

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

20221

TRABALHO DE FORMATURA

DISPOSITIVO DIDÁTICO PARA O ESTUDO DA CONDUÇÃO DE CALOR

Aluno: FERNANDO STANCATO

Orientador: JOSÉ ROBERTO SIMÕES MOREIRA

1988

Àos meus pais

AGRADECIMENTOS

Ao mestre José Roberto Simões Moreira, pela orientação e amizade;

Aos técnicos Oswaldo e Wilson pela ajuda na montagem experimental;

À Indústria Irmãos Stancato pela construção dos experimentos;

Ao Luiz Mário, pela paciência e dedicação em transformar garranchos em algo legível;

A todos que direta ou indiretamente ajudaram a que este trabalho fosse possível,

os meus sinceros agradecimentos.

ÍNDICE

Apresentação	1
Objetivo	3
Sequência e Divisão do Trabalho	4
1-INTRODUÇÃO TEÓRICA	5
1.1 Lei de Fourier	5
Condutividade Térmica	10
1.2 Sistema com Condução e Convecção	10
2-MONTAGEM EXPERIMENTAL	15
2.1 Geral	15
2.1.1 Descrição e funcionamento	16
2.2 Montagem Experimental e Projeto do Dispositivo 1	20
2.2.1 Descrição e Funcionamento	20
2.2.2 Projeto	27
2.2.3 Construção	28
2.3 Montagem Experimental e Projeto do Dispositivo 2	38
2.3.1 Descrição e Funcionamento	38
2.3.2 Projeto	40
2.3.3 Construção	40

2.4 Montagem Experimental e Projeto do Dispositivo 3	45
2.4.1 Descrição e Funcionamento	45
2.4.2 Projeto e Construção	47
3-EXPERIÊNCIAS	51
3.1 Experiência Número 1	51
3.1.1 Objetivo	51
3.1.2 Procedimento	51
3.1.3 Apresentação dos Resultados	51
3.1.4 Análise dos Dados	52
3.1.5 Erros	53
3.1.6 Conclusão	53
3.1.7 Possíveis Melhorias	53
3.2 Experiência Número 2	55
3.2.1 Objetivo	55
3.2.2 Procedimento	55
3.2.3 Apresentação dos Resultados	56
3.2.4 Análise dos Dados	56
3.2.5 Erros	57
3.2.6 Conclusão	57
3.2.7 Possíveis Melhorias	56

3.3 Experiência Número 3	55
3.3.1 Objetivo	56
3.3.2 Procedimento	56
3.3.3 Apresentação dos Resultados e Análise	58
3.3.4 Erros	59
3.3.5 Conclusão e Possíveis Melhorias	60

APRESENTAÇÃO:

Foi escolhido como tema de projeto de formatura a construção de dispositivos didáticos para o estudo da condução de calor entre outras razões:

A falta deste tipo de equipamento no Mercado Brasileiro: embora encontremos firmas estrangeiras como a Tec Equipment e a Didacta que produziam equipamentos similares aos que queríamos fazer, aqui não encontramos firmas que os produzissem. Tivemos notícia de uma firma em São Carlos que produzia e vendia equipamentos na área de Transmissão de Calor e Massa e Mecânica dos Fluidos mas que fechou por volta de 1983.

A ausência de um laboratório de Transferência de Calor no Departamento de Engenharia Mecânica: por termos tão poucas experiências nas áreas de Transferência de Calor e Massa e de Termodinâmica, e por serem estas áreas de uma dificuldade teórica grande, resolvemos construir dispositivos que ajudassem a compreensão e visualização dos fenômenos de condução. É sabido que, didática e filosoficamente falando, os conceitos teóricos são muito mais facilmente entendidos se houve antes um contato com o fenômeno a ser estudado.

O contato com problemas na área experimental: é sabido que a Escola Politécnica procura dar uma formação mais voltada para um profundo domínio e compreensão dos conceitos fundamentais de cada área. Embora esta postura seja decisiva para um posterior desenvolvimento profissional e para uma compreensão rápida dos problemas experimentais, partimos para um trabalho experimental com o objetivo de complementar esta formação teórica. O contato com problemas em medições de temperatura (termopares) daria uma base para outros tipos de medições, pois hoje em dia, com o desenvolvimento e a evolução da eletrônica, quase todas as grandezas físicas como força, temperatura, pressão, deslocamentos,

velocidades, acelerações são medidos através de transdutores, que transformam estas grandezas em sinais elétricos. O contato com um destes transdutores (termopares) auxiliaria a compreensão e tratamento de problemas aos outros tipos de transdutores (isolamento elétrico, ruídos nos sinais, mal contato elétrico no momento das medições, etc.). Foram encontrados problemas, como construção de termopares, fixação destes nas barras e canos, temperaturas de referência estáveis, leitura com multímetro e transformações da leitura da temperatura de Volts para Graus Centígrados. Isto serviu como uma boa experiência na área de medições.

Contato com problemas de projeto de dispositivos: a construção de Dispositivos Didáticos, mesmo os mais simples como os nossos, envolvem problemas de projeto desde a concepção do equipamento, lay-out, até conceitos de ergonomia para o conforto de quem vai utilizar o equipamento, sistemas de proteção para o usuário e para o equipamento e disposição didática dos diversos aparelhos de bancada.

Contato com problemas de construção e montagem: problemas como soldar aço e cobre, achar no mercado canos de aço e cobre com o mesmo diâmetro interno e externo, bitolas de tarugos de aço e cobre compatíveis, resistências industriais de baixa potência, potenciômetros, esquemas de ligações elétricas, métodos de resfriamento, etc., foram encontrados e solucionados, dando uma boa experiência neste campo.

Enfim, esperamos que este trabalho auxilie o ensino dos fenômenos de condução e sirva como base para futuros trabalhos.

OBJETIVO:

O propósito deste trabalho foi a construção de um conjunto de dispositivos para a investigação experimental do fenômeno da condução de calor, com finalidade didática.

Os dispositivos, três ao total, permitem estudar os seguintes casos:

(1) Verificação da Lei de Condução de Calor de Fourier em regime permanente e unidimensional.

Esta experiência consiste em submeter a extremidade de uma barra metálica, bem isolada termicamente, a um fluxo de calor constante e conhecido (medido); a outra extremidade é mantida a uma temperatura constante. Termopares dispostos ao longo da barra de ensaio indicam a distribuição de temperaturas axial.

(2) Medição de condutibilidade térmica de metais pelo método da comparação.

Esta segunda experiência é semelhante à primeira, sendo que a diferença está em que a barra da experiência anterior é substituída por duas outras barras, unidas axialmente e isoladas termicamente. Conhecida a condutibilidade térmica de uma das barras (padrão), este arranjo permite determinar a condutibilidade térmica da outra barra (ensaio).

(3) Estudo de superfícies extendidas (aletas).

O objetivo desta última experiência é comparar a distribuição de temperaturas experimental com a teórica em uma barra aquecida em uma extremidade com perda de calor por convecção natural ao longo de todo o seu comprimento.

DESENVOLVIMENTO E DIVISÃO DO TRABALHO:

Após o exposto, o trabalho segue com as seguintes partes:

I-Introdução Teórica

Apresentamos as soluções da Lei da Condução de Calor de Fourier em regime permanente com área da seção transversal à direção do fluxo e condutibilidade térmica constante, e a solução para a equação de distribuição de temperatura em uma aleta de área transversal à direção do fluxo constante, condutibilidade térmica uniforme ao longo da barra, com diversas condições de contorno.

Referências Experimentais e Projeto

Comentamos como foi o projeto, a construção das diversas partes e montagem dos três aparelhos. Comentamos também como será a montagem geral.

II-Experimentos

Comentamos os objetivos, procedimentos, dados e resultados, erros e conclusão para os três experimentos.

1 INTRODUÇÃO TEÓRICA:

1.1 Lei de Fourier:

Foi o Cientista francês J. J. Fourier quem, em meados de 1800, fez a primeira investida no sentido de dar à condução de calor uma abordagem matemática, isto é, traduzi-la em fórmulas e equações que viessem a permitir cálculos e projetos com crescente precisão e segurança, substituindo o empirismo até então empregado.

Para isto Fourier utilizou-se do seguinte experimento: submeteu um material de seção reta a uma diferença de temperatura entre as duas faces, conforme a figura 2.1. Isolando as outras paredes, ele criou um fluxo de calor unidimensional de direção perpendicular às seções de áreas constantes.

Para toda situação em que tivermos fluxo de calor atravessando seções de área constante, teremos uma "parede plana".

Com estas experiências, Fourier demonstrou que o fluxo de calor era proporcional à área A da seção transversal, à diferença entre as temperaturas T_1 e T_2 e à distância x que separava as duas faces, conforme a figura 2.1. Portanto, Fourier achou uma proporcionalidade:

$$q \propto A \cdot \frac{T_1 - T_2}{x} \quad (1.1-1)$$

Fourier verificou também que mantendo-se todos estes parâmetros fixos e variando-se o material, o fluxo de calor variava. Portanto, ele resolveu matematizar a equação 1.1-1 introduzindo uma constante de proporcionalidade dependente do material, representada por K . A esta constante deu o nome de coeficiente de condutibilidade térmica do material.

