diferença de potencial, em V

$\dot{M}$ = vazão mássica de água, em Kg/s

α = Difusividade térmica, em m²/s

β = Coeficiente de expansão térmica, em K⁻¹

ε = Emissividade

ρ = Densidade, em Kg/m³

σ = Constante de Stefan-Boltzmann

μ = Viscosidade dinâmica, em N.s/m²

ν = Viscosidade cinemática, em m²/s

CP = Corpo de prova ou amostra

Cte = Constante

θ = Excesso de temperatura

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS	II
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELA	IV
SIMBOLOGIA.....	V
SUMÁRIO	VI
RESUMO	VIII
INTRODUÇÃO.....	IX
1 EXPERIÊNCIA 1: TERMOMETRIA - USO DE TERMOPARES.....	11
1.1 Introdução	11
1.2 Objetivos	11
1.3 Equipamentos.....	12
1.4 Esquemático	12
1.5 Procedimento	13
1.6 Experimento Realizado e Fontes de Incertezas	14
1.7 Conclusões	15
2 EXPERIMENTO 2: CONDUTIVIDADE TÉRMICA	16
2.1 Introdução	16
2.2 Objetivos	16
2.3 Equipamentos.....	17
2.4 Esquemático	18
2.5 Procedimento	19
2.6 Experimento Realizado	21
2.7 Conclusões e Fontes de Incertezas.....	26
3 EXPERIÊNCIA 3: ALETA.....	27
3.1 Introdução	27
3.2 Objetivos	27
3.3 Equipamentos.....	27
3.4 Esquemático	28

3.5 Procedimento	28
3.6 Experimento Realizado	31
3.7 Conclusões	35
4 EXPERIÊNCIA 4: ISOLAMENTO TÉRMICO	36
4.1 Introdução	36
4.2 Objetivos	36
4.3 Equipamentos	37
4.4 Procedimento	38
4.5 Experimento Realizado	39
4.6 Conclusões	43
5 CONCLUSÃO FINAL	44
APÊNDICE A.....	45
APÊNDICE B.....	48
APÊNDICE C.....	65
APÊNDICE D.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

RESUMO

Este projeto apresenta a criação de um roteiro composto por 4 módulos experimentais para a disciplina de Transferência de Calor I do curso de Engenharia Mecânica da UFES.

Os módulos foram desenvolvidos com a finalidade de se tornarem um material didático complementar para a disciplina citada.

A primeira experiência fornecerá orientação e embasamento para as demais, levando-se em consideração que seu objetivo é orientar o aluno quanto ao uso dos aparelhos de medição de temperaturas, principalmente os termopares.

Na segunda experiência, foi utilizado um aparelho de condutividade térmica para verificação da condutividade térmica de uma amostra de cobre eletrolítico, comparando os resultados ao se utilizar um isolante cerâmico sobre a amostra e ao se utilizar a amostra sem isolamento.

A terceira experiência trata da obtenção do gradiente de temperaturas em uma aleta de alumínio.

A quarta experiência diz respeito aos efeitos das diferentes formas de isolamento em garrafas de Dewar.

Cada experimento é apresentado separadamente, com seus objetivos, procedimentos, testes e resultados obtidos, de modo que poderão ser utilizados como aulas de laboratório.

INTRODUÇÃO

A transferência de calor é o trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura num meio ou entre vários meios.

O estudo da transferência de calor amplia a análise termodinâmica através da avaliação dos modos e taxas de transferência de calor.

Quando há uma diferença de temperatura em um sistema, o calor flui da região de alta temperatura para a de baixa temperatura. O conhecimento da distribuição de temperaturas é essencial ao estudo de transferência de calor, pois a partir desta distribuição, pode-se obter a grandeza de interesse prático conhecida como o *fluxo de calor*, que é a quantidade de calor transferido por unidade de área e por unidade de tempo.

Existem três modos distintos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Neste trabalho, será considerado apenas o primeiro deles.

A Condução é o modo de transferência de calor em que a troca de energia tem lugar da região de alta temperatura para a de baixa temperatura, pelo movimento cinético ou pelo impacto direto das moléculas (no caso de fluidos em repouso) e pelo movimento de elétrons (no caso de metais).

A lei empírica da condução de calor baseada em observações experimentais foi enunciada por Biot, mas recebe o nome do matemático e físico francês Joseph Fourier, que a utilizou em sua teoria analítica do calor.

Esta lei estabelece que a taxa do fluxo de transferência de calor por condução, em uma dada direção, é proporcional à área normal à direção do fluxo e ao gradiente de temperatura naquela direção.

Considerando o fluxo de calor na direção x , por exemplo, a Lei de Fourier para condução é dada por:

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}]$$

onde Q_x é a taxa de fluxo de calor através a área A no sentido positivo de x . A constante de proporcionalidade k é chamada de *condutividade térmica* do material e consiste numa grandeza positiva intrínseca de cada material.

O presente trabalho apresenta a criação de um roteiro de experiências para o escopo de condução de calor da disciplina de Transferência de Calor I, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), considerando os seguintes critérios:

- a) Robustez;
- b) Baixo custo;
- c) Incertezas aceitáveis;
- d) Boa repetitibilidade.

1 EXPERIÊNCIA 1: TERMOMETRIA - USO DE TERMOPARES

1.1 Introdução

Este módulo visa apresentar vários aparelhos de medição de temperaturas, existentes no Laboratório de Geração de Potência (LagePot), descritos abaixo:

1. Termômetro Infravermelho: Transforma ondas eletromagnéticas em energia elétrica, através de célula fotoelétrica.
2. Termômetro de Mercúrio: A dilatação do líquido é verificada ao lado de uma escala graduada.
3. Termômetro Digital: Princípio de funcionamento dos termopares, utilizando transformação da milivoltagem em valores digitais.
4. Termopares.



Figura 1 - Termômetro digital e Termômetro de Mercúrio

1.2 Objetivos

- Apresentar os aparelhos de medição de temperatura mais conhecidos, existentes no laboratório.
- Demonstrar o princípio de medição de temperatura através da variação das propriedades termofísicas de um elemento. Identificação e aferição de termopares.

1.3 Equipamentos

Suporte para termômetro

Bécker

Aquecedor

Termômetro de mercúrio

Termômetro infravermelho

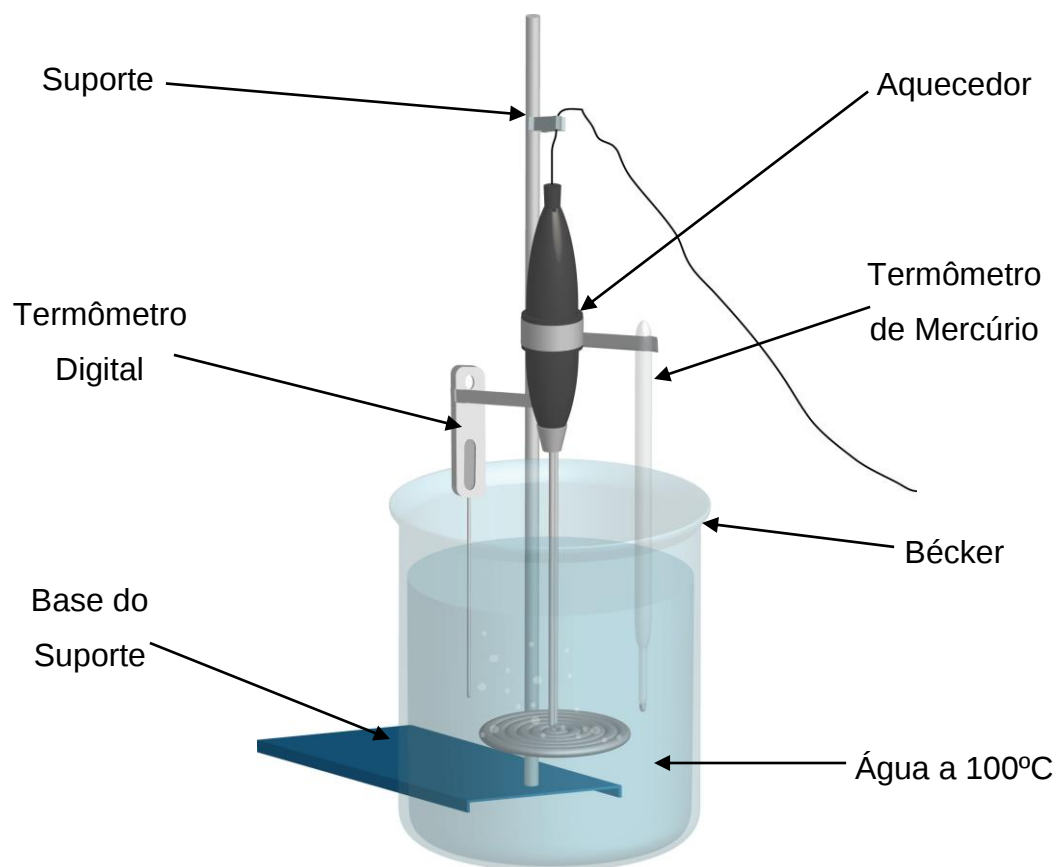
Termômetro digital

Termopar tipo K

Potenciômetro

Tabelas de transformação para termopares

1.4 Esquemático



1.5 Procedimento

1. Encher o bécker com água até 750ml.
2. Colocar o aquecedor no bécker, sem ligá-lo.
3. Posicionar o suporte para termômetro atrás do bécker, com os termômetros fixados. À frente, posicionar o termômetro de mercúrio e, lateralmente, o termômetro digital. Inserir também a junta fixa do termopar na água e conecta-lo ao potenciômetro.
4. Ligar o aquecedor e aguardar a água entrar em ebulição.
5. Pergunta-se: a qual temperatura estaria a água no momento da ebulição?
6. Acompanhar todo o aquecimento da água, observando as temperaturas obtidas a cada 10 minutos para os termômetros:
 1. - Infravermelho (manual)
 2. - De mercúrio
 3. - Digital
7. Montar uma tabela comparativa dos valores e dos erros (verificar a teoria de erros no Apêndice D). Explicar o motivo da variação e das leituras incorretas em todos os termômetros.
8. Ler a milivoltagem medida no potenciômetro, lembrando de executar a compensação da temperatura ambiente.
9. Com as tabelas de transformação, descobrir qual é o termopar que está sendo utilizado no seu experimento. Justifique.
10. Agora, utilizando outro termopar para realizar as medições, verificar a diferença de leitura ao se compensar ou não a temperatura ambiente, justificando as diferenças.

1.6 Experimento Realizado e Fontes de Incertezas

Utilizando todos os equipamentos apresentados, mede-se a temperatura da água em estado de ebulição (temperatura de 100°C).

Observa-se que os termômetros de mercúrio, o infravermelho e o termômetro digital não fornecem a temperatura de 100°C.

Analizando cada termômetro separadamente, pode-se afirmar que o termômetro de mercúrio tem um erro de leitura muito pequeno (da ordem de 0,5°C), podendo ser considerada uma leitura aceitável, com incerteza da ordem de precisão do aparelho (precisão de 0,5°C).

Para este experimento, recomenda-se a leitura do Apêndice A, que trata de uma breve descrição da origem da escala Celsius de temperaturas.

O termômetro infravermelho apresentou valores da ordem de 98°C. Isso porque este tipo de termômetro transforma ondas eletromagnéticas em energia elétrica, através de célula fotoelétrica, resultando em um valor digital. Para efetuar tais transformações, o valor de emissividade utilizado é de 0,95 para qualquer corpo, a qualquer temperatura. Dessa forma, as leituras fornecidas são valores aproximados de temperatura, que podem ser aceitos em medidas onde o grau de precisão é elevado.

O termômetro digital forneceu valores da ordem de 97°C, visto que este termômetro é formado por um termopar coberto por uma bainha metálica. A junta do termopar se encontra bem próxima da superfície interna da bainha, mas não a toca. Portanto, existe uma pequena distância entre a bainha metálica e a junção do termopar, gerando uma pequena resistência térmica de contato, que reduz o valor de temperatura lido.

O termopar utilizado foi tipo K (Cromel-Alumel) que, ligado ao potenciômetro, forneceu tensão de 3,1mV. Verificando a tabela de conversões para este tipo de termopar (Anexo B), o valor de temperatura foi de 76°C para a água em ebulição. Este valor ocorreu porque a tensão de 3,1mV corresponde a 76°C para uma temperatura de referência de 0°C. No caso experimental, considera-se a temperatura de

referência igual à temperatura ambiente (neste caso era de 25°C, obtida pelo termômetro de referência existente no potenciômetro).

Para 25°C, a milivoltagem é de 1mV. Somando-se 1mV aos 3,1mV encontrados anteriormente, teremos um total de 4,1mV que correspondem à temperatura de 100°C esperada.

Isso mostra como os termopares são mais precisos do que os demais sensores de temperatura.

A teoria de medição dos termopares é apresentada no Apêndice B.

1.7 Conclusões

Os fenômenos de transferência de calor representam papel importante em muitos problemas industriais e ambientais.

Nesse contexto, estão inseridos os sensores, detectores ou elementos primários de temperatura; que consistem em transdutores que alteram algumas de suas características físicas ao se equalizar com o meio a ser determinada a temperatura.

Este capítulo apresentou os principais aparelhos utilizados para medição de temperaturas, mostrando que nem sempre obtém o valor da temperatura com a precisão desejada. A ênfase foi dada aos termopares, que constituem os sensores de melhor precisão e os mais utilizados no meio industrial.

2 EXPERIMENTO 2: CONDUTIVIDADE TÉRMICA

2.1 Introdução

Este experimento é um estudo sobre condução térmica em uma amostra de cobre eletrolítico puro e coberto com uma capa de isolante cerâmico.

A condução refere-se ao transporte de energia num meio, provocado por um gradiente de temperatura. A condutividade térmica K (W/mK) é um coeficiente proveniente da medida do comportamento do material, constituindo-se numa propriedade importante e específica de cada material.

Para um gradiente de temperatura definido, o fluxo térmico de condução aumenta com a elevação da condutividade térmica.

Os isolamentos térmicos são constituídos por materiais de condutividade térmica baixa, combinados a fim de se conseguir condutividades térmicas baixas para o sistema como um todo. Além disso, reduzem as trocas térmicas com o ambiente, mantendo a condução unidirecional.

2.2 Objetivos

Apresentar um aparelho para a medição da condutividade térmica de uma amostra cilíndrica de cobre eletrolítico, com 100mm de comprimento e 19mm de diâmetro.

A condutividade será medida na amostra de cobre pura e na amostra revestida por um isolante cerâmico com 5mm de espessura.

Pode-se dessa forma, observar a eficiência do equipamento e o grau de importância do isolante cerâmico.

2.3 Equipamentos

Aparelho de condutividade térmica P5687.

Potenciômetro.

Bécker.

Pasta térmica.

Amostra de cobre eletrolítico.

Capa isolante de cerâmica para a amostra.