A equação ficou com a seguinte notação:

$$q = \frac{K \cdot A}{x} (T_1 - T_2) \quad (1.1-2)$$

Posteriormente a equação tomou forma diferencial para ganhar um caráter mais geral. A diferença de temperatura dividida por uma

distância X tornou-se um gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor, e a equação ganhou um sinal negativo devido à segunda lei da termodinâmica, que diz que o calor é sempre transferido no sentido da temperatura decrescente, conforme a figura 2.2 .

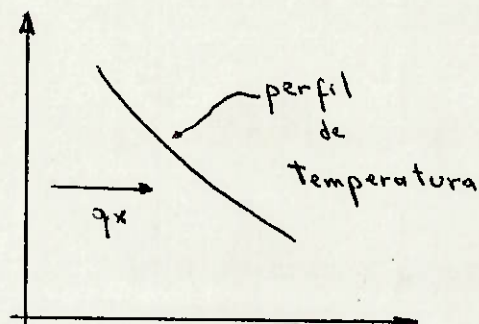


fig. 2.2

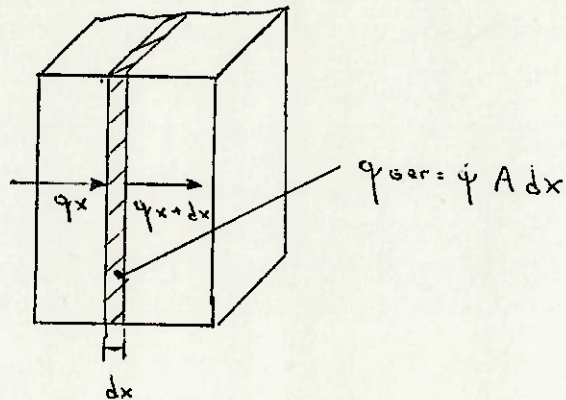
A equação fica então:

$$q = - K.A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.1-3)$$

onde $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ é o gradiente de temperatura na direção do fluxo.

Da equação de Fourier é possível deduzir a equação de condução geral tridimensional, que além de considerar a condução nas três direções leva em conta a geração de calor e a variação de energia interna.

Consideremos este caso para um elemento de espessura dx e façamos para ele o seguinte balanço térmico:



Onde:

• q_x = energia conduzida para dentro da face esquerda =

$$- K \cdot A \frac{\partial T}{\partial x}$$

• q_{ger} = calor gerado no interior do elemento =

$$\dot{q} \cdot A \cdot dx$$

• variação da energia interna =

$$\rho \cdot c \cdot A \frac{\partial T}{\partial t} dx$$

• q_{x+dx} = energia conduzida para fora pela face direita =

$$- K \cdot A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx} = - A \left[K \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$$

sendo

- \dot{q} = energia gerada por unidade de volume
- c = calor específico do material
- ρ = densidade

Combinando os quatro termos, temos uma equação de balanço:

$$q_x + q_{gen} = \rho \cdot c \cdot \dot{V} \frac{\partial T}{\partial t} + q_{out} + q_{cond}$$

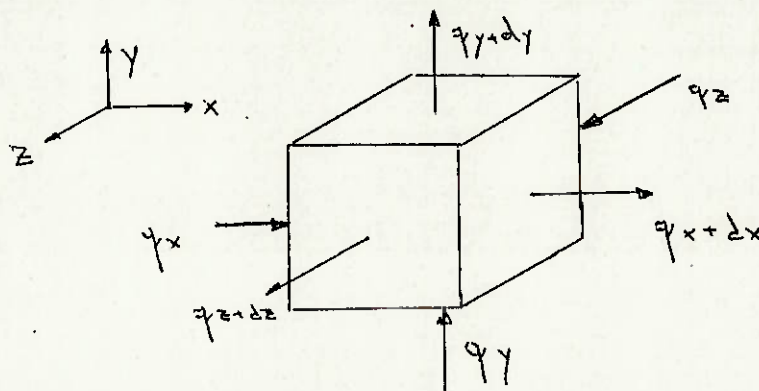
$$-K \cdot \dot{V} \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q} \cdot \dot{V} = \rho \cdot c \cdot \dot{V} \frac{\partial T}{\partial t} + K \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) \cdot \dot{V}$$

ou

$$\frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) + \dot{q} = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.1-4)$$

Esta é a equação de condução de calor unidimensional. Para obter a equação de condução de calor tridimensional é necessário fazer o mesmo balanço, com os mesmos termos usados mas considerando também os fluxos de calor nas outras duas direções, y e z.

Fazendo o equilíbrio de fluxos de calor em um elemento de volume dx, dy, dz , temos:



O balanço de energia nos conduz a

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE}{dt}$$

sendo as quantidades de energia dados por

$$q_x = -K \cdot dy \cdot dz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x,x} = - \left[K \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial I}{\partial x}) \right] dx \int dy \int dz$$

$$q_y = - K \cdot dx \cdot dz \frac{\partial I}{\partial y}$$

$$q_{y,y} = - \left[K \frac{\partial I}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial I}{\partial y}) \right] dy \int dx \int dz$$

$$q_z = - K \cdot dx \cdot dy \frac{\partial I}{\partial z}$$

$$q_{z,z} = - \left[K \frac{\partial I}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (K \frac{\partial I}{\partial z}) \right] dz \int dx \int dy$$

$$q_{div} = q_x + q_y + q_z$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \rho \cdot c \cdot dx \cdot dy \cdot dz \frac{\partial I}{\partial t}$$

ficando assim a equação:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial I}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial I}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K \frac{\partial I}{\partial z}) + \dot{q} = \rho \cdot c \frac{\partial I}{\partial t} \quad (1.1-5)$$

sendo K constante.

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{K} = \rho \cdot c \frac{\partial I}{\partial t} \quad (1.1-6)$$

Esta equação pode ser encontrada em diversas outras coordenadas:

Coordenadas Cilíndricas

$$\frac{\partial^2 I}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial I}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 I}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial I}{\partial t} \quad (1.1-7)$$

sendo $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot c}$

Coordenadas Esféricas

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial I}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin^2 \theta \frac{\partial I}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 I}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial I}{\partial t} \quad (1.1-8)$$

Condutividade Térmica

A unidade de condutividade térmica, como se pode deduzir da fórmula 2.2, pode ser Watts por metro por grau Celsius, e indica a resistência ao fluxo de calor em um dado material. Em geral, os bons condutores elétricos são bons condutores de calor (cobre, alumínio, prata), e os isolantes elétricos são bons isolantes térmicos também. Isto se deve basicamente a dois mecanismos: a vibração da grade e transporte de elétrons livres. Os elétrons livres, do mesmo modo que transportam energia elétrica, podem transmitir energia térmica, e a outra forma de transporte pode se dar pela vibração da estrutura cristalina. Este último modo, entretanto, não é tão eficiente como o transporte por elétrons citado acima. Para todos os materiais a condutividade térmica depende da temperatura, conforme mostra a figura 1.1-a

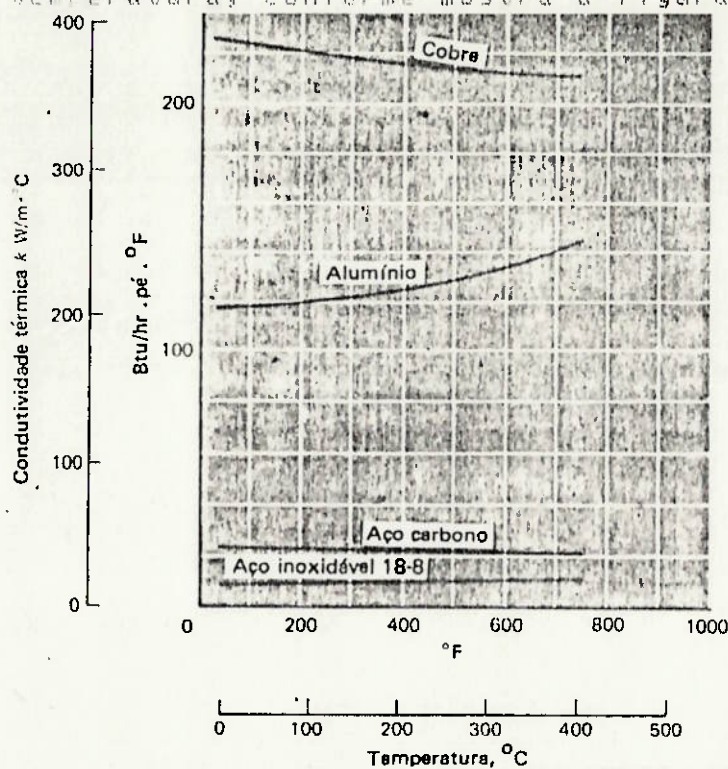


fig. 1.1-a

1.2 - Sistemas com Condução e Convecção

O calor conduzido através de um corpo deve ser frequentemente removido (ou fornecido) por algum processo de convecção.

Assim, o calor é perdido por um duplo processo: condução e convecção. Um forno perde calor por condução através de suas paredes, e por convecção pelo lado de fora: um resistor, ao ser

exposto ao ar, dissipa calor pelo mesmo mecanismo.