Figura 2 - Aparelho de Condutividade Térmica



Figura 3 - Aparelho de Condutividade Térmica sem a cobertura isolante

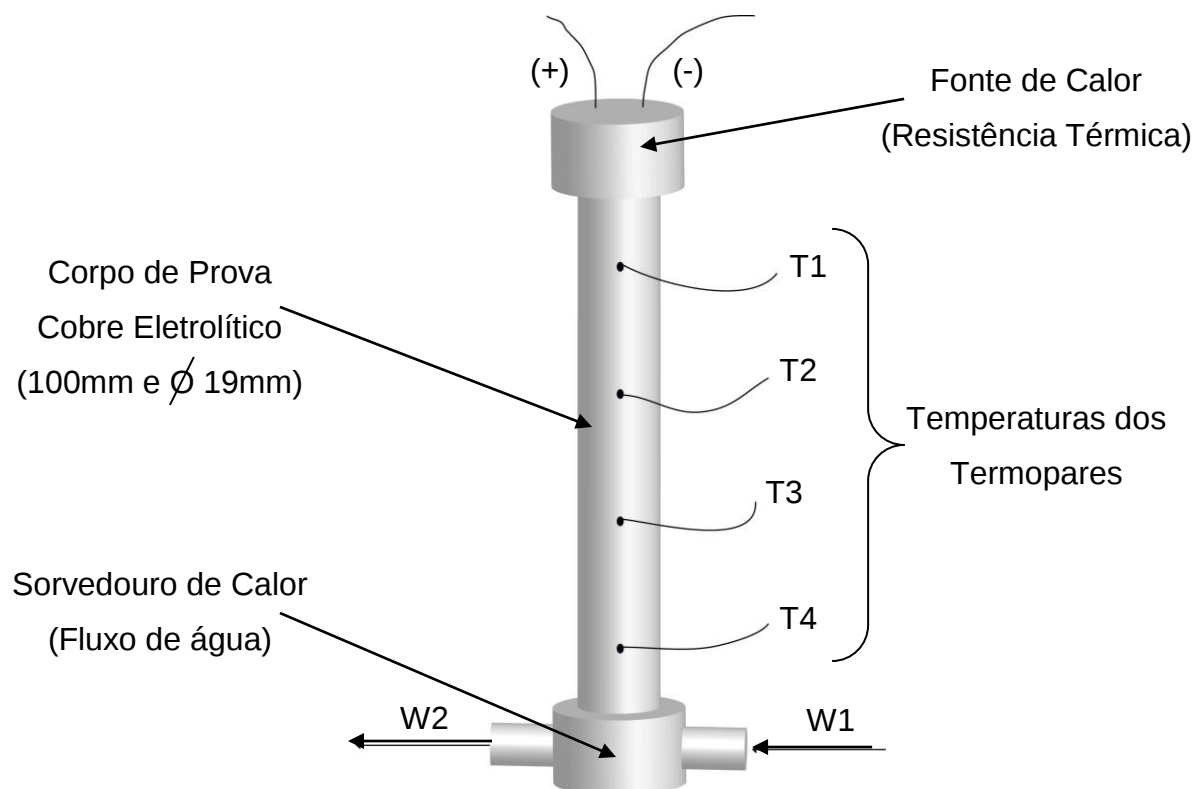


Figura 4 - Corpo de Prova de Cobre Eletrolítico



Figura 5 – Capa de Isolante Cerâmico

2.4 Esquemático



2.5 Procedimento

1. Verificar se o aparelho e a amostra se encontram completamente livres de impurezas.
2. Com a ajuda de uma seringa, inserir a pasta térmica nos furos da amostra. Passar também uma leve camada de pasta térmica nas extremidades da amostra, onde será realizado o contato entre a fonte e o sorvedouro de calor..
3. Mover a alavanca (posicionada na parte frontal do aparelho), para baixo e posicionar a amostra entre o elemento quente (parte fixa superior) e o pregador (parte móvel inferior). Desprender a alavanca lentamente, ainda segurando a amostra, de modo a mantê-la centralizada, até que esteja fixa.
4. Com a ajuda de uma pinça inserir os termopares untados em pasta térmica, em seus respectivos furos do corpo de prova (CP), conforme o esquema a seguir:

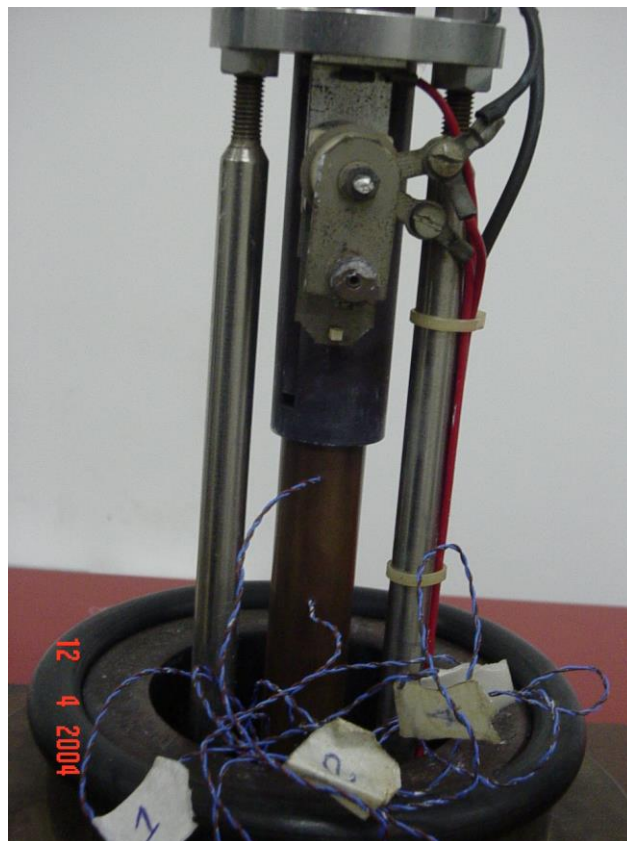


Figura 6 - Posicionamento dos Termopares no CP

5. Posicionar a cobertura isolante sobre a amostra.
6. Abrir a água da rede, tentando obter a menor vazão possível (controle visual e manual), sem que exista ar no sistema. Deixar fluir por apenas 30 segundos, verificando se não há formação de bolhas de ar. Caso contrário, fechar a torneira e abri-la novamente, buscando a melhor regulação.
7. Conectar o potenciômetro aos dois terminais dispostos na parte frontal do aparelho.
8. Ligar o aparelho e fixar a entrada de corrente em 0,3 A.
9. Iniciar as leituras das temperaturas ao longo do CP e de entrada e saída de água, em intervalos de 10 minutos, até que o fluxo de controle atinja a condição de regime permanente. Isso ocorrerá em aproximadamente 1 hora, quando a temperatura de cada termopar variar em apenas 1 grau.
10. Quando a condição de regime permanente for atingida, executar a medida de vazão da água, verificando o tempo que a água do tubo de saída demora até encher 100ml de um bécker.
11. Desligar o aparelho e, em seguida, a água. Lembrar de posicionar a corrente em 0 A.
12. Os valores coletados são armazenados em uma tabela, conforme o esquema abaixo:

Tempo	W2(°C)	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	W1(°C)
10 min	30,0	74,0	66,0	58,0	40,0	26,0

Tabela 1 - Esquema para Anotação de Dados

13. Para calcular a vazão de água, utiliza-se a equação:

$$\dot{M} = \frac{100[cm^3]}{t[s]} * 996.10^{-6} [Kg/cm^3], \text{ onde } t = \text{tempo para encher 100ml.}$$

14. Para determinar a condutividade da amostra de cobre, utiliza-se a equação deduzida a partir da Lei de Fourier (verificar referência [1]) e da expressão existente no Manual do aparelho de condutividade térmica (Apêndice C), a saber:

$$K = \frac{\dot{M} * C_{\text{água}} * L * (W_2 - W_1)}{A * (T_3 - T_4)}$$

onde:

K = condutividade térmica

$C_{\text{água}}$ = calor específico à pressão cte (4.186 Joules/ Kcal)

$\dot{M}$ = vazão mássica de água (Kg/s)

W_1 = temperatura de entrada da água (°C)

W_2 = temperatura de saída de água (°C)

A = área da amostra (m^2)

T_3 = temperatura do termopar (extremidade quente ; °C)

T_4 = temperatura do termopar (extremidade fria ; °C)

L = distância entre os termopares (°C)

15. Repetir o experimento utilizando o isolante térmico cerâmico sobre a amostra de cobre.

16. Comparar os valores de K , calculados, com o valor teórico para o cobre eletrolítico ($K = 388\text{W/mK}$). Pergunta-se:

- a) Qual a percentagem de erro?
- b) Quais as possíveis causas do erro?
- c) Qual a finalidade do uso do revestimento cerâmico sobre a amostra ?
- d) Os resultados foram satisfatórios ? Justificar.

2.6 Experimento Realizado

O experimento foi realizado, a princípio, para os corpos de prova integrantes do aparelho de condutividade térmica.

Os corpos de prova foram utilizados com finalidade de testar o aparelho e seu real funcionamento, de forma que se pudesse obter confiança nas medições realizadas pelo mesmo.

Os testes foram realizados de acordo com o Manual de Instruções do próprio aparelho (Apêndice C) e os resultados obtidos estão descritos a seguir:

Teste em 19/12/2003: Alumínio + Aço Baixo Carbono

Tempo (min)	W2(°C)	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	W1(°C)
0	30,0	74,0	66,0	58,0	40,0	26,0
10	34,0	92,0	80,0	70,0	52,0	26,0
20	36,5	102,0	92,0	78,0	54,0	26,0
30	31,5	112,0	98,0	84,0	56,0	26,0
40	34,0	114,0	102,0	82,0	56,0	26,0
50	35,0	114,0	102,0	82,0	56,0	26,5
60	35,5	114,0	102,0	86,0	56,0	26,5

Tabela 2 - Teste em 19/12/2003: Alumínio + Aço Baixo Carbono

Obs: Vazão: 100ml em 148 s.

Alumínio $\rightarrow K_{Al} = 209.W / mK$

$$K_{Al} = \frac{M_{\text{água}} \cdot C_{\text{água}} \cdot (W_2 - W_1) \cdot L}{A_{Al} \cdot (T_1 - T_2)}$$

$$K_{Al} = \frac{\left(\frac{100}{148} \cdot 10^{-6} \cdot 996\right) \cdot 4179 \cdot (35,5 - 26,5) \cdot (50 \cdot 10^{-3})}{(5 \cdot 10^{-4}) \cdot (86 - 56)}$$

$K_{Al} = 209,15.[W / mK]$, com 0,07% de erro.

Aço Baixo Carbono $\rightarrow K_{AçoBC} = 41,8.[W / mK]$

$$K_{Fe} = \frac{\left(\frac{100}{148} \cdot 10^{-6} \cdot 996\right) \cdot 4179 \cdot (35,5 - 26,5) \cdot (50 \cdot 10^{-3})}{(5 \cdot 10^{-4}) \cdot (86 - 56)}$$

$K_{Fe} = 41,83.[W / mK]$, com 0,07% de erro

Teste em 30/01/2004: Cobre + Aço Inox:

Tempo (min)	W2(°C)	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	W1(°C)
0	22,0	28,0	28,0	28,0	28,0	22,0
5	22,0	46,0	44,0	40,0	30,0	22,0
10	22,5	74,0	68,0	62,0	36,0	22,0
20	28,0	100,0	86,0	84,0	44,0	22,0
30	29,0	114,0	110,0	96,0	48,0	22,0
40	29,0	129,0	124,0	106,0	52,0	22,0
50	29,0	134,0	130,0	114,0	54,0	22,0
60	29,0	138,0	134,0	116,0	56,0	22,0
70	29,0	144,0	138,0	120,0	58,0	22,0
80	29,0	144,0	138,0	120,0	58,0	22,0
85	29,0	144,0	138,0	120,0	58,0	22,0

Tabela 3 - Teste em 30/01/2004: Cobre + Aço Inox:

Obs: Vazão: 100ml em 120 s

Cobre → $K_{Cu} = 315.[W / mK]$

$$K_{Cu} = \frac{\left(\frac{100}{120} \cdot 10^{-6} \cdot 996\right) \cdot 4179 \cdot (29 - 22) \cdot (50 \cdot 10^{-3})}{(5 \cdot 10^{-4}) \cdot (144 - 138)}$$

$K_{Cu} = 404,67.[W / mK]$, com 22,16% de erro

Aço Inox → $K_{Inox} = 14,9.[W / mK]$

$$K_{Inox} = \frac{\left(\frac{100}{120} \cdot 10^{-6} \cdot 996\right) \cdot 4179 \cdot (29 - 22) \cdot (25 \cdot 10^{-3})}{(5 \cdot 10^{-4}) \cdot (120 - 58)}$$

$K_{Inox} = 19,58.[W / mK]$, com 23,90% de erro

Observando que os resultados encontrados nos testes resultaram em erro menor que 25%, realizou-se o experimento real proposto com a amostra única de cobre eletrolítico sem isolante e com isolante cerâmico.

Os resultados são descritos a seguir:

Experimento em 19/02/2004 : Cobre (100mm)

Tempo (min)	W2(°C)	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	W1(°C)
0	33,0	82,0	72,0	64,0	56,0	27,5
10	34,5	88,0	78,0	68,0	60,0	27,5
15	35,0	90,0	80,0	72,0	62,0	27,5
25	35,7	94,0	84,0	74,0	64,0	27,0
35	36,0	94,0	84,0	74,0	64,0	27,0
40	36,0	94,0	84,0	74,0	64,0	27,0

Tabela 4 - Experimento em 19/02/2004 : Cobre sem Isolante

Obs: Vazão: 100ml em 88s.

Cobre Eletrolítico: $K_{Cu} = 388.[W / mK]$

$$K_{Cu} = \frac{\left(\frac{100}{88} \cdot 10^{-6} \cdot 996\right) \cdot 4179 \cdot (36 - 27) \cdot (26 \cdot 10^{-3})}{(2,83 \cdot 10^{-4}) \cdot (74 - 64)}$$

$K_{Cu} = 391,09.[W / mK]$, com 0,79% de erro

Experimento em 20/02/2004: Cobre com Isolante

Tempo (min)	W2(°C)	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	W1(°C)
0	30,5	64,0	58,0	54,0	48,0	27,5
10	36,0	82,0	72,0	66,0	58,0	27,5
20	38,5	90,0	80,0	72,0	62,0	27,0
30	39,5	92,0	82,0	72,0	64,0	27,0
40	40,0	96,0	84,0	74,0	66,0	27,0
50	41,5	96,0	84,0	74,0	66,0	27,0
60	41,5	96,0	84,0	74,0	66,0	27,0

Tabela 5 - Experimento em 20/02/2004: Cobre com Isolante

Obs: Vazão: 100ml em 164 s

$$K_{Cu} = \frac{\left(\frac{100}{165} \cdot 10^{-6} \cdot 996\right) \cdot 4179 \cdot (41,5 - 27) \cdot (26 \cdot 10^{-3})}{(2,83 \cdot 10^{-4}) \cdot (74 - 66)}$$

$K_{Cu} = 420,06 \text{ [W/mK]}$, com 7,63% de erro

2.7 Conclusões e Fontes de Incertezas

O aparelho utilizado neste experimento foi projetado para determinar o coeficiente de condutividade térmica (K) de uma amostra condutora, neste caso, de cobre eletrolítico.