Sabe-se que a perda de calor é regida pela seguinte lei geral de perda de calor de Newton:

$$q = h.A (T_s - T_f) \quad (1.2-1)$$

onde

q = calor perdido ou ganho por convecção

h = coeficiente de transferência de calor por convecção

A = área exposta ao fluido

T_s = temperatura da superfície

T_f = temperatura do fluido ao longe

Para se aumentar a troca de calor por convecção pode-se:

- . aumentar o h
- . aumentar a diferença $(T_s - T_f)$
- . aumentar a área

Entretanto, para as duas primeiras alternativas há dificuldades:

. aumentar o h significa geralmente aumentar a velocidade do fluido que passa junto à superfície e isto custa dinheiro, pois não pode ser feito sem utilizar bombas e ventiladores mais potentes, com maior consumo de energia.

. o aumento de T_s (temperatura de superfície) geralmente é inviável, pois a troca de calor por condução costuma ter como objetivo abaixar a temperatura ou mantê-la abaixo de uma determinada faixa.

. o fluido que vai ser resfriado ou aquecido geralmente tem sua temperatura fixa, pois aquecê-lo ou resfriá-lo antes da convecção envolve também custos com consumo de energia.

A última solução - o aumento de área - é a mais utilizada. Embora envolva um custo de fabricação adicional, é a solução mais adotada.

Para isto são utilizados elementos, superfícies estendidas, mais conhecidas como aletas, que podem ter as formas mais variadas:

(a) aleta longitudinal de perfil retangular; (b) tubo cilíndrico equipado com aletas de perfil retangular; (c) aleta longitudinal de perfil trapezoidal; (d) aleta longitudinal de perfil parabólico; (e) tubo cilíndrico equipado com aleta radial de perfil retangular; (f) tubo cilíndrico equipado com aleta radial de perfil cônico truncado; (g) pino cilíndrico; (h) pino cônico truncado; (i) pino parabólico

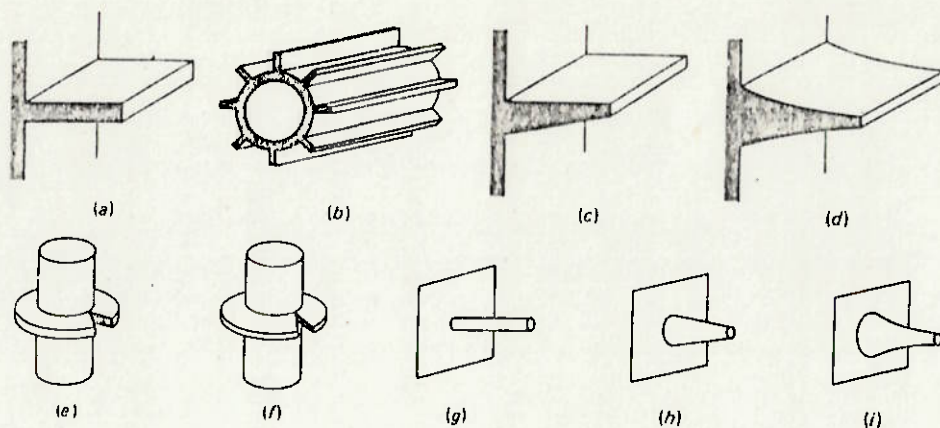


fig. 1.2 a

Nelas dá-se um processo de condução e convecção. À medida em que o calor é conduzido axialmente por convecção para o ambiente, ele vai se perdendo radialmente.

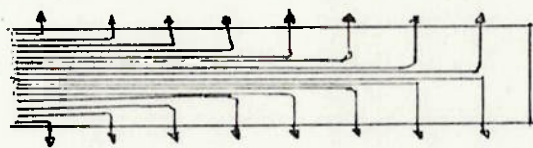


fig 1.2-c

A seguir deduziremos algumas fórmulas de distribuição de temperatura ao longo da aleta e fluxos de calor perdido ou ganho pelas aletas.

Para isto examinaremos três casos:

Caso 1 : a aleta é muito longa e a temperatura da aleta é essencialmente a mesma do fluido ambiente.

Caso 2 : a aleta tem comprimento infinito e perde calor por convecção pela extremidade.

Case 3 : a extremidade da aleta é isolada e, portanto, $dI/dx = 0$

Para isto consideremos a aleta unidimensional exposta a um fluido cuja temperatura é T como mostrado na figura 1.2-d. A temperatura na base da aleta é T_0 . Para o estudo deste problema devemos fazer um balanço de energia sobre um elemento da aleta, de espessura dx , como mostrado na figura

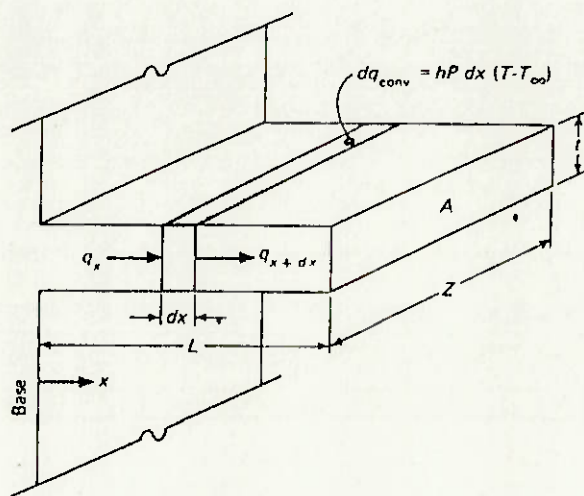


fig. 1.2-d

sendo

A : área da seção transversal da aleta

P : perímetro da aleta

L : comprimento total da aleta

T : temperatura em um ponto cuja distância da base é x

T_∞ : temperatura ao longe do fluido

e os fluxos

$$q_x = \text{energia entrando pela face esquerda} = -K.A \frac{dT}{dx}$$

$$q_{x+dx} = \text{Energia saindo pela face direita} = -K.A \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(-K.A \frac{dT}{dx} \right) dx$$

$$= -K.A \left(\frac{dT}{dx} + \frac{d^2T}{dx^2} dx \right)$$

$dq_{conv} =$ energia perdida por convecção $= h.P.dx (T-T_{\infty})$

Fazendo o equilibrio de energia para o elemento dx :

Energia entrando pela face esquerda = energia saindo pela face direita = energia perdida pela convecção

$$-K.A \frac{dT}{dx} = -K.A \left(\frac{dT}{dx} + \frac{dT}{dx^2} dx \right) + h.P dx (T-T_{\infty}) \quad (2.2-2)$$

$$0 = -K.A \frac{dT}{dx^2} dx + \frac{h.P}{K.A} dx (T-T_{\infty}) \quad (2.2-3)$$

$$0 = \frac{dT}{dx^2} - \frac{h.P}{K.A} (T-T_{\infty}) \quad (2.2-4)$$

Fazendo $\theta = T - T_{\infty}$ então a equação (1.2-4) fica

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{h.P}{K.A} \theta = 0$$

Se fizermos $m^2 = \frac{h.P}{K.A}$ a solução geral fica

$$\theta = C_1 e^{-mx} + C_2 e^{mx} \quad (1.2-5)$$

Para o caso 1 as condições de contorno são

$$\theta = \theta_0 \text{ em } x = 0$$

$$\theta = 0 \text{ em } x = \infty$$

e a solução é

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-mx} \quad (1.2-6)$$

Para o caso 2 as condições de contorno são

perda de calor convectiva pela ponta, ou seja

$$-K \frac{dT}{dx} = h (T - T_{\infty}) \text{ em } x = L$$

$$\theta = \theta_0 \text{ em } x = 0$$

e a solução é dada por

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \frac{\cosh(\bar{m}(L-x)) + \bar{h}/(K.m) \sinh(\bar{m}(L-x))}{\cosh(\bar{m}L) + \bar{h}/(K.m) \sinh(\bar{m}L)}$$

$$(1.2-7)$$

Para o caso 3 as condições de contorno são

$$\theta = \theta_0 \text{ em } x = 0$$

$$\frac{d\theta}{dx} = 0 \text{ em } x = L$$

e a solução é dada por

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{e^{-mx} + e^{m(L-x)}}{1 + e^{2mL}} = \frac{\cosh[m(L-x)]}{\cosh mL} \quad (1.2-8)$$

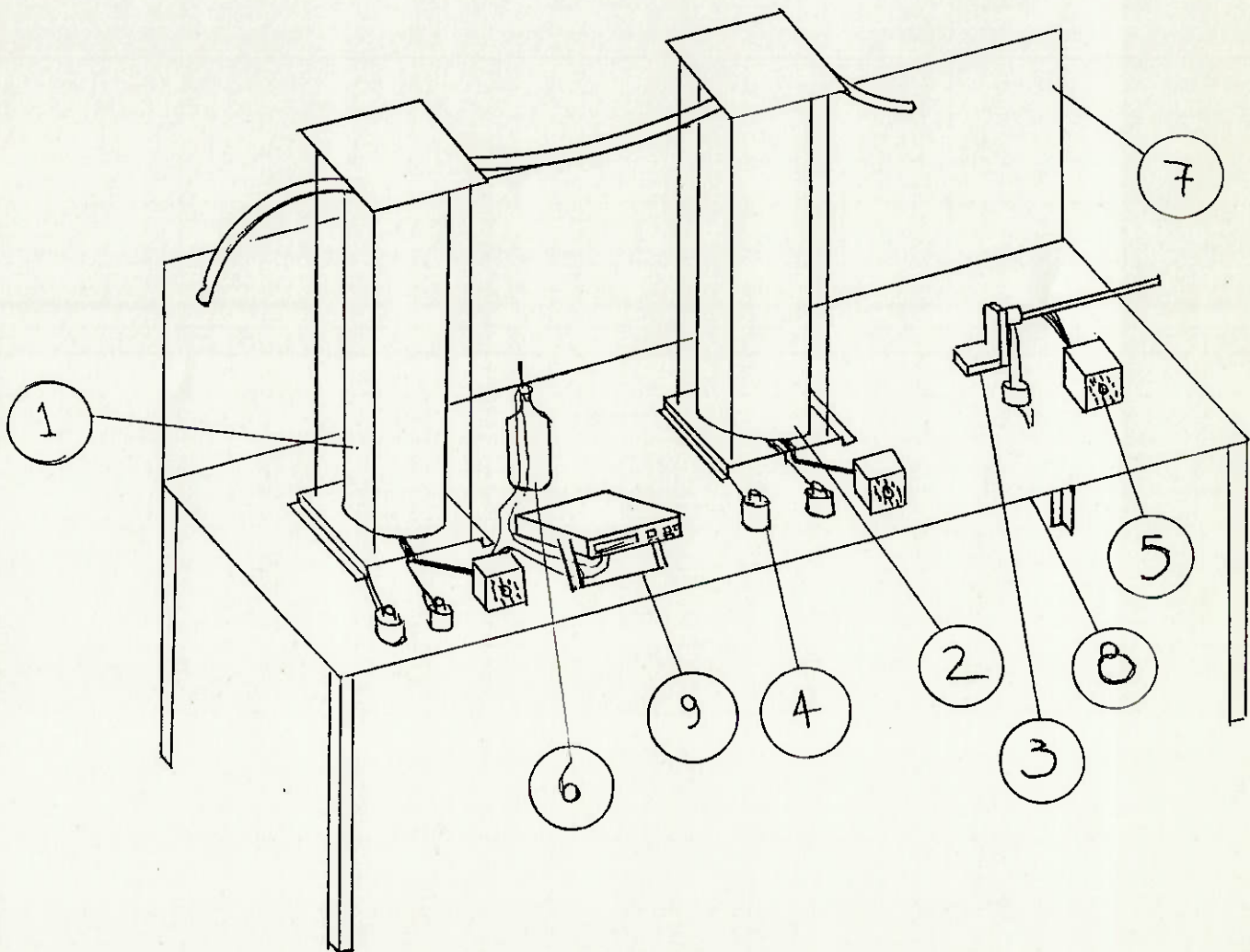
As funções hiperbólicas são definidas como

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad (1.2-9) \quad \cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (1.2-10)$$

$$\tanh x = \frac{\sinh x}{\cosh x} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (1.2-11)$$

2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

2.1 Geral



n	Itens	Quant.
1	Disp. p/ verificar a Lei de Fourier	1
2	Disp. p/ comparar condutividade	1
3	Disp. p/ estudo de aletas	1
4	Reostato	5
5	Chaves seletoras	3
6	Temperatura de Referência	1
7	Painel auto-explicativo	3
8	Bancada	1
9	Multímetro	1

Fig. 2.1-a

2.1.1 Descrição e Funcionamento

A bancada contém três experimentos:

1 - Dispositivo para verificação da Lei de Condução de Calor de Fourier em Regime Permanente e Unidimensional

2 - Medição da condutibilidade térmica dos metais pelo método da comparação

3 - Estudo de superfícies estendidas (aletas)

Os dois primeiros experimentos são bastante semelhantes, e na montagem geral apresentam a mesma configuração. Ambos têm dois resistores e uma chave seletora para 10 pontos de medição de termopares; ambos necessitam de um sistema de resfriamento, que é feito por água. Na figura 2.1.a pode-se ver que é usado um sistema de fluxo em série. Foi adotada esta configuração (e não em paralelo) por simplicidade de arranjo e porque após a água passar pelo primeiro experimento (verif. de Fourier) ela sai pouco aquecida, podendo ser usada para resfriar o segundo experimento (medição da condutibilidade por comparação).

O terceiro experimento (aletas) somente necessita de um resistor, pois é usada somente uma resistência para o aquecimento. Há também uma chave seletora, igual à dos outros dois experimentos, também com capacidade para dez pontos de temperatura.

Na figura pode-se ver uma garrafa térmica (Dewar). Esta garrafa contém água à temperatura ambiente e um termopar. Uma rolha com um furo no meio deixapassar o termopar. A garrafa serve como uma temperatura de referência para se medir as outras temperaturas, sendo que todos os três experimentos usarão esta garrafa.

No arranjo também é possível ver um multímetro: com ele serão obtidas as leituras das diferenças de potencial entre os termopares. Isto se fará colocando uma das garras do multímetro em um fio do termopar e a outra em um polo da chave que quando acionada coloca em contato com este polo um fio do mesmo tipo que o fio agarrado pelo multímetro (positivo ou negativo) no termopar de

referência.

Os reostatos serão montados de tal modo que os botões ao serem girados em sentido horário aumentarão a potência dissipada nas resistências, aumentando as temperaturas de todos os termopares. Isto vem auxiliar o aluno pois é uma convenção que o giro em sentido horário faz aumentar a variável controlada pelo botão.

Condições de Segurança

Para a segurança dos operadores com relação a choques e problemas com o toque de superfícies superaquecidas foram tomadas as seguintes precauções:

1) Como todos os aparelhos são aquecidos eletricamente com tensão 220 V, por um problema de mal contato ou de contato de fios em peças metálicas haveria a possibilidade de choque ao se tocar a estrutura dos experimentos 1 e 2. Para evitar este perigo, aterraremos todos os instrumentos e estas estruturas.

2) Nas ligações elétricas todos os fios são encapados e as junções são soldadas e isoladas. A maior parte da fiação corre embaixo da mesa.

3) Foi feito um isolamento com lâ de vidro e asbesto nas resistências e peças metálicas, de modo que é impossível o contato com as peças aquecidas.

Segurança dos Aparelhos e Instrumentação

Para proteger os experimentos e a única peça instrumental mais delicada, que é o multímetro, dos perigos acima citados, desenvolvemos as seguintes medidas de segurança:

1) Isolamento elétrico dos termopares: para evitar uma sobretensão nos terminais do multímetro, ocasionado por um curto nas partes metálicas (barras ou tubos), isolamos eletricamente os termopares, passando um pouco de "araldite" nas junções termoeletricas, conforme a figura esquemática 2.1-b:

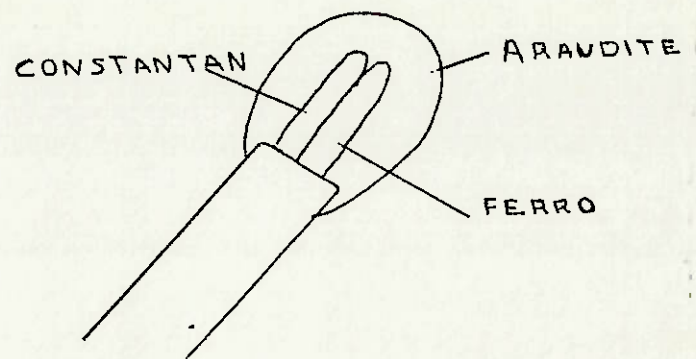


fig. 2.1-b

2) Alencramento de todos os instrumentos e experimentos. Esta medida, além de visar a segurança dos operadores, visa também a segurança do multímetro pelos mesmos problemas expostos acima.

DEIA

Os instrumentos estão apoiados e fixados através de parafusos em um tampo de mesa que foi recoberto com fórmica. Os experimentos foram colocados de modo a que sobre lugar na frente da bancada para os alunos colocarem seus cadernos ou folhas para a tomada de dados.