Os valores de K obtidos nos testes, previamente realizados com as amostras do próprio aparelho, foram coerentes, apresentando para os corpos de prova de alumínio e aço baixo carbono, um desvio entre o valor teórico e do experimento, correspondente a 0,07%.

O resultado de K para a amostra de cobre eletrolítico puro apresentou apenas 0,79% de desvio. Dessa forma, pode-se considerar que o aparelho utilizado se encontra em bom estado de conservação e funcionamento, apresentando resultados considerados satisfatórios (K experimental próximo do valor de K teórico).

A influência do isolante cerâmico utilizado, foi abaixo do esperado, tendo em vista que o erro para K experimental, neste caso, foi de 7,63%.

Em algumas situações, o acréscimo de isolamento aumenta a perda de calor até uma espessura crítica de isolamento, na qual a perda de energia atinge um valor máximo. Portanto, para reduzir as perdas de calor, é essencial que a espessura final do isolamento seja maior que a espessura crítica.

O valor de espessura crítica do isolante utilizado não foi verificado para este experimento. Dessa forma, a aplicação do isolante cerâmico pode ter gerado o aumento da área de trocas térmicas, por se encontrar, possivelmente, abaixo da espessura crítica para este isolante.

Portanto, o isolante utilizado pode ser eliminado para a obtenção do valor de K experimental na amostra de cobre eletrolítico. Outro isolante poderá vir a ser utilizado, desde que seja verificado previamente o valor da espessura mínima necessária (espessura crítica).

3 EXPERIÊNCIA 3: ALETA

3.1 Introdução

Este módulo diz respeito ao estudo da transferência de calor em uma aleta de alumínio.

A aleta é uma superfície expandida utilizada especificamente para aumentar a taxa de transferência de calor entre um sólido e um fluido adjacente.

Neste experimento, considera-se um vaso de alumínio contendo água a 100°C. Uma aleta de alumínio se encontra acoplada à parede do vaso. Desta forma, pode-se obter o gradiente de temperaturas na aleta.

3.2 Objetivos

Analisar a distribuição de temperatura e perda térmica em uma aleta de alumínio, com seção reta uniforme, quando submetida à transferência convectiva de calor com temperatura de uma extremidade conhecida.

Comparar os dados experimentais com os cálculos do modelo matemático tradicional.

3.3 Equipamentos

Suporte para termômetro

Vaso de alumínio com aleta acoplada

Aquecedor

Termômetro de mercúrio

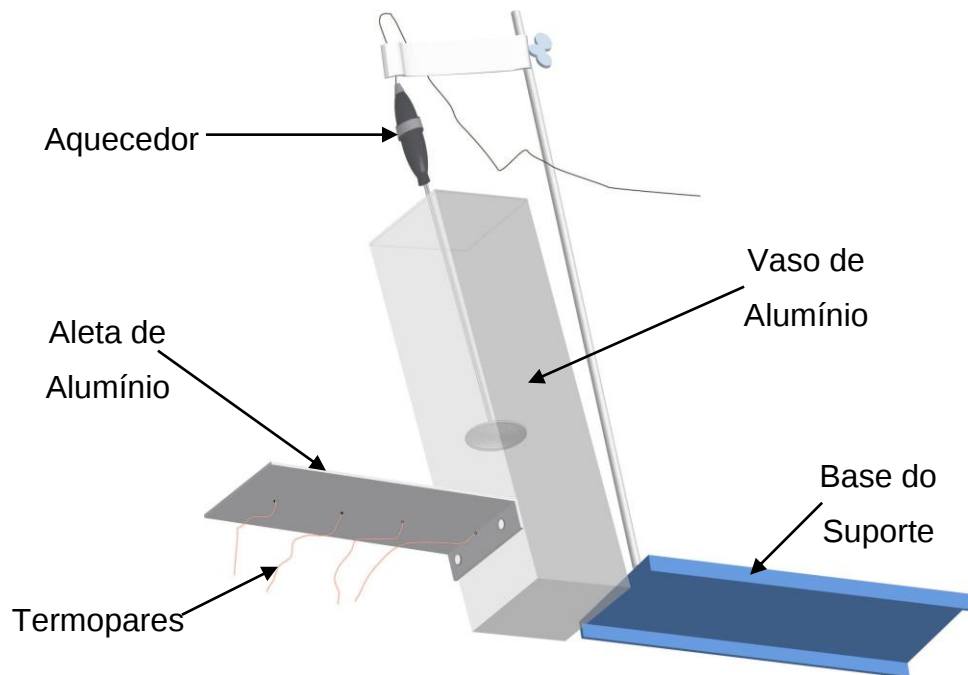
Potenciômetro

Seletor de contatos

Termopares

Fita Isolante

3.4 Esquemático



3.5 Procedimento

1. Posicionar todos os equipamentos necessários conforme esquema a seguir:

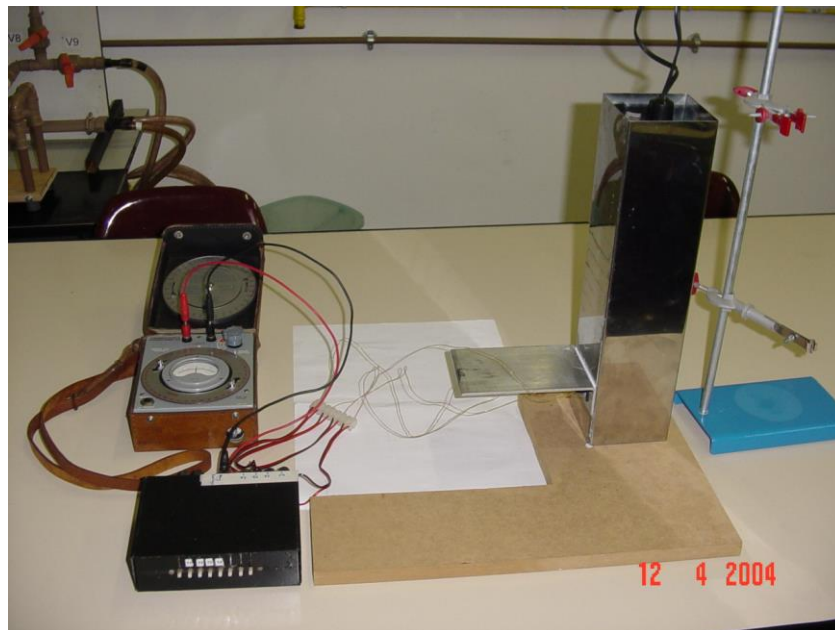


Figura 7 - Posicionamento dos Equipamentos do 3º Experimento

2. Conectar os termopares e os furos da aleta, utilizando fita isolante, conforme esquema a seguir:

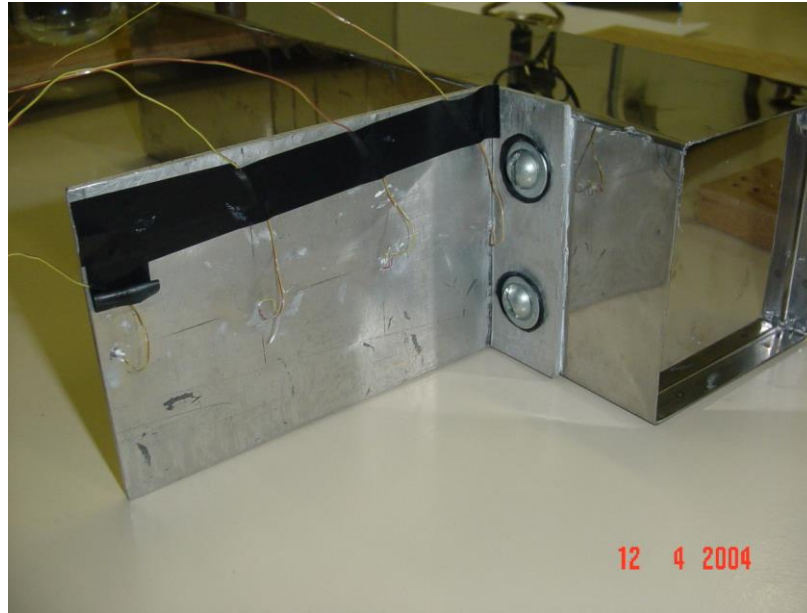


Figura 8 - Posicionamento dos Termopares na Aleta

3. Posicionar os cabos dos termopares e o potenciômetro no seletor de contatos.



Figura 9 - Posicionamento dos Aparelhos e Termopares

4. Encher $\frac{3}{4}$ do vaso de alumínio.

5. Posicionar o aquecedor conforme figura 10, de modo que se mantenha totalmente submerso, sem tocar nas paredes ou no fundo do vaso.

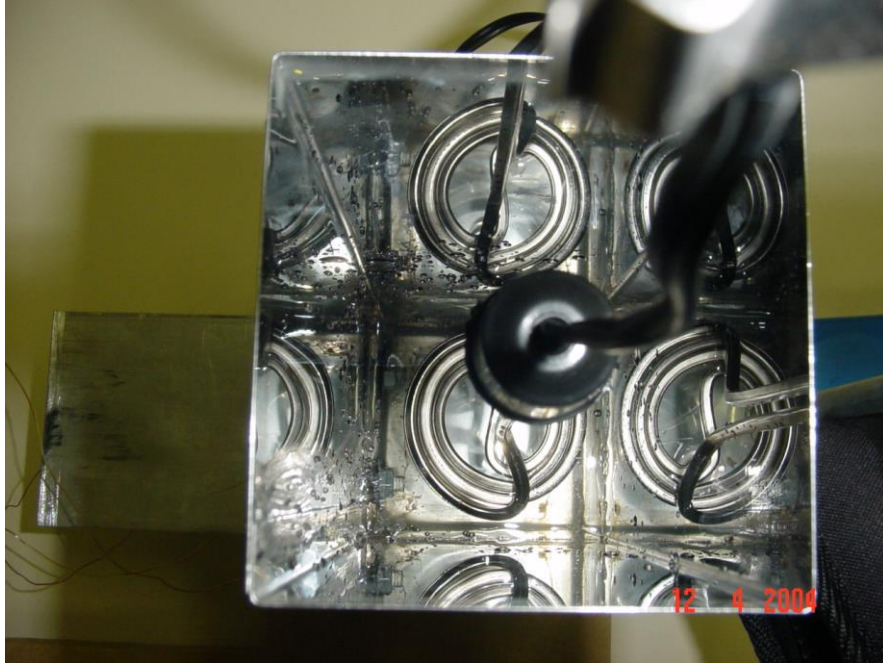


Figura 10 - Posicionamento do Aquecedor

6. Ligar o aquecedor e aguardar até que a água atinja 100°C (verificar com termômetro de mercúrio).

7. Efetuar as medições de temperaturas em intervalos de 10 minutos.

8. As medidas devem ser efetuadas até a obtenção do regime permanente, que pode ser percebido quando as temperaturas estiverem sofrendo variação de apenas 1°C . Isso ocorrerá em aproximadamente 40 minutos.

9. Com todos os valores anotados, utiliza-se a planilha elaborada em Excel para obter os gráficos do perfil de temperatura da aleta, para o seguinte caso (de acordo com a tabela 3.4 do Livro “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”):

A) Transferência convectiva de calor

$$\text{Equação: } \frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh(L-x)m + (h/mk) \cdot \sinh(L-x)m}{\cosh(mL) + (h/mk) \sinh(mL)}$$

Onde:

$\theta \equiv T - T_{\infty}$ (Excesso de temperatura)

$\theta = \theta(0) = T_b - T_{\infty}$ (Temperatura na base da aleta)

$$m^2 \equiv \frac{h \cdot P}{K \cdot A_c} \quad \text{e} \quad m \equiv \sqrt{h \cdot P \cdot K A_c} \cdot \theta_b$$

3.6 Experimento Realizado

De acordo com o procedimento, o experimento foi realizado, obtendo-se o valor de temperaturas, sendo o valor máximo obtido, no regime permanente, de 68°C (base da aleta) e o mínimo de 42°C (ponta da aleta).

A temperatura ambiente era de 27°C = 300K.

Foi desenvolvida uma planilha de cálculos no Microsoft Excel, para fornecer os valores da distribuição de temperaturas ao longo da aleta, para os dois caso mencionado no item 9 do procedimento.

Os valores obtidos são apresentados a seguir:

Caso A) Transferência convectiva de calor:

Aleta plana retangular com seção uniforme ----- Material = Alumínio

Condições de contorno = Temperatura na base conhecida / Convecção no final da aleta

1º consideração = teta médio usado para calcular o h

2º consideração = h da superfície superior da aleta será o usado nos cálculos de teta (x)

Tabela 6 - Comentários e Considerações para o Caso A

PROPRIEDADES DO AR AMBIENTE			ALETA		
Tamb	300	K	Comprimento c	0,152	m
Densidade	1,1614	kg/m ³	Largura w	0,101	m
Cp	1007	J/kgK	Espessura t	0,003	m
Pr	0,707		L	0,030339921	m
Viscosidade dinâmica	0,00001846	N.s/m ²	K alumínio	237	W/mK
Viscosidade cinemática	0,00001589	m ² /s	g	9,81	m/s ²
K	0,0263	W/mK	Teta máximo (teta_b)	68	K
Alfa	0,0000225	m ² /s	Teta mínimo (teta_L)	42	K
Beta	0,003333333	1/K	Teta médio	55	K

Tabela 7 - Propriedades do Ar Ambiente (para 300K) e da Aleta (experimentais)

Rayleigh $L = g * \beta * \theta_{\text{médio}} * L^3 / \nu_{\text{cinem}} * \alpha$
Nusselt ---- para Rayleigh entre 10^4 e 10^7 : $Nusselt = 0,54 * Ra_L^{(1/4)}$
para Rayleigh entre 10^7 e 10^{11} : $Nusselt = 0,15 * Ra_L^{(1/3)}$
$h_s = k * Nusselt / L$
$m = [h_s * 2 * (w + t) / K_{al} * w * t]^{(1/2)}$

Tabela 8 - Equações para os Números de Rayleigh e Nusselt e os coeficientes h_s (transferência de calor por convecção na superfície) e coeficiente m

Rayleigh_L	140490,63
Nusselt_L	10,45
h_s (W/m²K)	9,06
m	5,12

Tabela 9 - Valores calculados para Rayleigh, Nusselt, h_s e coeficiente m

Utilizando a equação para o caso a (item 9 do procedimento), o Excel calcula a distribuição de temperaturas , $\theta(x)$, ao longo da aleta (posições), tal como mostrado na tabela 10 a seguir:

$x (m)$	$teta (x)$	$x (m)$	$teta (x)$	$x (m)$	$teta (x)$
0	68,00	0,051	55,53	0,102	46,87
0,001	67,71	0,052	55,32	0,103	46,73
0,002	67,43	0,053	55,12	0,104	46,60
0,003	67,15	0,054	54,92	0,105	46,46
0,004	66,87	0,055	54,72	0,106	46,33
0,005	66,59	0,056	54,52	0,107	46,20
0,006	66,31	0,057	54,33	0,108	46,07
0,007	66,03	0,058	54,13	0,109	45,94
0,008	65,76	0,059	53,94	0,11	45,81
0,009	65,49	0,06	53,74	0,111	45,69
0,01	65,22	0,061	53,55	0,112	45,56
0,011	64,95	0,062	53,36	0,113	45,44
0,012	64,68	0,063	53,17	0,114	45,32
0,013	64,42	0,064	52,99	0,115	45,19
0,014	64,15	0,065	52,80	0,116	45,07
0,015	63,89	0,066	52,62	0,117	44,96
0,016	63,63	0,067	52,43	0,118	44,84
0,017	63,37	0,068	52,25	0,119	44,72
0,018	63,12	0,069	52,07	0,12	44,60
0,019	62,86	0,07	51,89	0,121	44,49
0,02	62,61	0,071	51,72	0,122	44,38
0,021	62,35	0,072	51,54	0,123	44,26
0,022	62,10	0,073	51,37	0,124	44,15
0,023	61,86	0,074	51,19	0,125	44,04
0,024	61,61	0,075	51,02	0,126	43,94
0,025	61,36	0,076	50,85	0,127	43,83
0,026	61,12	0,077	50,68	0,128	43,72
0,027	60,88	0,078	50,51	0,129	43,62
0,028	60,64	0,079	50,35	0,13	43,51
0,029	60,40	0,08	50,18	0,131	43,41
0,03	60,16	0,081	50,02	0,132	43,31
0,031	59,92	0,082	49,85	0,133	43,21
0,032	59,69	0,083	49,69	0,134	43,11
0,033	59,46	0,084	49,53	0,135	43,01
0,034	59,23	0,085	49,37	0,136	42,91
0,035	59,00	0,086	49,22	0,137	42,82
0,036	58,77	0,087	49,06	0,138	42,72

0,037	58,54	0,088	48,90	0,139	42,63
0,038	58,32	0,089	48,75	0,14	42,53
0,039	58,09	0,09	48,60	0,141	42,44
0,04	57,87	0,091	48,45	0,142	42,35
0,041	57,65	0,092	48,30	0,143	42,26
0,042	57,43	0,093	48,15	0,144	42,17
0,043	57,21	0,094	48,00	0,145	42,09
0,044	57,00	0,095	47,86	0,146	42,00
0,045	56,78	0,096	47,71		
0,046	56,57	0,097	47,57		
0,047	56,36	0,098	47,43		
0,048	56,15	0,099	47,28		
0,049	55,94	0,1	47,14		
0,05	55,73	0,101	47,01		

Tabela 10 - Distribuição de Temperaturas ao Longo da Aleta de Alumínio para o Caso A

A seguir, a planilha exibiu o gráfico das distribuições de temperatura para ambos os casos. No mesmo gráfico, se encontram as temperaturas T1, T2, T3 e T4 obtidas experimentalmente (termopares), no momento em que o sistema atingiu o regime permanente.

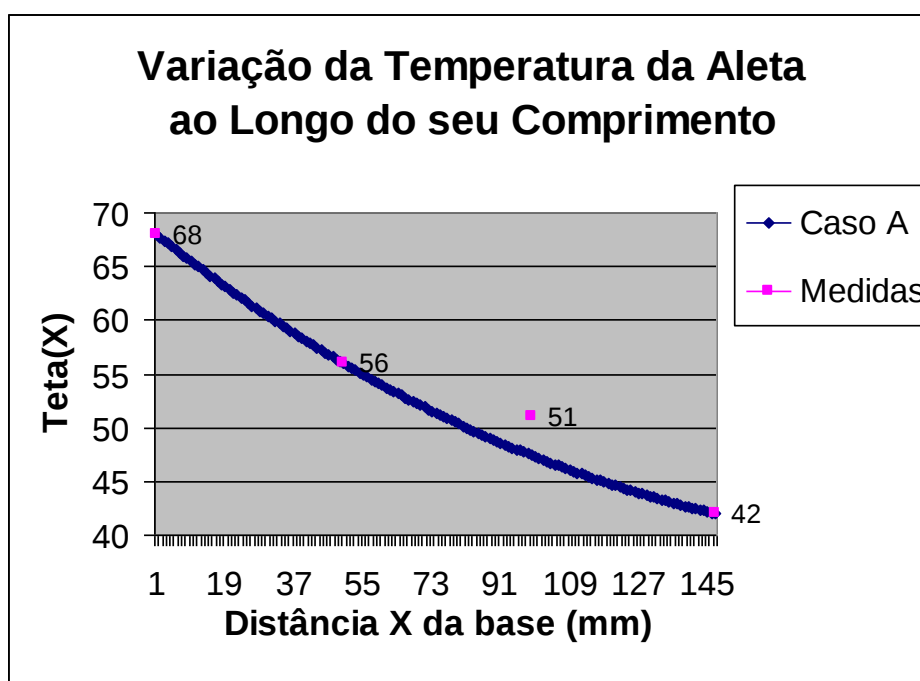


Figura 11 - Distribuição de Temperaturas ao Longo da Aleta

3.7 Conclusões

O principal conhecimento adquirido por esta experiência diz respeito à extensão da melhoria da dissipação de calor de uma superfície (neste caso, a parede do vaso de alumínio) para o fluido circundante (neste caso, o ar), que se pode conseguir com uma superfície expandida: a aleta de alumínio.

Obteve-se a distribuição de temperaturas na aleta de seção uniforme ao sofrer condução unidimensional em regime permanente.

De acordo com o gráfico gerado pelo Excel (Figura 11), pode-se observar que as temperaturas medidas experimentalmente se encontram próximas à região da curva. Portanto, percebe-se que as considerações e equações utilizadas (caso A, tabela 3.4 da 3ª Edição do Livro “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”) comprovam o bom resultado do experimento.

4 EXPERIÊNCIA 4: ISOLAMENTO TÉRMICO

4.1 Introdução

Este experimento reforça o estudo acerca dos modos de transferência de calor existentes: condução, convecção e radiação. Trata também da influência dos isolantes sobre esses processos.

A condução ocorre quando existe um gradiente de temperaturas em um meio estacionário, que pode ser sólido ou fluido.

A convecção se refere à transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento.

A radiação térmica consiste na emissão de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas entre duas superfícies de temperaturas diferentes, promovendo a transmissão de calor entre elas.

Utiliza-se garrafas de Dewar, comumente conhecidos como *garrafas térmicas*, para analisar os modos de transmissão de calor existentes em cada uma delas, bem como a influência dos isolantes térmicos – alumínio e vácuo – sobre estes elementos.

4.2 Objetivos

Analisar e comparar a eficiência de diferentes formas de isolamento térmico aos três modos de transmissão de calor e, a partir do balanço de energia, determinar as resistências térmicas correspondentes a cada isolante.

4.3 Equipamentos

4 garrafas de Dewar (garrafas térmicas):

- garrafa “A” – paredes espelhadas e espaço interno com vácuo;
- garrafa “B” – paredes espelhadas sem vácuo;
- garrafa “C” – não espelhada mas com vácuo;
- garrafa “D” – não tem vácuo nem paredes espelhadas;

4 rolhas;

4 termopares (chromel-allumel);

1 seletor de contatos;

1 milivoltímetro com precisão mínima de 0,1mV;

1 termômetro (bulbo de mercúrio);

1 aquecedor;

recipiente p/ água e funil;

1 cronômetro;

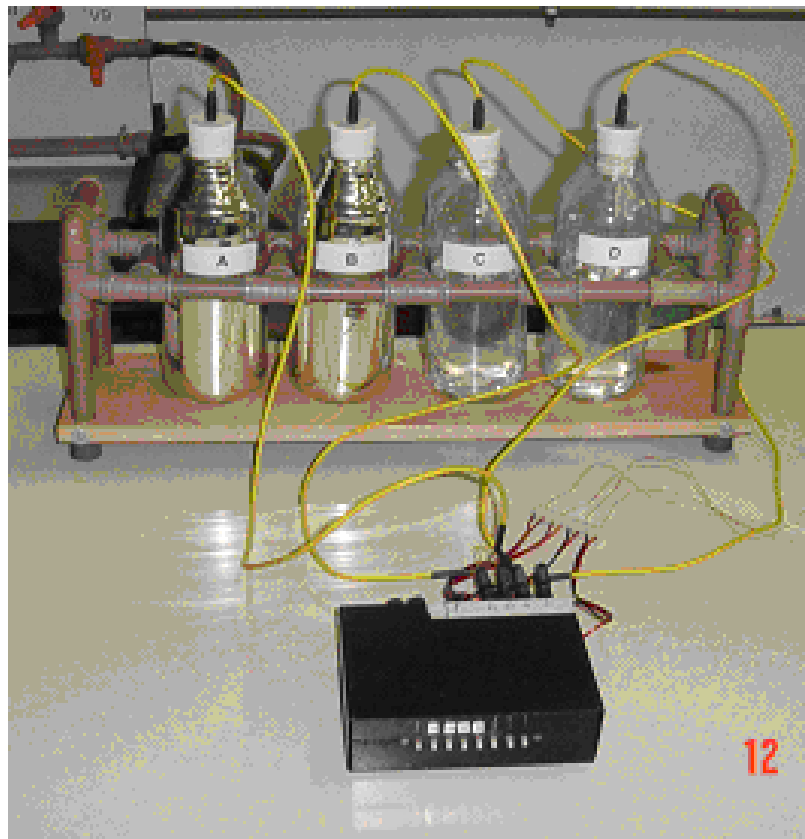


Figura 12 - Posicionamento dos Equipamentos do 4º Experimento

4.4 Procedimento

1. Aquecer a água no recipiente (1 litro) até a ebulição (100°C)
2. Procura-se distribuir o melhor possível a água entre os 4 frascos, medindo-se a massa de água de cada frasco.
3. As garrafas são fechadas com as rolhas, tendo os termopares de imersos a meia altura no seu interior.
4. As temperaturas são medidas ao longo da experiência, com intervalos de 10 minutos.
5. Após um número significativo de medidas (10, por exemplo), as medições podem ser encerradas.
6. Estimar um valor de emissividade (ε) para a garrafa B (que não possui isolamento quanto à radiação) e, através das correlações para convecção natural do livro texto utilizado, um valor para h_c devido à presença do ar entre as paredes do vidro da garrafa C. Procurar então responder à pergunta de quem possui o melhor isolamento térmico – garrafa B ou C.



Figura 13 - Garrafas de Dewar

4.5 Experimento Realizado

O experimento foi realizado de acordo com o procedimento, colocando-se aproximadamente 740g de água em cada frasco.

A seguir, mediu-se as temperaturas ao longo do tempo. Na Planilha do Excel, foi possível obter um gráfico da distribuição de temperaturas para cada frasco, como pode ser observado abaixo:

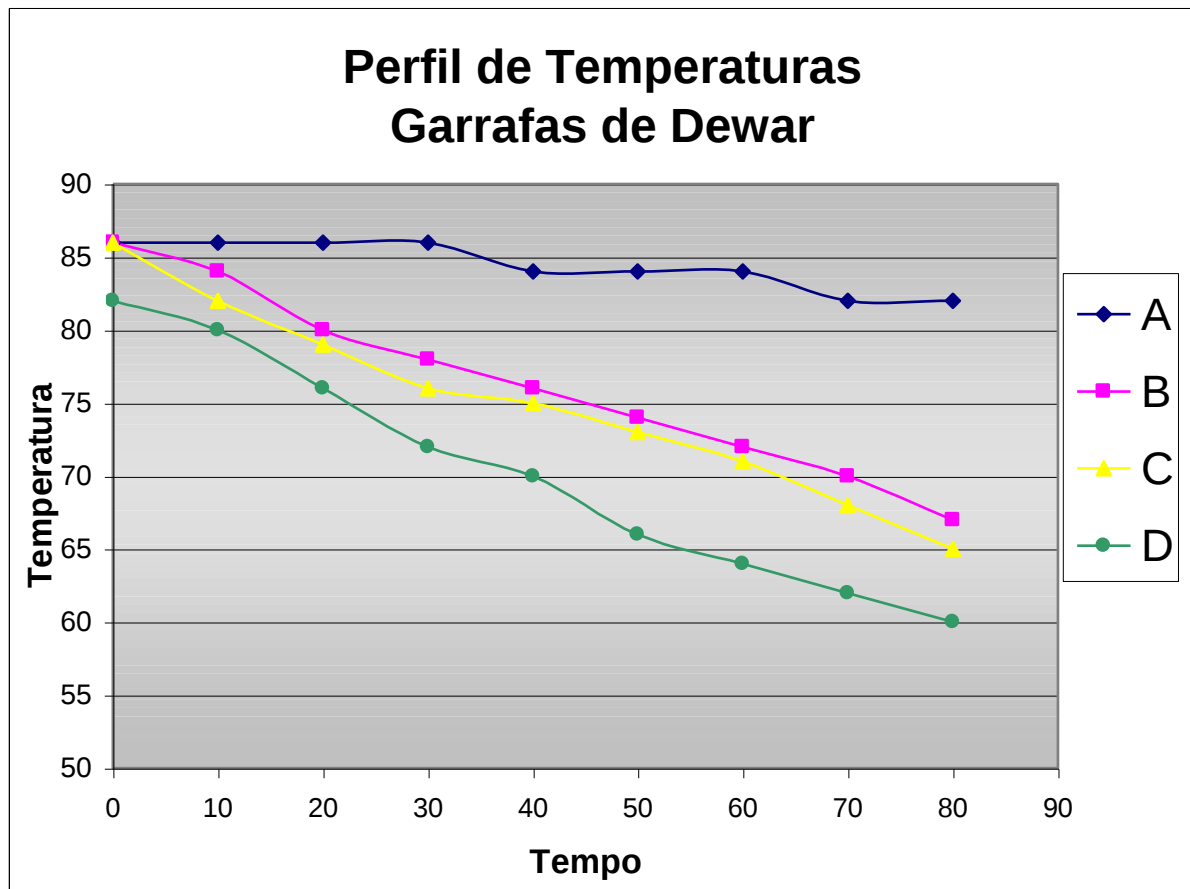


Figura 14 - Perfil de Temperaturas das Garrafas de Dewar

Utilizando o modelo matemático existente na literatura de referência [1], é possível obter a aproximação de uma curva teórica sobre as curvas experimentais observadas na figura 14 para as garrafas B e C.