Os reostatos e as chaves seletoras foram colocados de modo que a operação do equipamento seja a mais ergonômica possível. Os reostatos foram colocados a uma distância de 20 cm um do outro, com os botões na horizontal, e a chave seletora a 12 cm do reostato da direita, conforme mostra a figura 2.1.c

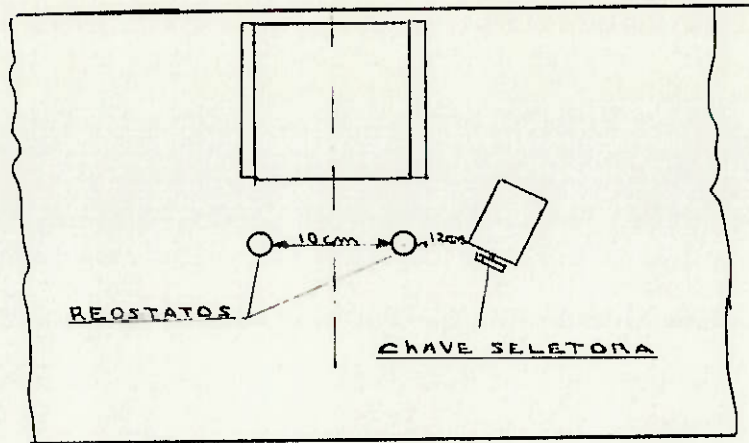


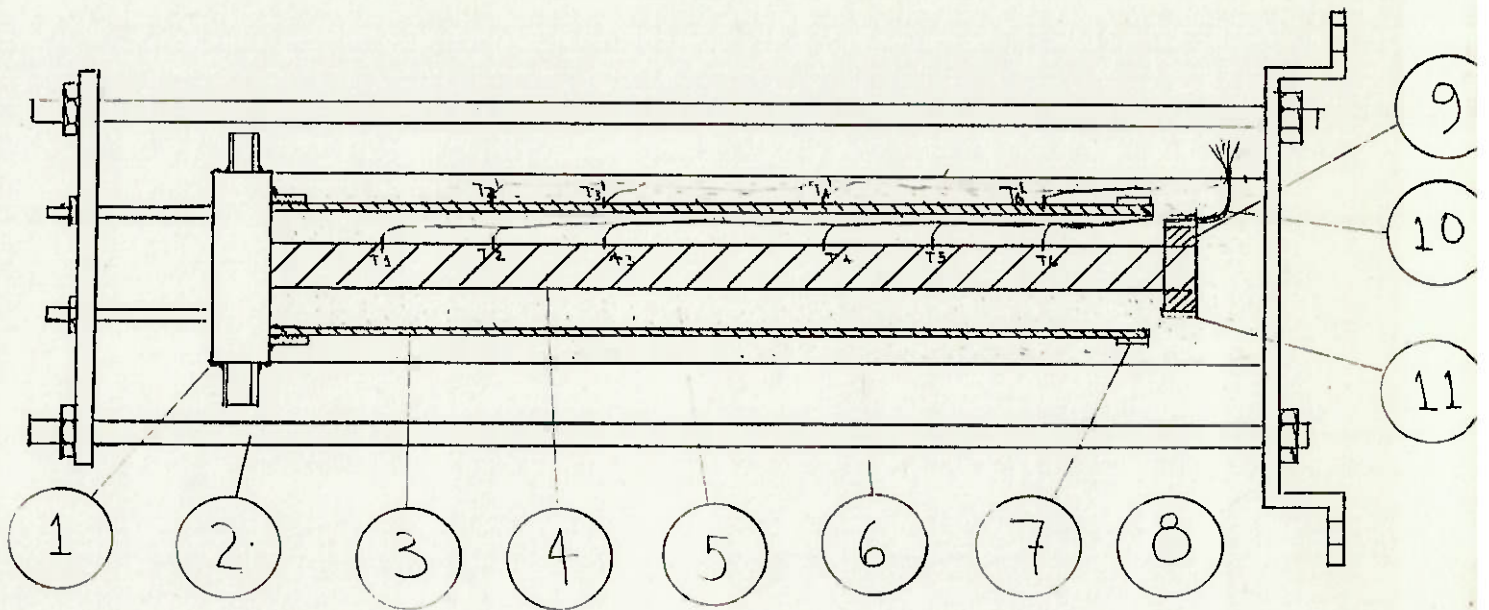
Fig. 2.1.c

A altura da mesa é tal que os operadores podem trabalhar sentados em banquetas, como em uma bancada de laboratório.

Para maior facilidade dos alunos em compreender as experiências, e entender como elas funcionam, foi feito um mural de acrílico onde os alunos podem ver em corte como são os experimentos internamente, vendo onde estão os termopares, resistências, resfriadores, etc.

2.2 Montagem Experimental e Projeto do Dispositivo 1

2.2.1 Descrição e Funcionamento



QUANT.	DESCR.
1	Resfriador
4	Tirantes - \varnothing 6mm x 850mm
1	Tubo de Aço Galvanizado - 1/16 - 600mm - 3"
1	Barro de Aço - 1" - 640mm
-	Manta de fibra de vidro
1	Folha de Alumínio Corrugado
1	Resistência Elétrica - 3" x 35mm - 50W
1	Base Metálica - 250mm x 300mm
1	Suporte para Resistência - Anel de Aço - $\varnothing_{ext} = 2"$ $\varnothing_{int} = 1"$ x 35mm
10	Termopares
1	Resistência Elétrica - 2" x 35mm - 50W

Fig. 2.2.a

O elemento mais interno de todo o conjunto é uma barra de aço de 25,4 mm e 640 mm de comprimento. Ela é também a mais importante, pois será nela que verificaremos a lei de Fourier e determinaremos a condutibilidade térmica medindo o perfil de temperaturas através de termopares e a potência elétrica entregue à barra, que deverá ser aproximadamente o fluxo de calor que é entregue à barra, fora as perdas. Para aquecer a barra, utilizamos uma resistência elétrica, tipo coleira, de 50 W com 2" de diâmetro e 35 mm de largura. Nela está ligado um reostato de 5 K e 12 W para regular a potência

elétrica (fluxo de calor) entregue à barra. Para que não haja perda de calor radial (condição para que haja fluxo de calor unidimensional e uma das condições para se verificar a lei de Fourier em uma barra), adotamos um sistema bastante citado na literatura sobre experimentos e medições de condutibilidade. Este método de isolamento consiste em se criar um perfil de temperaturas de simetria cilíndrica em volta da barra. Isto pode ser feito de dois modos em um tubo de seção constante que envolva a barra:

1) Impondo nos mesmos pontos da barra e do tubo temperaturas iguais em uma ponta e outra temperatura em outra ponta.

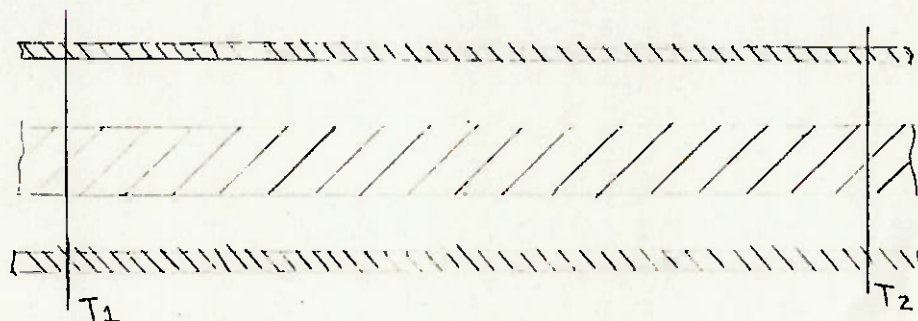


Fig. 2.2.b

2) Impondo em uma extremidade nos mesmos pontos uma temperatura e em outra extremidade um fluxo de calor diferenciado de tal modo que

$$\begin{aligned} Q_1 &= K_1 A_1 \\ Q_2 &= K_2 A_2 \end{aligned} \quad (2.2-1)$$

Isto vem de escrevermos a equação (1.1-2) $q = \frac{K A}{x} (T_1 - T_2)$

para a barra e para o tubo e igualarmos os termos $\frac{L_1}{L_2}$ que é a

equação do perfil de temperaturas para um fluxo de calor unidimensional e K constante.

Note que para se obter um mesmo perfil de temperaturas não é necessário que o material da barra seja igual ao do cano, em qualquer um dos casos.

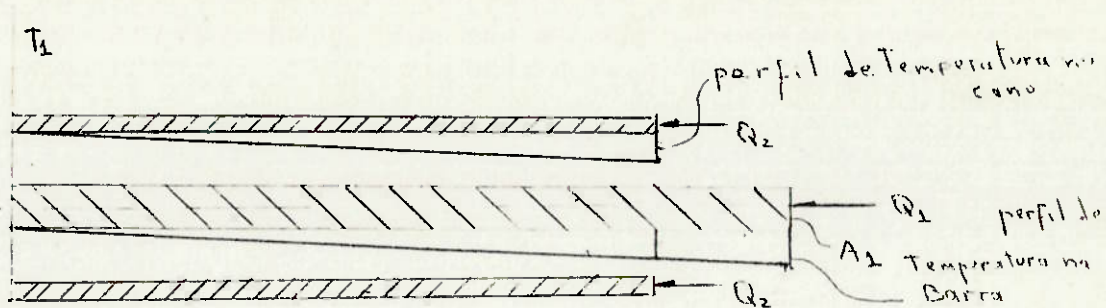


Fig. 2.2.c

Por esta segunda opção e pela fig. 2.2.c podemos verificar que não é necessário que a barra e o cano sejam do mesmo tamanho, como na fig. 2.2.b, mas que é possível criar simetria de temperaturas mesmo em canos e barras de tamanhos diferentes. Claro que não será possível obter uma simetria nos pontos onde um for maior que o outro.

Neste experimento e no segundo, decidimos optar por esta segunda opção pelos seguintes motivos:

1- por um melhor controle da simetria do perfil;
 2- usando resistências elétricas isto poderia ser facilmente alcançado e poderia se atingir qualquer temperatura em uma das extremidades;

3- podemos medir assim o fluxo de calor (potência elétrica) entregue tanto à barra quanto ao cano. Usando um fluido a uma temperatura constante (por exemplo no ponto de ebulição) para criarmos uma condição de contorno do primeiro tipo, isto não seria possível;

4- é mais fácil construtivamente usar resistências elétricas que fluidos. Temos um exemplo disto no nosso próprio aparelho, que usa em um lado, para resfriar, água corrente, e foi muito mais difícil fabricar um recipiente no qual corresse água do que simplesmente um pedaço de aço para prender a resistência. Evitamos problemas de vazamento, corrosão, etc.