A aproximação da curva teórica para a curva experimental da **garrafa B** foi obtida utilizando-se a seguinte expressão (equação 5.18 da referência [1]):

$$t = \frac{\rho V c}{4 \varepsilon A_s \sigma T_\infty^3} \left\{ \ln \left| \frac{T_\infty + T}{T_\infty - T} \right| - \ln \left| \frac{T_\infty + T_i}{T_\infty - T_i} \right| + 2 \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{T}{T_\infty} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{T_i}{T_\infty} \right) \right] \right\}$$

onde ρ = densidade da água = 1000Kg/m³

V = volume de água no interior da garrafa de Dewar

c = calor específico da água = 4,2KJ/KgK

ε = emissividade da superfície da garrafa de Dewar

A_s = área da superfície de troca térmica

σ = constante de Stefan-Boltzmann = 5,670.10⁻⁸ W/m².K⁴

T_i = temperatura inicial

T_∞ = temperatura da vizinhança (temperatura ambiente)

t = tempo para atingir a temperatura T

De acordo com os dados experimentais, a temperatura inicial para a garrafa B é de 86°C = 359K e a temperatura ambiente verificada no momento é de 300K.

A área da superfície de troca térmica pode ser definida por:

$$A_s = \pi \cdot d \cdot h,$$

sendo d o diâmetro interno da garrafa (0,085m) e h a altura de água no interior da garrafa (0,13m), obtidos no momento do experimento. Dessa forma, obtém-se:

$$A_s = 3,4823 \cdot 10^{-2} \quad \text{m}^2$$

Na garrafa B, foi colocado um volume de água de 7,4. 10⁻⁴ m³.

A partir de todos estes valores conhecidos, pode-se elaborar uma planilha no Excel contendo a equação descrita, para estimar um valor de emissividade de modo que os valores obtidos para o tempo t se aproximem o máximo possível dos valores experimentais.

Dessa forma, obtém-se a emissividade que mais aproxima a modelagem matemática da modelagem experimental. As curvas aproximadas são apresentadas a seguir:

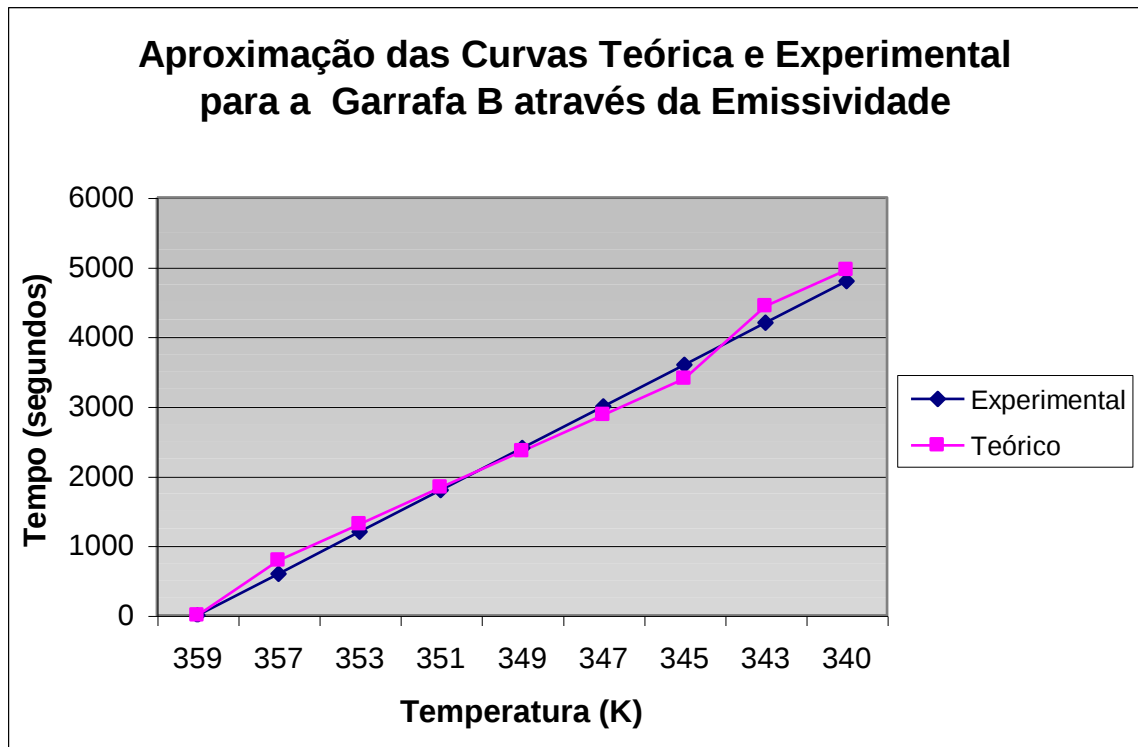


Figura 15 - Aproximação das Curvas Teórica e Experimental para a Garrafa B

A partir da mudança de valores da emissividade, foi possível aproximar as curvas. O valor de emissividade encontrado é:

$$\varepsilon = 0,008$$

Para a **garrafa C**, deve-se obter um valor estimado para o coeficiente de transferência de calor por convecção, h_c .

Da mesma forma, foi feita uma aproximação da curva teórica para a curva experimental da garrafa C.

A expressão matemática utilizada (equação 5.24 da referência [1], com coeficiente $b \approx 0$) é descrita a seguir:

$$\ln\left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right) = -\frac{h.A_s}{\rho V c} t$$

De acordo com os dados experimentais, a temperatura inicial para a garrafa C é de $86^{\circ}\text{C} = 359\text{K}$ e a temperatura ambiente verificada no momento é de 300K .

Na garrafa C foi colocado o mesmo volume de água que na garrafa B. Da mesma forma, a área da superfície de troca térmica também é a mesma, pois as garrafas possuem os mesmos diâmetros internos e externos.

Portanto, para esta equação também são conhecidos todos os valores, exceto h , que será o valor estimado de modo que possibilite a melhor aproximação das curvas teórica (de acordo com a modelagem matemática acima) e experimental (figura 14).

Da mesma forma que a garrafa B, para a garrafa C também foi desenvolvida uma planilha no Excel contendo a equação acima. O valor de h_C foi sendo modificado até se obter a máxima aproximação da curva teórica com a curva obtida experimentalmente. A aproximação das curvas pode ser observada a seguir:

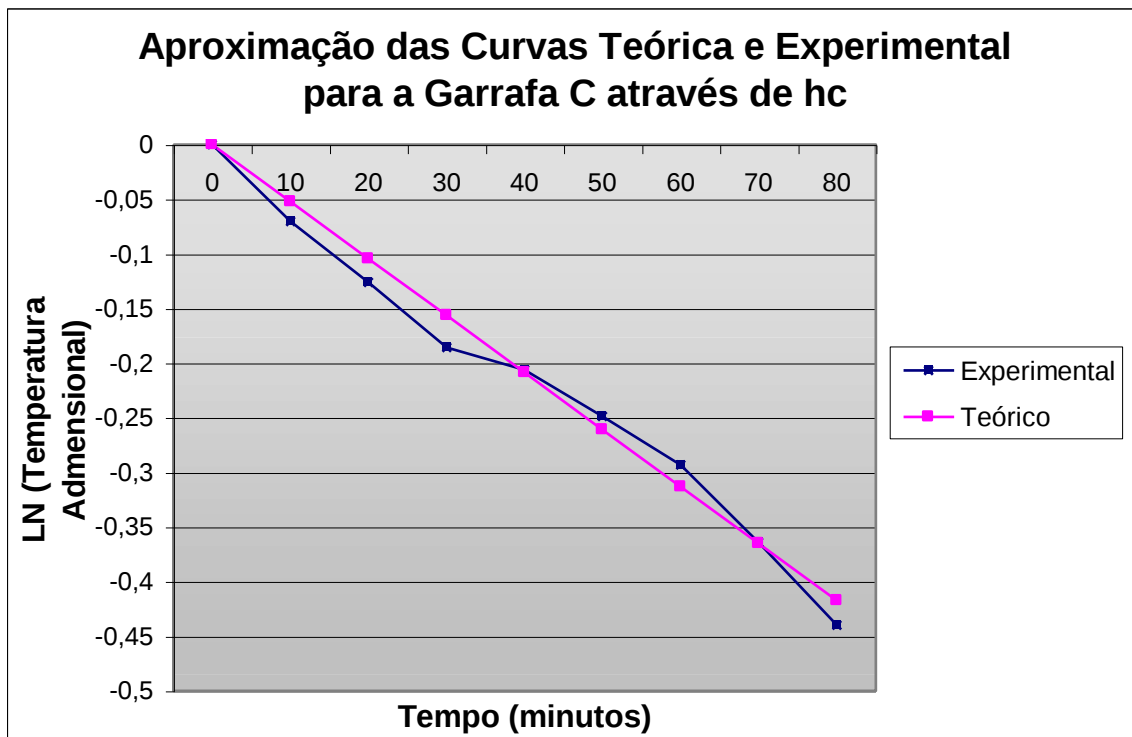


Figura 16 - Aproximação das Curvas Teórica e Experimental para a Garrafa C

O valor de h_C obtido para efeitos de máxima aproximação das curvas é:

$$h_C = 0,466 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.6 Conclusões

A garrafa A possui isolamento contra radiação (superfície aluminizada de baixa emissividade) e isolamento contra convecção (vácuo entre as paredes de vidro). Trata-se, portanto, do frasco mais bem isolado que os demais, possuindo lenta perda térmica para com o ambiente.

A garrafa D não possui nenhum tipo de isolamento térmico, constituindo o frasco de maior perda térmica.

Foi proposta a análise e comparação dos isolantes (convecção e radiação), utilizando-se as garrafas B e C.

Pelo gráfico obtido (figura 14) a partir das temperaturas medidas ao longo do tempo, percebe-se que a garrafa C perde mais calor que a garrafa B em um mesmo intervalo de tempo. Portanto, a garrafa B (isolada quanto à radiação) possui melhor isolamento que a garrafa C (isolada quanto à convecção).

Percebe-se que é possível estimar um valor para o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_C) da garrafa C e um valor para a emissividade (ε) da garrafa B, de modo que o experimento se aproxime o máximo possível das correlações matemáticas pertinentes (referência bibliográfica [1]).

Dessa forma, constata-se a validade do experimento com relação à análise geral da Capacitância Global para condução transiente.

5 CONCLUSÃO FINAL

A transferência de calor, comumente conhecida como o trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura em um ou mais meios, é questão relevante para o Engenheiro Mecânico, dado o papel importante dos fenômenos térmicos no ambiente industrial ou científico nos quais o profissional está inserido.

Em muitos casos, é necessário tornar máximas as taxas de transferência de calor em equipamentos que operam a altas temperaturas. Outras vezes, a transferência de calor deve ser mínima para garantir a eficiência do equipamento. E ainda existem casos em que a energia térmica pode ser transformada em energia elétrica e reaproveitada dentro das grandes indústrias.

Tendo em vista a importância da transferência de calor para o curso de Engenharia Mecânica, foram elaborados os 4 módulos experimentais apresentados neste projeto, para que possam complementar as aulas teóricas desta disciplina.

Pode-se afirmar que os módulos experimentais estão de acordo com a metodologia e bibliografia adotadas no ensino da referida disciplina, e reforçam a compreensão do estudante sobre os princípios e aplicações mencionados ao longo do projeto.

Os experimentos terão um papel motivador, devido ao relacionamento da teoria com a prática e as necessidades reais da engenharia no contexto atual.

APÊNDICE A

A Origem da Escala Celsius de Temperatura

(Um pequeno pedaço da História Sueca de Ciências)

Em 1742 o astrônomo Anders Celsius publicou um trabalho no “Kungliga Swenska wetenskaps Academiens Handlingar”, nos anais da Academia Real de Ciências Sueca, intitulado “Observações sobre dois graus persistentes de um termômetro”. Este trabalho foi a origem da escala de temperatura Celsius.

Depois de fornecer uma base para os vários modos de expressar a temperatura usados naquela época, Celsius apresentou seus experimentos com dois pontos fixos para a escala de temperatura: a temperatura em que se degela a neve ou o gelo e a temperatura que a água ferve.

A idéia de usar o ponto de solidificação da água como um ponto de calibração de temperatura, não era novidade, e já tinha sido sugerida por Réaumur e Newton, assim como por cientistas contemporâneos menos conhecidos como Martins, Weitbrecht e Poleni. Contudo, Celsius usou o ponto de fusão em vez do ponto de solidificação.

“Este experimento”, Celsius escreve referindo-se a colocar o termômetro na neve derretendo, “ Eu repeti várias vezes durante dois anos em todos os meses do inverno, em todos os tipos de climas e durante diferentes mudanças barométricas e sempre encontrei precisamente o mesmo ponto no termômetro... Quando o inverno era rigoroso eu levava a neve para o meu quarto e colocava-a em cima do fogo até que começasse a degelar...”

Além disso, usando um dos termômetros de Réaumur, Celsius encontrou, dentro do erro experimental, o mesmo ponto de solidificação tanto em Uppsala (latitude 60° N) como em Tornea (latitude 66° N) que Réaumur encontrou em Paris.

O segundo ponto de calibração foi mais complicado. “Em relação ao segundo ponto fixo,” escreve Celsius, “é sabido que a partir do momento em que a água começa a ferver, não tomará nenhum grau considerável de calor mesmo que continue fervendo por longo tempo; dessa forma o mercúrio no termômetro continuará no mesmo ponto, apesar das objeções do Sr. Taglini .”

Entretanto, a intensidade da fervura poderá afetar o ponto de calibração até certo grau e Celsius propõe um método padronizado para a determinação. Ele também observa que quando o termômetro é tirado da água fervente, o nível do mercúrio primeiro sobe um pouco antes de se retrair. A explicação, Celsius sugere, é que o tubo de vidro se contrai antes do mercúrio começar a esfriar.

O segundo fator que afeta o ponto de ebulição da água é a pressão do ar. Isto já tinha sido observado por Fahrenheit e Celsius reporta em diversos experimentos a confirmação desta observação. Sua conclusão é de que “a altitude do termômetro na água fervendo é sempre proporcional à altitude do barômetro; assim, 8 “ pontos ” no termômetro que eu uso correspondem à uma mudança de “1 polegada” na leitura do barômetro; o termômetro que seja um pouco mais sensível ou tenha graus maiores, poderá ser usado como um barômetro quando posto em água fervente e seria mais fácil carregar em viagens por mar ou terra e especialmente em montanhas altas.”

Finalmente Celsius propôs um procedimento padrão para calibrar o termômetro:

- 1- Ponha o cilindro AB do termômetro (ou seja, o bulbo) na neve em fusão e marque o ponto de gelo de água C, o qual deveria estar a uma altura sobre o cilindro A, de modo que a distância AC seja metade da distância entre C e a marca do ponto de ebulição da água D.
- 2- Marque o ponto de ebulição da água D à uma pressão de “25 tum 3 linear” (aproximadamente 755 mm).