Já falamos bastante do sistema de aquecimento. Falamos um pouco agora do sistema de resfriamento. Como falamos acima, resolvemos fazê-lo com água. Chegamos a isto por dois motivos:

1- na literatura procurada ([1], [2], [3], [4], [5], [6]), todos os sistemas de resfriamento usavam água;

2- a água, quando passa por uma superfície a uma grande velocidade, tem um coeficiente de transferência de calor tão alto que se pode confundir a temperatura do líquido com a temperatura da superfície.

O sistema adotado consiste em uma seção de tubo de 4 1/2" fechada nas duas pontas com dois tubos nas laterais; em um entra a água e no outro sai. Em uma das pontas está soldada a barra de aço, e ao volta do local da solda está também soldado um pedaço de luva, no qual rosqueamos o tubo. Assim o tubo também seria resfriado. Para maior clareza, veja a figura 2.2.d

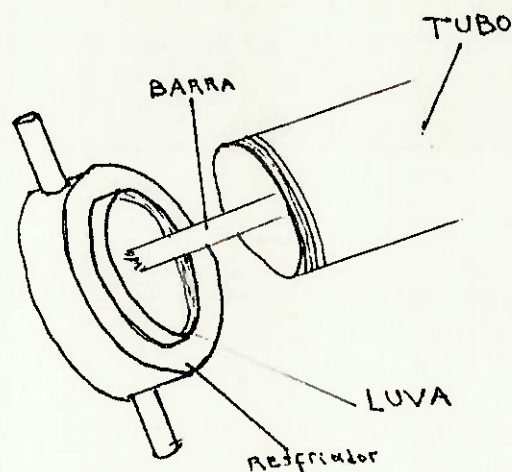


Fig. 2.2.d

Já falamos do sistema de aquecimento, resfriamento e isolamento pelo aquecimento de um tubo, mas não falamos totalmente deste item. O isolamento da barra por um tubo aquecido não é suficiente; embora o ar seja um excelente isolante térmico, se fosse deixado entre o cano e a barra, como o experimento ficaria na vertical, poderiam surgir correntes de convecção natural internamente, cedendo calor à barra e ao cano na parte próxima ao resfriamento, e resfriando na parte próxima ao aquecimento. Isto modificaria o perfil linear desejado conforme a figura 2.2.e

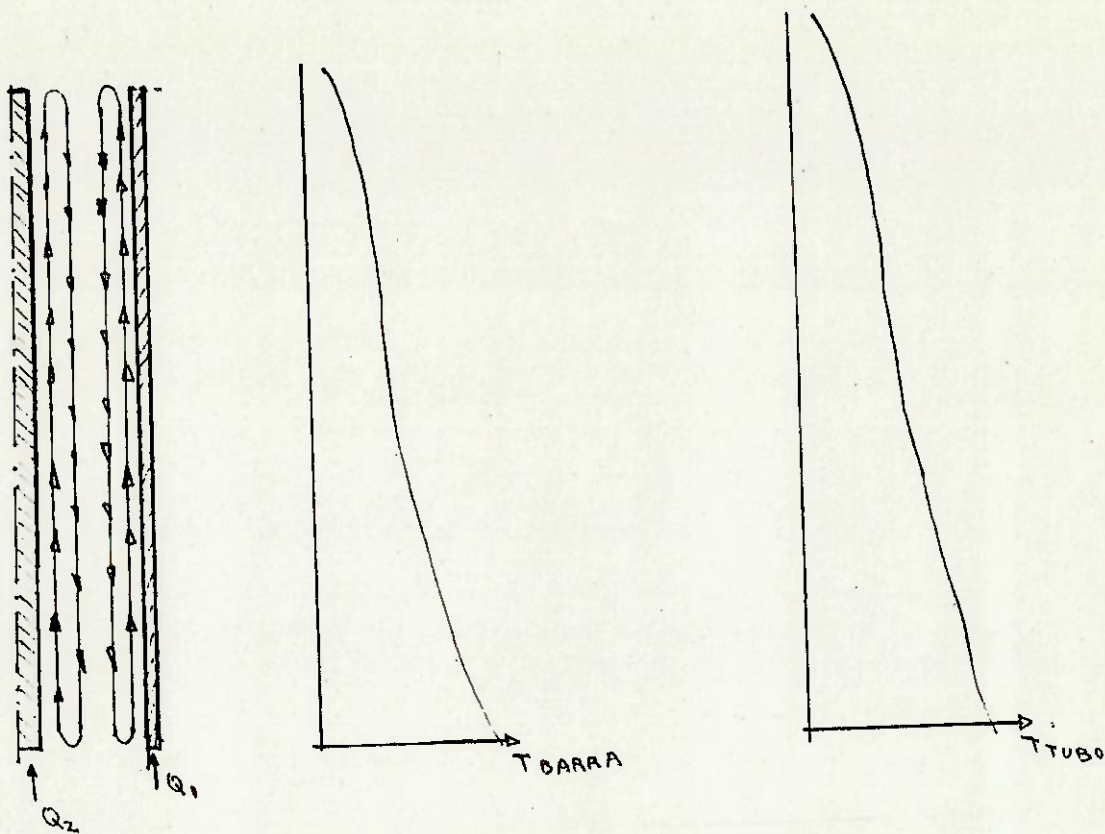


fig. 2.2.e

O isolamento não é necessário não somente dentro do tubo, mas também fora, pois sem ele dificilmente poderíamos obter um perfil linear (como deveria ser na barra), havendo portanto troca de calor entre o tubo e a barra, comprometendo também a linearidade do perfil na barra. O tubo assim perderia calor como uma aleta, pelo lado externo, conforme a fig. 2.2.f

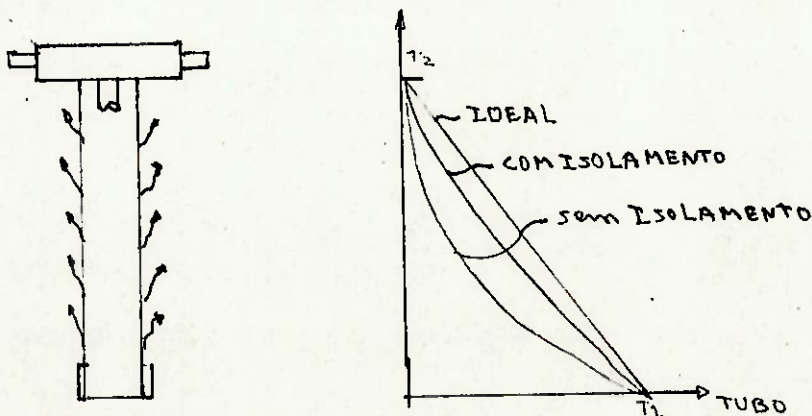


fig.2.2.f

De fato, mesmo com o isolamento, o perfil não será totalmente linear, pois sempre perderá um pouco de calor externamente, mas será um efeito de segunda ordem no tubo e de terceira ordem na

barra.

Como faremos para medir as temperaturas?

Como falamos no início, o objetivo desta experiência é verificar a Lei de Fourier (linearidade nas temperaturas) e medir o

K da barra - $K = \frac{Q \cdot x}{A \cdot T}$ (2.2-2) onde

Q fluxo de calor pela barra (W)

x espaço entre duas temperaturas (m)

T diferença entre estas duas temperaturas (C)

A área da secção da barra (m²)

Para isto é necessário medir as temperaturas. Isto se fará com termopares ferro-constantan. Foram colocados 6 termopares na barra conforme a fig. 2.2.g

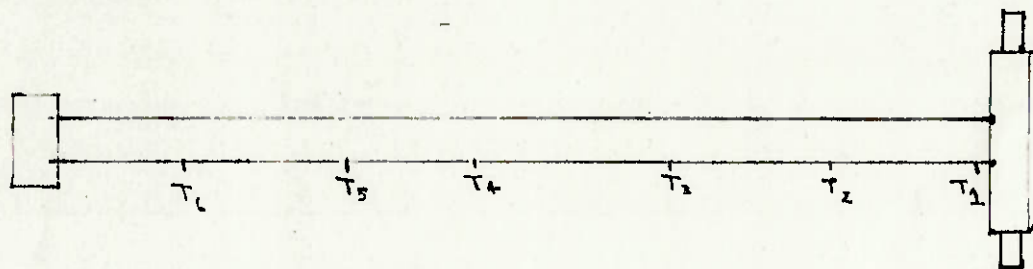


fig 2.2.g

Para medir as temperaturas, bastaria colocar mais um termopar em uma temperatura conhecida, ler a diferença de potencial gerada pelas diferenças de temperatura entre o termopar de interesse e o termopar padrão, conforme a fig. 2.2.h

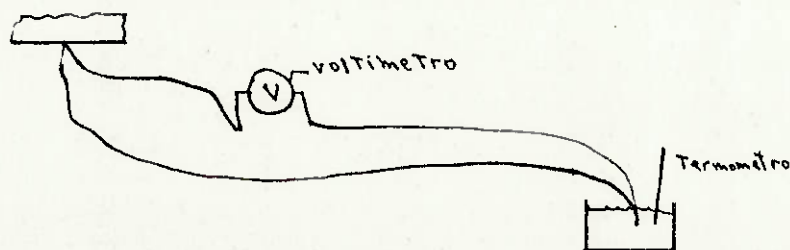


fig. 2.2.h

Para medir a potência entregue à resistência da barra, basta instalarmos um wattímetro nos fios de entrada da resistência.