- 3- Divida a distância em 100 partes ou graus iguais; de modo que o grau 0 corresponda ao ponto de ebulição da água (D) e o grau 100 corresponda ao ponto de solidificação da água (C). Quando os mesmos graus estiverem continuamente abaixo de C, em todo o caminho até A, o termômetro estará pronto.

Celsius, assim, atribui ao ponto de ebulição, 0° e ao ponto de solidificação, 100°. Isto logo seria invertido. É quase sempre afirmado que Carl Von Linnè (Carolus Linnaeus) instigou a inversão, mas aparentemente, a pessoa responsável foi Daniel Ekström.

APÊNDICE B

TERMOPARES

Os Termopares são os sensores de maior uso industrial para a medição de temperatura. Eles cobrem uma faixa bastante extensa de temperatura que vai de -200 a 2300°C aproximadamente, com uma boa precisão e repetibilidade aceitável, tudo isto a um custo que se comparado com outros tipos de sensores de temperatura são mais econômicos.

Teoria Termoelétrica

O fenômeno da termoeletricidade foi descoberto em 1821 por T.J. Seebeck, quando ele notou que em um circuito fechado formado por dois condutores metálicos e distintos A e B, quando submetidos a um diferencial de temperatura entre as suas junções, ocorre uma circulação de corrente elétrica (i).

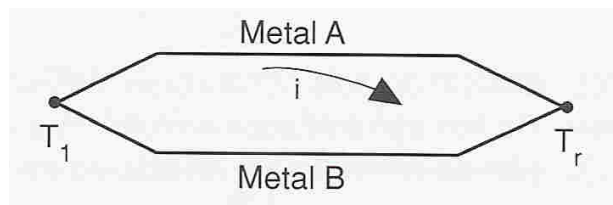


Figura 17 - Efeito Seebeck

A existência de uma força eletro-motriz (fem) E_{AB} no circuito é conhecida como Efeito Seebeck, e este se produz pelo fato de que a densidade de elétrons livres num metal, difere de um condutor para outro e depende da temperatura.

Quando este circuito é interrompido, a tensão do circuito aberto (Tensão de Seebeck) torna-se uma função das temperaturas das junções e da composição dos dois metais.

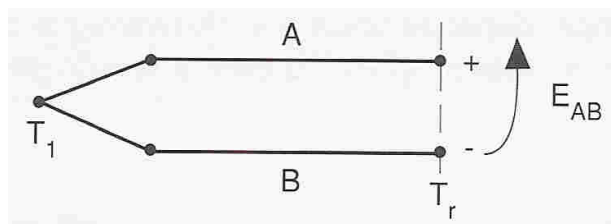


Figura 18 - Tensão de Seebeck

Denominamos a junção na qual está submetida à temperatura a ser medida de Junção de medição(ou junta quente) e a outra extremidade que vai ligar no instrumento medidor de Junção de referência (ou junta fria).

Quando a temperatura da junção de referência (T_r) é mantida constante, verifica-se que a fem térmica (E_{AB}) é uma função da temperatura da junção de medição (T_1). Isto permite utilizar este circuito como um medidor de temperatura, pois conhecendo-se a T_r e a fem gerada, determina-se a T_1 .

$$E_{AB} = f(\Delta T)$$

$$E_{AB} = E_{T1} - E_{Tr}$$

Definição de Termopar

O aquecimento de dois metais diferentes com temperaturas diferentes em suas extremidades, gera o aparecimento de uma fem (da ordem de mV). Este princípio conhecido como efeito Seebeck propiciou a utilização de termopares para a medição de temperatura.

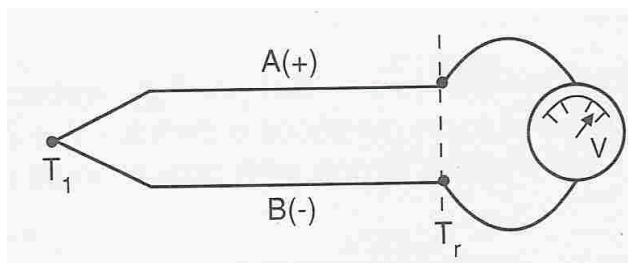


Figura 19 - Esquema de um termopar

Um termopar ou par termoelétrico consiste de dois condutores metálicos de natureza distinta, na forma de metais puros ou ligas homogêneas. Os fios são soldados em um extremo ao qual se dá o nome de junção de medição; a outra extremidade, junção de referência é levada ao instrumento medidor por onde flui a corrente gerada.

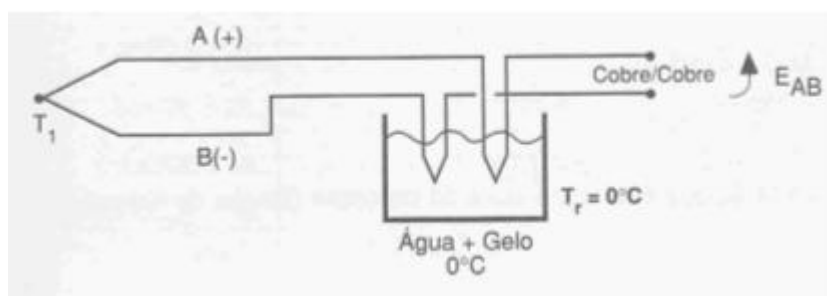
Convencionou-se dizer que o metal A é o positivo e B é o negativo, pois a tensão e corrente geradas são na forma contínua (cc).

Compensação da Temperatura Ambiente (T_r)

Como dito anteriormente, para se usar o termopar como medidor de temperatura, é necessário conhecer a fem gerada e a temperatura da junção de referência T_r , para sabermos a temperatura da junção de medição T_1 .

$$E = E_{T_1} - E_{T_r}$$

Portanto não podemos encontrar a temperatura T_1 a não ser que saibamos quanto é a temperatura T_r . Uma maneira de se determinar a temperatura T_r (ponto de conexão do termopar ao instrumento de medida) é forçá-la para um valor conhecido, como por exemplo 0°C .



$$E_{AB} = E_n - E_{T_r}$$

$$E_{AB} = E_n - 0$$

$$E_{AB} = E_n$$

Figura 20 - Compensação da Temperatura Ambiente

Ao colocarmos as extremidades do termopar a zero graus (banho de gelo), o sinal gerado pelo sensor só dependerá da temperatura T_1 do meio a ser medido, pois a tensão gerada a 0°C é zero mV. Então a fem lida no instrumento será diretamente proporcional a temperatura T_1 (junção de medição).

$$E = E_{T_1} - E_{T_r}$$

$$E = E_{T_1} - E_{0^\circ C} \quad (\text{como } E_{0^\circ C} = 0\text{mV})$$

$$E = E_{T_1} \rightarrow T_1$$

Portanto acha-se o valor da temperatura T_1 .

O banho de gelo ainda é muito usado em laboratórios e indústrias, pois consiste num método relativamente simples e de grande precisão.

Hoje dispositivos alternativos foram desenvolvidos para simular automaticamente uma temperatura de 0°C , chamada de compensação automática da junção de referência ou da temperatura ambiente.

Nestes instrumentos encontra-se um sensor de temperatura que pode ser um resistor, uma termoresistência, termistor, diodo, transistor ou mesmo um circuito integrado que mede continuamente a temperatura ambiente e suas variações, adicionando ao sinal que chega do termosensor uma mV correspondente à diferença da temperatura ambiente para a temperatura de 0°C .

Ex: Termopar tipo K sujeito a 100°C na junção de medição e 25°C na borneira do instrumento (junção de referência)

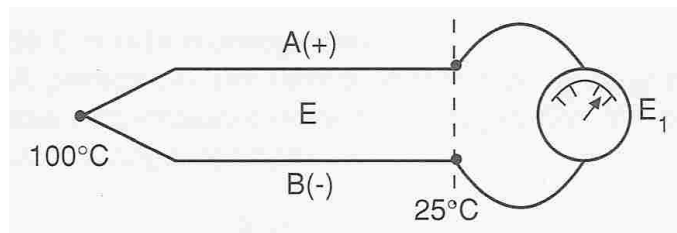


Figura 21 - Termopar Tipo K

$$E = E_{100} - E_{25}$$

$$E = 4,095 - 1,000 = 3,095\text{mV}$$

Se não existisse a compensação, o sinal de 3,095mV seria transformado em indicação de temperatura pelo instrumento e corresponderia a aproximadamente 76°C; bem diferente dos 100°C a qual o termopar está submetido (erro de -24°C).

Como no instrumento medidor, está incorporado um sistema de compensação da temperatura ambiente, este gera um sinal como se fosse um outro termopar que chamamos de E_1 :

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{25} - E_0 = E_{25} \\ E_1 &= 1,000\text{mV} \end{aligned} \quad (\text{sinal gerado pelo circuito de compensação})$$

O sinal total que será convertido em temperatura pelo instrumento será a somatória do sinal do termopar e da compensação, resultando na indicação correta da temperatura na qual o termopar está submetido (independendo da variação da temperatura ambiente).

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} &= E + E_1 \\ E_{\text{total}} &= 3,095 + 1,000 = 4,095 \text{ mV} \\ E_{\text{total}} &= 4,095 \text{ mV} \Rightarrow 100^\circ\text{C} \end{aligned}$$

A indicação do instrumento será de 100°C, que é a temperatura do processo (junção de medição do termopar).

CONVERSÃO DE TENSÃO PARA TEMPERATURA

Como a relação fem X temperatura de um termopar não é linear, o instrumento indicador deve de algum modo linearizar o sinal gerado pelo sensor.

No caso de alguns instrumentos analógicos (como registradores), a escala gráfica do instrumento não é linear acompanhando a curva do termopar; e em instrumentos digitais usa-se ou a tabela de correlação fem X temperatura, armazenada em memória ou uma equação matemática que descreve a curva do sensor.

Esta equação é um polinômio, que a depender da precisão requerida pode alcançar uma ordem de até 9º grau.

Equação matemática genérica de um termopar:

$$T = a_0 + a_1 \cdot X^1 + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3 + \dots + a_n \cdot X^n$$

Onde: T: a temperatura

a: o coeficiente de cada termopar

x: a milivoltagem gerada

n: a ordem do polinômio

Listamos abaixo os coeficientes de vários tipos de termopar:

	Tipo E	Tipo J	Tipo K	Tipo R	Tipo S	Tipo T
	Níquel-Cromo(+) Versus Cobre-Níquel(-)	Ferro(+) Versus Cobre-Níquel(-)	Níquel-Cromo(+) Versus Níquel-Alumínio(-)	Platina - 13% Ródio(+) Versus Platina(-)	Platina - 10% Ródio(+) Versus Platina(-)	Cobre (+) Versus Cobre-Níquel(-)
	-100°C a 1000°C ±0,5°C 9ª ordem	0°C a 760°C ±0,1°C 5ª ordem	0°C a 1370°C ±0,7°C 8ª ordem	0°C a 1000°C ±0,5°C 8ª ordem	0°C a 1750°C ±1°C 9ª ordem	-160°C a 400°C ±0,5°C 7ª ordem
a ₀	0,104967248	-0,048868252	0,226584602	0,263632917	0,927763167	0,100860910
a ₁	17189,45282	19873,14503	24152,10900	179075,491	169526,5150	25727,94369
a ₂	-282639,0850	-218614,5353	67233,4248	-48840341,37	-31568363,94	-767345,8295
a ₃	12695339,5	11569199,78	2210340,682	1,90002E + 10	8990730663	78025595,81
a ₄	-448703084,6	-264917531,4	-860963914,9	-4,82704E + 12	-1,63565E + 12	-9247486589
a ₅	1,10866E + 10	2018441314	4,83506E + 10	7,62091E + 14	1,88027E + 14	6,97688E + 11
a ₆	-1,76807E + 11		-1,18452E + 12	-7,20026E + 16	-1,37241E + 16	-2,66192E + 13
a ₇	1,71842E + 12		1,38690E + 13	3,71496E + 18	6,17501E + 17	3,94078E + 14
a ₈	-9,19278E + 12		-6,33708E + 13	-8,03104E + 19	-1,56105E + 19	
a ₉	2,06132E + 13				1,69535E + 20	

Tabela 11 - Conversão de Tensão para Temperatura

TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS TERMOPARES:

Foram desenvolvidas diversas combinações de pares de ligas metálicas com o intuito de se obter uma alta potência termoelétrica ($\text{mV}/^{\circ}\text{C}$) para que seja detectável pelos instrumentos de medição, aliando-se ainda às características de homogeneidade dos fios, resistência à corrosão, relação razoavelmente linear entre temperatura e tensão entre outros, para que se tenha uma maior vida útil do mesmo.

Podemos dividir os termopares em 3 grupos:

- Termopares de Base Metálica ou Básicos
- Termopares Nobres ou a Base de Platina
- Termopares Novos

Os termopares de base metálica ou básicos são os termopares de maior uso industrial, em que os fios são de custo relativamente baixo e sua aplicação admite um limite de erro maior.

As nomenclaturas adotadas estão de acordo com as normas IEC 584-2 de julho de 1982.

* Tipo T

- Composição: Cobre (+) / Cobre – Níquel (-)

O fio negativo cobre – níquel é conhecido comercialmente com Constantan.

- Faixa de utilização: -200 a 350°C
- Características:

Estes termopares são resistentes à corrosão em atmosferas úmidas e são adequados para medidas de temperatura abaixo de zero. Seu uso no ar ou em ambientes oxidantes é limitado a um máximo de 350°C devido à oxidação do fio de cobre. Podem ser usados em atmosferas oxidantes (excesso de oxigênio), redutoras

(rica em hidrogênio, monóxido de carbono), inertes (neutras) e no vácuo; na faixa de - 200 a 350°C.

-Identificação da Polaridade:

O cobre (+) é avermelhado e o cobre – níquel (-) não.

- Aplicação:

Sua maior aplicação está me indústrias de refrigeração e ar condicionado e baixas temperaturas em geral.

* Tipo J

- Composição: Ferro (+) / Cobre – Níquel (-)

O fio negativo cobre – níquel é conhecido comercialmente como Constantan.

- Faixa de Utilização: -40 a 750 °C

- Características:

Estes termopares são adequados para uso no vácuo, em atmosferas oxidantes, redutoras e inertes. A taxa de oxidação do fio de ferro é rápida acima de 540°C e o uso em tubos de proteção é recomendado para dar uma maior vida útil em altas temperaturas.

O termopar do tipo J não deve ser usado em atmosferas sulfurosas (contém enxofre) acima de 540°C. O uso de temperaturas abaixo de 0°C não é muito recomendado, devido à rápida ferrugem e quebra do fio de ferro, o que torna seu uso em temperaturas negativas menor que o tipo T.

Devido à dificuldade de obtenção de fios de ferro com alto teor de pureza, o termopar tipo J tem custo baixo e é um dos mais utilizados industrialmente.

- Identificação da Polaridade:

O ferro (+) é magnético e o cobre – níquel (-) não.

- Aplicação:

Indústrias em geral em até 750°C.

* Tipo E

- Composição: Níquel – Cromo (+) / Cobre – Níquel (-)

O fio positivo cobre – cromo é conhecido comercialmente como Cromel e o negativo cobre – níquel é conhecido como Constantan.