Assim podemos medir o K conforme a equação 2.2-2, pois temos todos os dados necessários.

Podemos também cumprir o segundo objetivo, que é verificar a

Lei de Fourier, simplesmente plotando o gráfico das temperaturas em função da distância na barra e verificar que a função é uma reta.

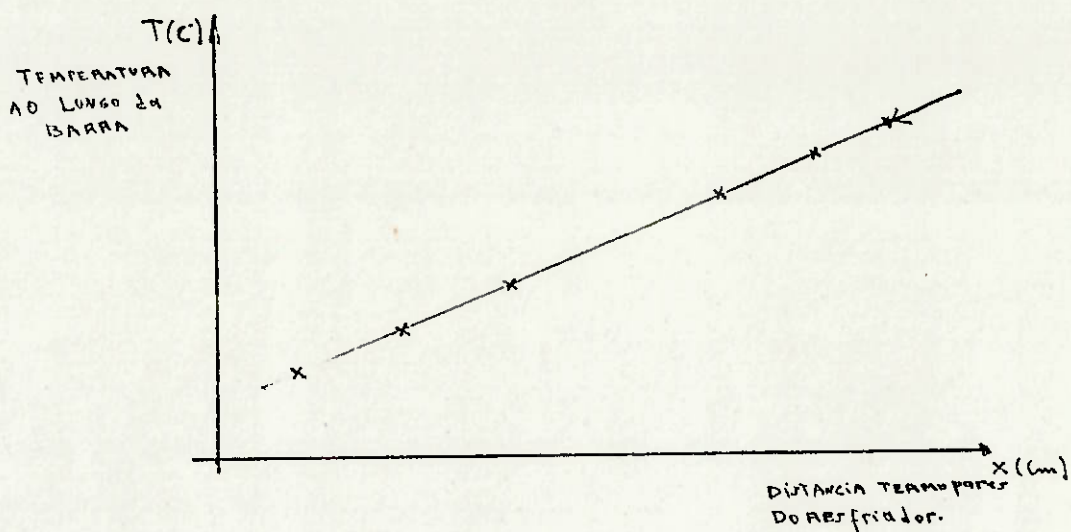


fig.2.2.i

Também colocamos 4 termopares no tubo para verificar se conseguimos simetria de temperaturas entre a barra e o tubo.

Foram escolhidos os pontos de T6, T4, T3 e T2, e colocamos os termopares na barra de tal modo que ficassem exatamente sobre a mesma coordenada para a verificação precisa da blindagem. Escolhemos também colocar sobre a mesma coordenada radial (mesmo lado do tubo e da barra) mas não necessitava sê-lo, ficando assim a disposição:

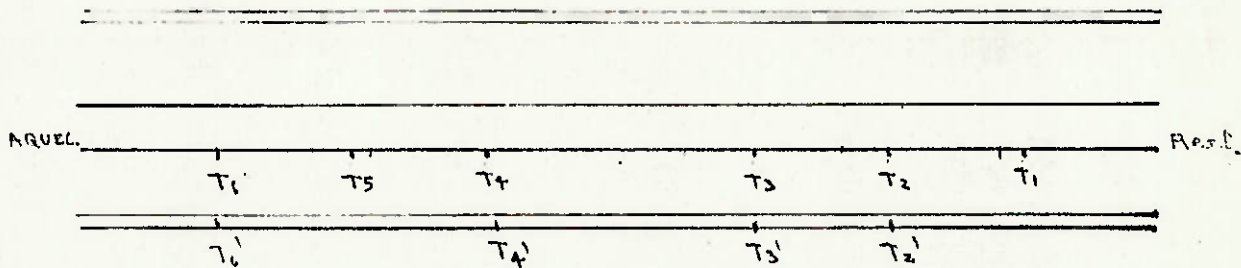


fig.2.2.j

Note que para verificação da blindagem bastaria verificar T6, se se assume como hipóteses que os perfis serão lineares tanto na barra quanto no tubo, pois os dois têm uma temperatura igual e fixa na base do resfriador (condição imposta pelo alto h da água corrente), que é a temperatura da água. Então bastaria monitorar T6' e T6, por exemplo, que as retas da função temperatura-distância

seriam coincidentes. Entretanto, colocamos mais 3 termopares além de T_6' para realmente verificar o dito acima ou comprovar o efeito aleta do tubo, conforme discutido anteriormente.

Note que o ajuste é mais difícil e mais preciso quanto mais longe da base do resfriador, pois se as retas têm inclinações diferentes, quanto mais longe do resfriador mais se nota a diferença de temperaturas, conforme a figura 2.2.k

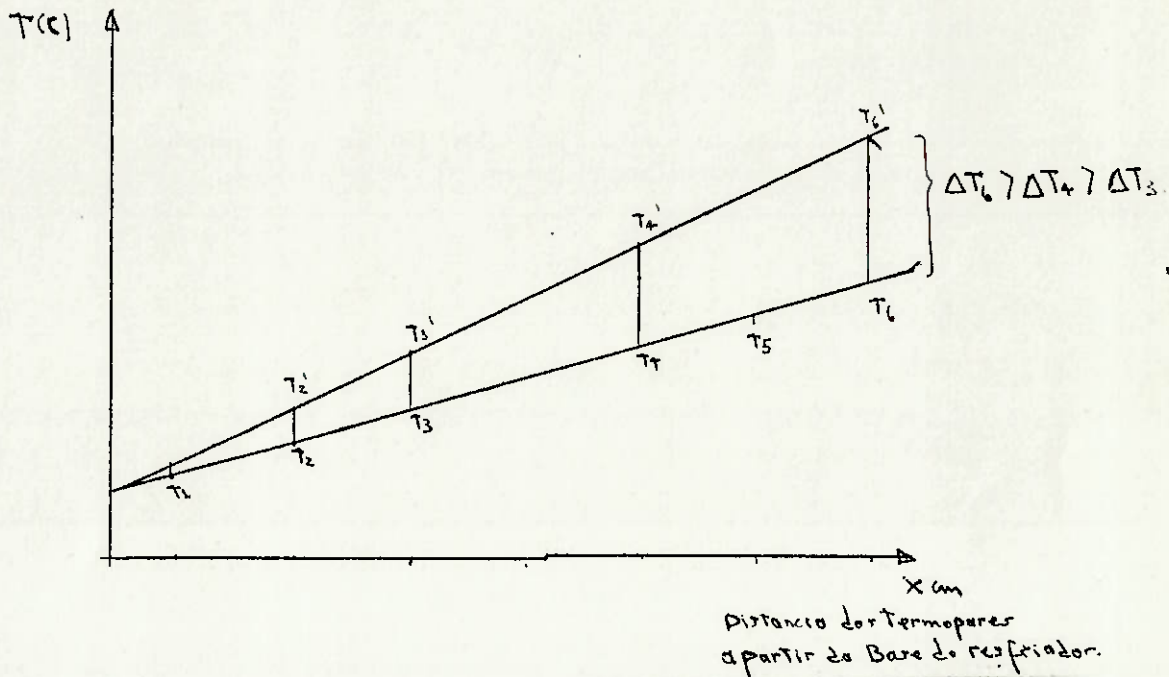


fig 2.2.k

2.2.2 Projeto do Dispositivo número um

Projeto do sistema global

O projeto do sistema global começou com uma pesquisa bibliográfica sobre quais as várias maneiras de se medir K . Verificamos que o mais usado era o método por comparação, mas como iríamos necessitar somente de um tipo de material, o que fizemos foi tirar a concepção de um tubo com uma barra central, só que de um único material.

Projeto do Sistema de Aquecimento

Para o aquecimento do tubo e da barra central pensamos em aquecedores do tipo coleira; para isto era necessário calcular as potências requeridas para ambas as resistências. Para calculá-las, igualamos a potência elétrica ao fluxo de calor, tanto pelo tubo

quanto pela barra. As potências deram muito baixas, em torno de 1 W. Mesmo assim, encomendamos duas resistências de 50 W.

Projeto do Sistema de Resfriamento.

Desde o início o único fluido para resfriamento foi a água; nosso principal receio era que, ao fazer a água circular pelo resfriador, houvesse algum ponto de estagnação e ali a temperatura fosse diferente dos restantes. Por facilidade, pensamos em construí-la com uma seção tubular, com duas entradas de água; para evitar pontos de estagnação laterais, pensamos em colocar uma barreira que distribuisse o fluxo conforme a figura.