- Faixa de Utilização: -200 a 900 °C

- Características:

Estes termopares podem ser usados em atmosferas oxidantes e inertes. Em atmosferas redutoras, alternadamente oxidante e redutora e no vácuo, não devem ser utilizados pois perdem suas características termoelétricas.

É adequado para uso em temperaturas abaixo de zero, desde que não esteja sujeito a corrosão em atmosferas úmidas.

O termopar tipo E é o que apresenta a maior geração de mV/°C do que todos os outros termopares, o que o torna útil na detecção de pequenas alterações de temperatura.

- Identificação de Polaridade:

O níquel – cromo (+) é mais duro que o cobre – níquel (-).

- Aplicação:

Uso geral até 900°C.

Nota: Os termopares tipo T, J e E tem como fio negativo a liga Constantan, composto de cobre e níquel, porém a razão entre estes dois elementos varia de acordo com as características do fio positivo (cobre, ferro e níquel - cromo). Portanto o constantan do fio negativo não deve ser intercambiado entre os três tipos de termopares.

* Tipo K

- Composição: Níquel – Cromo (+) / Níquel – Alumínio(-)

O fio positivo níquel – cromo é conhecido comercialmente como Cromel e o negativo níquel – alumínio é conhecido como Aludel. O aludel é uma liga de níquel, alumínio, manganês e silício.

- Faixa de Utilização: -200 a 1200 °C

- Características:

Os termopares tipo K são recomendáveis para uso em atmosferas oxidantes ou inertes no seu range de trabalho. Por causa de sua resistência à oxidação, são melhores que os do tipo T, J e E e por isso são largamente usados em temperaturas superiores a 540°C.

Podem ser usados ocasionalmente em temperaturas abaixo de zero graus.

O termopar de Níquel – Cromo (ou Cromel) / Níquel – Alumínio (ou Aludel) como também é conhecido, não deve ser utilizado em:

1. Atmosferas redutoras ou alternadamente oxidante e redutora.
2. Atmosferas sulfurosas, pois o enxofre ataca ambos os fios e causa rápida ferrugem e quebra do termopar.
3. Vácuo, exceto por curtos períodos de tempo, pois o cromo do elemento positivo pode vaporizar causando descalibração do sensor.
4. Atmosferas que facilitem a corrosão chamada de “Green-Root”. Green-Root, oxidação verde, ocorre quando a atmosfera ao redor do termopar contém pouco oxigênio, como por exemplo dentro de um tubo de proteção longo, de pequeno diâmetro e não ventilado.

Quando isto acontece os fios ficam esverdeados e quebradiços, ficando o fio positivo (cromel) magnético e causando total descalibração e perdas de sua características.

O green-root pode ser minimizado aumentando o fornecimento de oxigênio através do uso de um tubo de proteção de maior diâmetro ou usando um tubo ventilado.

Outro modo é de diminuir a porcentagem de oxigênio para um valor abaixo do qual proporcionará a corrosão. Isto é feito inserindo-se dentro do tubo um “getter” ou elemento que absorve oxigênio e vedando-se o tubo.

O “getter” pode ser por exemplo uma pequena barra de titânio.

- Identificação da Polaridade:

O níquel – cromo (+) não atrai imã e o níquel – alumínio (-) é levemente magnético.

-Aplicação:

É o termopar mais utilizado na indústria em geral devido a grande faixa de atuação 1200°C.

Os termopares nobres são aqueles cujas ligas são constituídas em platina. Possuem um custo elevado devido ao preço do material nobre, baixa potência termoeletrica e uma altíssima precisão dada a grande homogeneidade e pureza dos fios.

*Tipo S

-Composição: Platina 90% - Ródio 10% (+) / Platina (-)

* Tipo R

- Composição: Platina 87% - Ródio 13% (+) / Platina (-)

- Faixa de utilização: 0 a 1600°C

- Características:

Os termopares tipo S e R são recomendados para uso em atmosferas oxidantes ou inertes no seu range de trabalho.

O uso contínuo em altas temperaturas causa excessivo crescimento de grãos, os quais podem resultar numa falha mecânica do fio de platina (quebra do fio), e também tornar os fios susceptíveis à contaminação, o que causa a redução da fem gerada.

Mudanças na calibração também são causadas pela difusão ou volatilização do ródio do elemento positivo para o fio de platina pura do elemento negativo.

Todos estes efeitos tendem a causar heterogeneidades, o que tira o sensor de sua curva característica.

Os termopares tipo S e R não devem ser usados no vácuo, em atmosferas redutoras ou atmosferas com vapores metálicos a menos que bem protegidos com tubos protetores e isoladores cerâmicos de alumina. A exceção é o uso de tubo de proteção de platina (tubete) que pode ser do mesmo material que não contamina os fios e dá a proteção necessária aos termoelementos.

Estes sensores apresentam grande precisão e estabilidade em altas temperaturas, sendo usados como sensor padrão na aferição de outros termopares.

Não deve ser utilizado em temperaturas abaixo de zero, pois sua curva fem X temperatura varia irregularmente.

A diferença entre os termopares do tipo S e R está somente na potência termoelétrica gerada. O tipo R gera um sinal aproximadamente 11% maior que o tipo S.

- Identificação da Polaridade:

Os fios positivos PtRh 10% e PtRh 13% são mais duros que o fio de platina pura (fio negativo).

- Aplicação:

Seu uso está em processos com temperaturas elevadas ou onde é exigida grande precisão como indústrias de vidro, cerâmicas, siderúrgicas entre outras.

* Tipo B

- Composição: Platina 70% - Ródio 30% (+) / Platina 94% - Ródio 6% (-)
- Faixa de utilização: 600 a 1700°C
- Características:

O termopar tipo B é recomendado para uso em atmosferas oxidantes ou inertes. É também adequado para curtos períodos de vácuo.

Não deve ser aplicado em atmosferas redutoras nem aquelas contendo vapores metálicos, requerendo tubo de proteção cerâmico como os tipo S e R.

O tipo B possui maior resistência mecânica que os tipos S e R, e sob certas condições apresenta menor crescimento de grão e menor drift de calibração que o S e R.

Sua potência termoelétrica é muitíssimo baixa, o que torna sua saída, em temperaturas de até 50°C, quase nula.

É o único termopar que não necessita de cabo compensado para sua ligação com o instrumento receptor, fazendo-se o uso de cabos de cobre comuns (até 50°C).

- Identificação de Polaridade:

O fio de platina 70% - Ródio 30% (+) é mais duro que o platina 94% - Ródio 6% (-).

- Aplicação:

Seu uso é em altas temperaturas como indústria vidreira e outras.

* Tipo N (Nicrosil / Nisil)

Níquel – cromo – silício (+) / níquel – silício (-)

Este termopar desenvolvido na Austrália tem sido aceito e aprovado mundialmente, estando inclusive normalizado pela ASTM, NIST (NBS) e ABNT.

Este novo par termoeletrico é um substituto ao termopar tipo K, apresentando um range de -200 a 1200°C, uma menor potência termoeletrica em relação ao Tipo K, porém uma maior estabilidade, menor drift x tempo, excelente resistência a corrosão e maior vida útil. Resiste também ao “green-root”.

Seu uso não é recomendado no vácuo

Apresentamos abaixo, um gráfico da variação da fem versus temperatura para os vários tipos de termopares existentes:

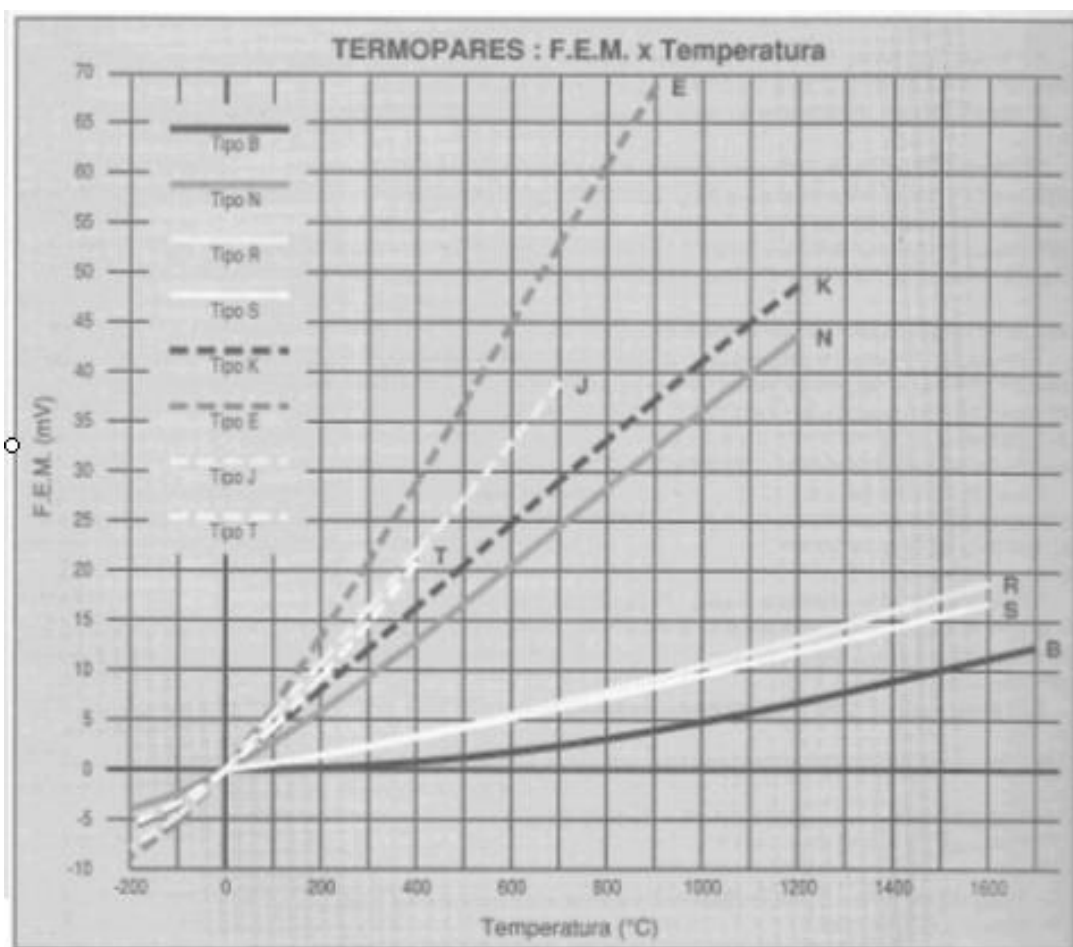


Figura 22 - Termopares: F.E.M X Temperatura

Limites de Erros dos Termopares

Entende-se por erro de um termopar, o máximo desvio que este pode apresentar em relação a um padrão, que é adotado como padrão absoluto.

Este erro pode ser expresso em graus Celsius ou em porcentagem da temperatura medida, adotar sempre o que der maior.

A tabela abaixo fornece os limites de erros dos termopares, conforme recomendação da norma ANSI MC 96.1 – 1982, segundo a IPTS-68.

Tipo de Termopar	Faixa de Temp.	Limites de Erro	
		Standard (Escolher o Maior)	Especial (Escolher o Maior)
T	0 a 350°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ou $0,4\%$
J	0 a 750°C	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$	$\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$
E	0 a 900°C	$\pm 1,7^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,5\%$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$
K	0 a 1250°C	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$	$\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$
S e R	0 a 1450°C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,25\%$	$\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,1\%$
B	800 a 1700°C	$\pm 0,5\%$	-
T	-200 a 0°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 1,5\%$	-
E	-200 a 0°C	$\pm 1,7^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 1\%$	-
K	-200 a 0°C	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$	-

Tabela 11 - Limites de Erros dos Termopares

Apesar destes limites de erros atenderem a norma IEC 584-2 de 1982 e ainda serem utilizados, apresentamos a revisão feita em junho de 1989 da IEC 584-2.

Segundo esta norma internacional IEC 584-2 de 1989, foi adotado em diversos países do globo, inclusive adotado pela ABNT tornando-se uma NBR, as seguintes tolerâncias e faixas de trabalho para os termopares, todos eles referenciados a zero graus Celsius.

Limites de erros para termopares convencionais e minerais segundo a norma IEC 584-2 (Revisão junho de 1989)

Tipos de Termopares	Classe 1 (Especial)	Classe 2 (Standard)	Classe 3 (Standard)
Tipo T			
Range	-40 a 125°C	-40 a 133°C	-67 a 40°C
Tolerância	±0,5°C	±1,0°C	±1,0°C
Range	125 a 350°C	133 a 350°C	-200 a -67°C
Tolerância	±0,4%	±0,75%	±1,5%
Tipo E			
Range	-40 a 375°C	-40 a 333°C	-167 a 40°C
Tolerância	±1,5°C	±2,5°C	±2,5°C
Range	375 a 800°C	333 a 900°C	-200 a -167°C
Tolerância	±0,4%	±0,75%	±1,5%
Tipo J			
Range	-40 a 375°C	-40 a 333°C	-
Tolerância	±1,5°C	±2,5°C	-
Range	375 a 750°C	333 a 750°C	-
Tolerância	±0,4%	±0,75%	-
Tipos K / N			
Range	-40 a 375°C	-40 a 333°C	-167 a +40°C
Tolerância	±1,5°C	±2,5°C	±2,5°C
Range	375 a 1000°C	333 a 1200°C	-200 a -167°C
Tolerância	±0,4%	±0,75%	±1,5%
Tipos S/R			
Range	0 a 1100°C	0 a 600°C	-
Tolerância	±1,0°C	±1,5°C	-
Range	110 a 1600°C	600 a 1600°C	-
Tolerância	±[1 + 0,003 (t - 1100)]°C	±0,25%	-
Tipo B			
Range	-	-	600 a 800°C
Tolerância	-	-	±4,0°C
Range	-	600 a 1700°C	800 a 1700°C
Tolerância	-	±0,25%	±0,5%

Tabela 12 - Limites de Erros para Termopares Convencionais e Minerais

UNIÃO DA JUNÇÃO DE MEDIÇÃO

A junção de medição (junta quente) de um termopar pode ser obtida por qualquer método que dê a solidez necessária e um bom contato elétrico entre os dois fios, sem contudo alterar as características termoelétricas dos mesmos, podendo estes serem torcidos ao redor do outro antes da solda (junção torcida) ou simplesmente serem encostados um no outro para ser soldado depois (junção de topo).

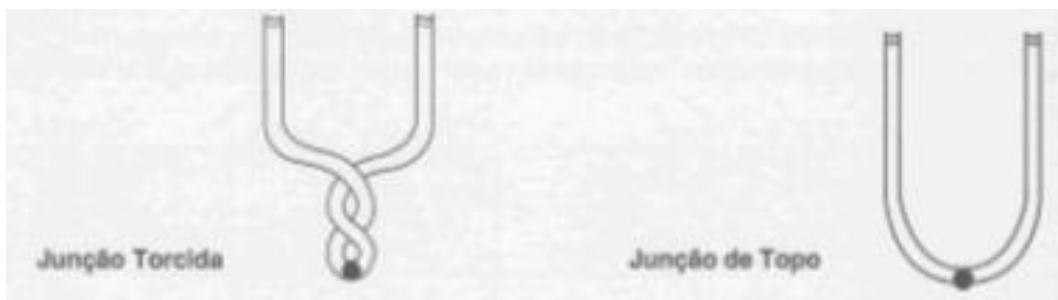


Figura 23 - Junções de Termopares

Para os termopares de base metálica como os tipo E, T, J e K, deve-se inicialmente lixar as pontas dos fios antes da solda. Já para os termopares nobres, não há necessidade de se preparar a superfície, entretanto deve-se tomar muito cuidado na manipulação dos fios, evitando a contaminação por óleo, suor ou poeira.

Entre as diferentes maneiras de se realizar um bom contato elétrico na junção de medição do termopar, a solda é a mais utilizada, porque assegura uma ligação perfeita dos fios por fusão dos metais do termopar.

Com exceção da solda prata, não é colocado nenhum outro material metálico para se realizar a solda, tendo somente a fusão dos metais. O único inconveniente da soldagem é, se a chama do maçarico não estiver bem regulada, pode contaminar os criando heterogeneidades; o que pode tirar o termopar da sua curva de calibração.

Lembrar que numa solda feita a maçarico oxi-acetileno, se a porcentagem de oxigênio for muito pequena, tem-se uma chama com características redutoras, o que é prejudicial aos termopares do tipo E, K, S, R e B. O ajuste do tipo de chama adequado é muitas vezes dado pela coloração da chama.

Além do maçarico, pode-se usar solda TIG, resistência (caldeamento) ou arco plasma.

APÊNDICE C

Aparelho de Condutividade Térmica

Manual de Instruções

Obrigação do Fabricante

U.K. STATUTE CHAP: 37 - HEALTH AND SAFETY AT WORK ETC.

A G. Cussons LTD. Por este meio chama a atenção de todos os usuários de nosso equipamento para as cláusulas deste estatuto ou cláusulas similares relacionadas à sua instalação e uso nos territórios ultramarino.

O estatuto U.K. se aplica ao equipamento instalado em laboratórios de ensino.

Pelo estatuto U.K. os fabricantes do equipamento não são responsáveis pela conseqüências do uso deste, ao menos que o uso esteja estritamente de acordo com as suas instruções de operação.

Segue-se que qualquer modificação para o equipamento significará a aplicação desta cláusula, ao menos que tal modificação seja especificamente aprovada por escrito, com antecedência pela empresa.

Nosso equipamento é construído para altos padrões de segurança, e uma contínua atenção será dada a isto.

Precisando de qualquer conselho sobre aspectos de segurança sobre o uso do nosso equipamento estaremos, com certeza, satisfeitos em fornecê-la.

Índice

ADVERTÊNCIAS E PRECAUÇÕES

LISTA DE ABREVIACÕES

LISTA DE DADOS

1. DESCRIÇÃO
2. INSTRUÇÕES DE OPERAÇÃO
3. INSTALAÇÃO E CONDIÇÕES DE USO
 - 3.1 Recibo
 - 3.2 Instalação
 - 3.3 Condições de uso
4. MANUTENÇÃO
5. EXEMPLO DE RESULTADOS E CÁLCULOS
 - 5.1 Exemplos de Resultados
 - 5.2 Cálculos
6. LISTA DE PARTES SOBRESSALENTE

ADVERTÊNCIAS E PRECAUÇÕES

VOLTAGEM ELÉTRICA ACIMA DE 30 VOLTS PODE SER FATAL.
NÃO OPERE O SISTEMA COM QUALQUER PROTEÇÃO REMOVIDA.

TOME CUIDADO AO REMOVER A VASILHA DEWAR NO TOPO DO APARELHO, DENTRO DA VASILHA A TEMPERATURA PODE ESTAR ACIMA DE 200°C.

FOLHA DE DADOS

Aparelho de Condutividade Térmica

Tipo

Dimensões

Altura 750 mm (30 In)

Largura 500 mm (20 In)

Profundidade 250 mm (10 In)

Massa 26 Kg (57 lb.)

Potência requerida 240 V, 50/60 Hz

1 fase, 2 amp

Espécimes

Tipos Cobre, Alumínio, Aço Moderado, Aço Inoxidável.

Área da seção transversal $4.9 \times 10^{-4} m^2$

Comprimento (cobre e alumínio) 64 mm

Comprimento (aço inoxidável e aço moderado) 38 mm

Medição de temperatura

Mercúrio em vidro 5°C – 50°C X 0.2°C

Termopares NiCr/NiAl

DESCRIÇÃO

Este aparelho foi projetado para determinar o Coeficiente de Condutividade Térmica para um bom condutor. O aparelho consiste de um conjunto de espécimes empilhados com uma fonte elétrica de calor, base de calorímetro, invólucro criado pela vasilha Dewar para assegurar uma perda desprezível de calor e um tanque de suprimento de água de resfriamento a uma taxa constante de transferência de calor. Vários pontos de conexão de termopares são montados na base do gabinete de aço e dois termômetros de mercúrio e vidro são dispostos para as leituras de temperatura da entrada e saída da água. Quatro termopares NiCr/NiAl são ajustados e conexões são providenciadas para um potenciômetro adequado de forma a fornecer uma leitura de temperatura precisa. Quatro amostras de metal são fornecidas; duas maiores, de cobre e alumínio, e duas menores, de aço moderado e aço inoxidável. As faces destas amostras são cuidadosamente preparadas por meio de um brunimento ou esmerilhamento e não podem de forma alguma serem danificadas. Dois furos são feitos em cada amostra para inserção de termopares.

Os valores aproximados do livro texto para a condutividade térmica das amostradas apresentadas são:

Alumínio	209 W/mK
Cobre	386 W/mK
Aço Moderado	41,8 W/mK
Aço Inoxidável	15,0 W/mK

Contudo os valores reais das amostras irão variar devido ao efeito da variação na composição do material. Embora a condutividade térmica é cotada em unidades S.I. ou W/mK os termopares usados neste aparelho marcam em graus Celsius. As unidades do intervalo de temperatura de Kelvin e Celsius são iguais.

INSTRUÇÕES DE OPERAÇÃO

- 1 O aparelho é montado com uma pequena amostra (aço moderado ou aço inoxidável i. e. material de baixa condutividade) em posição mais baixa e uma amostra longa (cobre ou alumínio i. e. material de alta condutividade) em posição superior. Depois de selecionar as amostras para serem usadas nos testes, assegurar que estejam completamente livres de sujeira, especialmente nas extremidades onde o contato irá ser feito. Untar levemente com graxa de silicone nas extremidades das amostras antes de montagem para assegurar um bom contato térmico.
- 2 Operar o pregador (pinça) movendo a alavanca saliente posicionada na parte frontal do aparelho para a posição de baixo e colocar as amostras entre o elemento quente e o pregador. Assegurar que os furos para os termopares são acessíveis. Desprender a alavanca, de modo a prender as amostra na posição. Inserir os termopares nos furos feitos.
- 3 Assegurar que o controle de ajuste do termostato que se situa na frente do elemento quente está virado completamente à direita. Isto fixa a temperatura de corte em aproximadamente 210°C. A temperatura normal máxima de trabalho é de 200°C.
- 4 Colocar a Vasilha de Dewar na posição, ou seja, sobre as amostras.
- 5 Ajustar os termômetros nas conexões especiais à prova de vazamento fornecidos em cima da base do calorímetro.
- 6 A) Conectar tubos de água da rede para o tanque, do tanque para a entrada do aparelho, excesso de água do tanque para o dreno e a saída do aparelho para o dreno.
B) Abrir a água da rede. Ajustar a vazão através do aparelho por meio da válvula de fluxo de saída posicionada na saída do tubo da unidade (não é o tubo da água de enchente). A presente vazão não é crítica, mas a diferença de temperatura de 8°C deve ser buscada. Se a vazão é irregular e há um acúmulo proporcional de água no tanque, o ar pode ficar preso na entrada do tubo do tanque para a unidade. Este ar deve ser retirado do tubo retirando a extremidade do tubo (que conecta o tanque à unidade) da unidade e forçando a saída do ar da entrada do tubo.

- 7 Conectar o potenciômetro aos dois terminais dispostos na parte frontal do aparelho.
- 8 Conectar a caixa de controle no encaixe no lado direito do aparelho de condutividade e conectar a caixa de controle a uma fase AC (corrente alternada) preferencialmente. Verificar se a voltagem está correta.
- 9 Ligar e checar se ambos os indicadores luminosos na caixa de controle e na base do calorímetro estão acesos.
- 10 Antes de fazer as leituras do aparelho o fluxo de controle deve atingir uma condição de regime permanente. Isto pode ser feito de duas maneiras como se segue:
 - a) Fixar a entrada de corrente no máximo, cerca de 0.55 A. Mantenha este valor até a temperatura de 200°C ser obtida do termopar mais perto do elemento (T1). Isto levará de 15 a 20 min. Reduza a corrente para .03 A até a temperatura se tornar estável, isto levará de 20 a 25 min.
 - b) Fixar a temperatura para 0.3 A. Deixe por um período de 2 horas.

Nota: Em ambos os métodos a água deve fluir continuamente.

- 11 Quando a condição de regime permanente for atingida as leituras podem ser feitas. As leituras procedentes devem ser tomadas e registradas em intervalos de 150 seg. Durante um período de 10 min.

W1 = temperatura de entrada d'água

W2 = temperatura de saída d'água

T1 = Temperatura do termopar (extremidade quente) | Amostras

T2 = Temperatura do termopar (extremidade fria) | pequenas

T3 = Temperatura do termopar (extremidade quente) | Amostras

T4 = Temperatura do termopar (extremidade fria) | longas

- 12 A partir destes resultados podem ser determinados a condutividade térmica das amostras e o fluxo de calor através das amostras.

13 Para determinar a condutividade térmica de cada amostra ou material use a seguinte fórmula:

$$K = \frac{J \times M \times L \times (T_2 - T_1)}{A \times t \times (T_4 - T_3)} W / mK$$

Onde

K = condutividade térmica

J = equivalente mecânico do calor (4186 Joules/ Kcal)

M = massa de água (Kg)

W_1 = temperatura de entrada da água (°C)

W_2 = temperatura de saída de água (°C)

A = área da amostra (m^2)

t = tempo de fluxo de M Kg de água (segundo)

T_3 = temperatura do termopar (extremidade quente ; °C)

T_4 = temperatura do termopar (extremidade fria ; °C)

L = distância entre os termopares (°C)

MANUTENÇÃO

Pouca manutenção se necessita, exceto para uma limpeza ocasional ou inspeção visual. Pontos para se olhar nas inspeções visuais são sinais de danos ou corrosão nas amostras e sinais de danos ou queimaduras no tubo de borracha do tubo para o tanque. Se os sinais de queimaduras são notificados, o tubo de borracha deve ser trocado. A amostra para testes de aço moderado é toda revestida de prata para prevenir corrosão e deve ser mantido limpo com o mínimo uso de abrasivos. O aparelho deve ser mantido longe de áreas onde há presença de combinações de enxofre.

LISTA DE PEÇAS SOBRESSALENTE

- 1 Elemento aquecedor
- 4 Termopares
- 3 Metros de tubo de borracha de 3/16''
- 1 Plug principal e encaixe
- 1 Vasilha Dewar
- 1 Termostato
- 10 Fusíveis de 1^a
- 1 Cabo de fusível
- 1 Mini indicador – Amber
- 1 Interruptor
- 6 Termômetros 12'' – 5 à 50°C x 0,2°C
- 1 Suporte de terminal isolado e plug, vermelho
- 1 Suporte de terminal isolado e plug, preto
- 1 Metro de bisel e vidro
- 1 Interruptores de posição rotativo
- 2 Pacotes de 'O' ring para termômetros
- 2 Braçadeiras, tipo bico de Bunsen
- 1 Chumaço isolante

APÊNDICE D

Noções sobre Erros

ERROS E DESVIOS

Para introduzir a noção de **erros e desvios** e entender as diferenças entre estes dois conceitos, estudemos os exemplos a seguir.

Exemplo 1: Sabemos da geometria euclidiana que a soma dos ângulos internos de um triângulo vale 180° . Suponha que, numa determinada situação experimental, os ângulos internos de um triângulo são medidos para se obter sua soma. O procedimento é repetido 5 vezes e os valores encontrados estão tabelados abaixo:

S = soma dos ângulos	Valor obtido – Valor Real
179,8	-0,2
180,4	0,4
180,0	0,0
180,6	0,6
179,7	-0,3

Exemplo 2: Em condições normais de pressão mediu-se a temperatura da água em ebulição e obteve-se o valor $98,2^\circ\text{C}$.

A diferença entre o valor obtido e o valor considerado verdadeiro dessa grandeza é $-1,8^\circ\text{C}$.

Exemplo 3: O valor da velocidade da luz no vácuo, por definição, é $299.792.458$ m/s. Mediu-se a velocidade da luz no vácuo e encontrou-se $2,99800 \cdot 10^8$ m/s. O valor real da grandeza é conhecido?

Exemplo 4: Mediu-se com uma régua a aresta de um cubo e obteve-se o valor de 1,23 cm. Neste caso, é conhecido o valor real dessa grandeza?

Exemplo 5: Ao se determinar a massa de uma substância, obteve-se o valor de 450,6g. É este o verdadeiro valor dessa grandeza?

Como mostram os exemplos anteriores, algumas grandezas possuem seus valores reais conhecidos e outras não.

Quando conhecemos o valor real de uma grandeza e experimentalmente encontramos um resultado diferente, dizemos que o valor obtido está afetado de um **erro**.

ERRO é a diferença entre um valor obtido ao se medir uma grandeza e o seu valor real ou correto. Matematicamente:

$$\mathbf{ERRO = VALOR MEDIDO - VALOR REAL}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INCROPERA, Frank P./ WITT, David P.de. LTC Editora S.A. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 1992.
- [2] IOPE – INSTRUMENTOS DE PRECISÃO LTDA. **Uso e Aplicação de Termosensores**. São Paulo, 2001.
- [3] G. CUSSONS LTDA. **Manual de Instruções do Aparelho de Condutividade Térmica P5687**. Inglaterra, 1974.
- [4] BRUM, Nisio / COTTA, Renato. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. **Experiência de Isolamento Térmico**. Rio de Janeiro, 1988.
- [5] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. **Apostila de Física Experimental I / Laboratório de Física**. Vitória, 2003.
- [6] CABRAL, Paulo. INSTITUTO ELECTROTÉCNICO PORTUGUÊS. **Breve História da Medição de Temperaturas**. Portugal, 1992.
- [7] OZISIC, M. Necati. EDITORA GUANABARA. **Transferência de Calor – Um Texto Básico**. Rio de Janeiro, 1990.