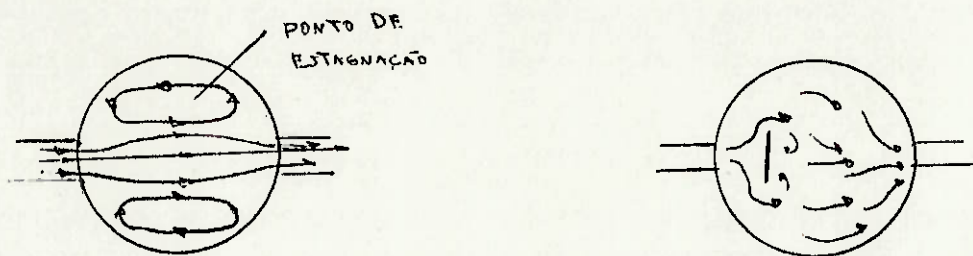


Fig 2.2.1

2.2.3 Construção do dispositivo 1

A construção do dispositivo 1 foi feita quase que totalmente nas Indústrias Irmãos Stancato, em Campinas. A primeira fase da construção consistiu em conseguir suas partes; comprou-se o cano e o tarugo; no Departamento de Eng. Mecânica conseguimos a seção tubular para o resfriador e os tubos de entrada e saída de água. Levado todo este material para Campinas, lá foi comprada uma luva de instalação hidráulica para fazer a rosca para o cano. Para fazer o resfriador, foram soldadas na frente e atrás duas chapas de aço e soldados os dois canos em dois buracos abertos anteriormente; foi soldada então a luva e a barra central conforme a foto I.

Conforme pode-se ver na foto, a rosca da luva vai até o fim do resfriador, para que haja um bom contato térmico entre o tubo e o resfriador. As soldas foram todas de latão, como se vê na foto onde a solda da barra é mais clara do que a própria barra.

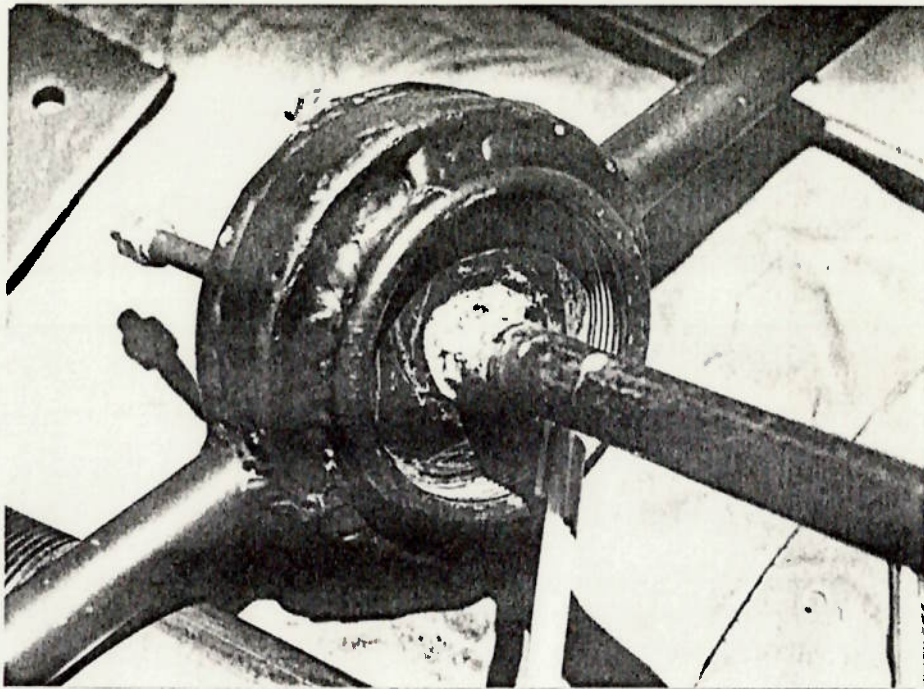


foto I

Detalhe da rosca e das soldas da frente do resfriador

Posteriormente foram soldados quatro pinos nas costas do resfriador para servir de apoio para todo o conjunto. No canto foi aberta uma rosca em um dos lados; na barra, antes de ser soldada no resfriador, em uma de suas pontas teve de ser soldada uma lapa de diâmetro igual ao da barra e de diâmetro externo de 3" para a resistência poder ser fixada. Isto teve de ser feito porque a fábrica de resistências não pôde fazê-las com diâmetro de uma polegada (diâmetro da barra). Na foto II mostramos também este detalhe; note que foi usada também a solda de latão.

Após o conjunto resfriador-barra ter sido soldado, foram feitas as bases, que são duas chapas (250 mm x 250 mm) com quatro furos para os tirantes. Todos os quatro tirantes medem 330 mm com rosca nas duas pontas. Na foto III vemos uma visão geral de todos os componentes dos experimentos 1 e 2.

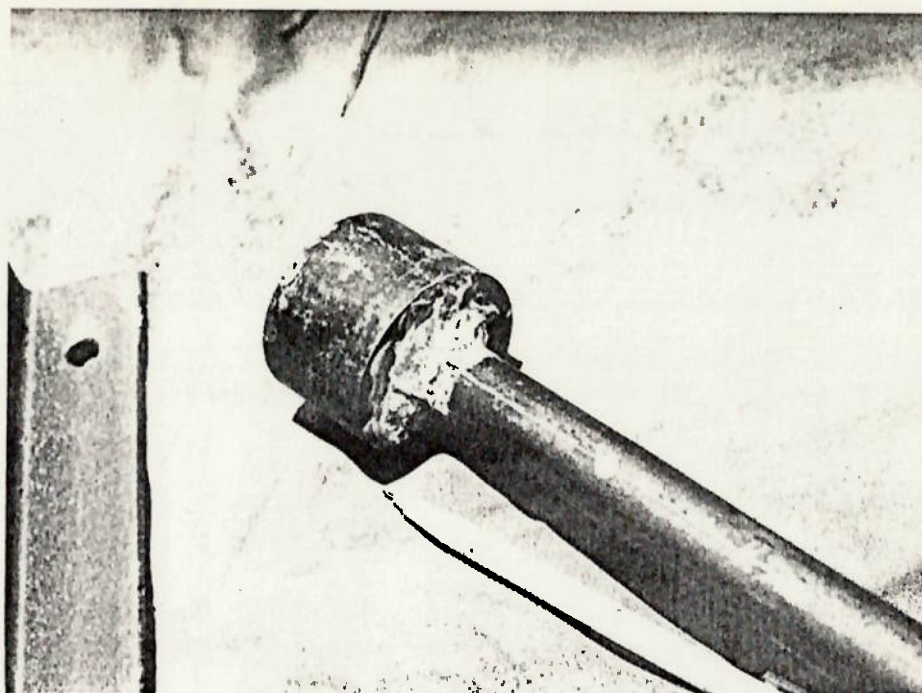


foto II

Detalhe da base da resistência da barra central.

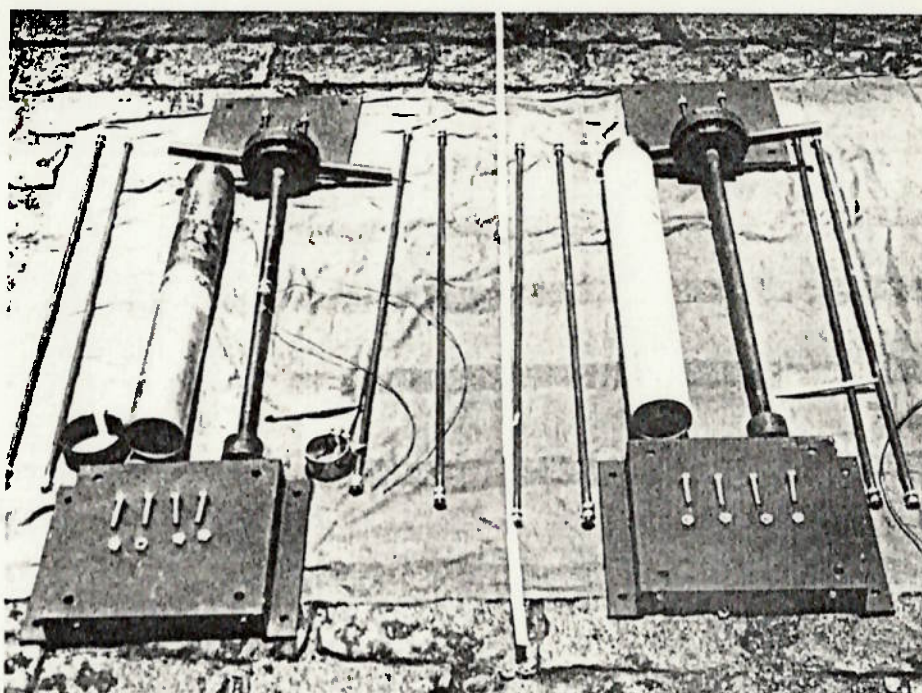


foto III

Vista geral de todas as componentes dos experimentos 1 e 2.

Nas extremidades superior e inferior estão as bases de suporte e de apoio. Os tirantes estão nas laterais. Nesta foto pode-se ver, ao lado do experimento 2 (à esquerda) as resistências do tubo e da barra. Os parafusos que aparecem sobre as bases de apoio são os parafusos de fixação do conjunto em uma mesa.

O passo seguinte foi fazer os furos na barra e no tubo para a

resfriador-barra das duas experiências (1 e 2).

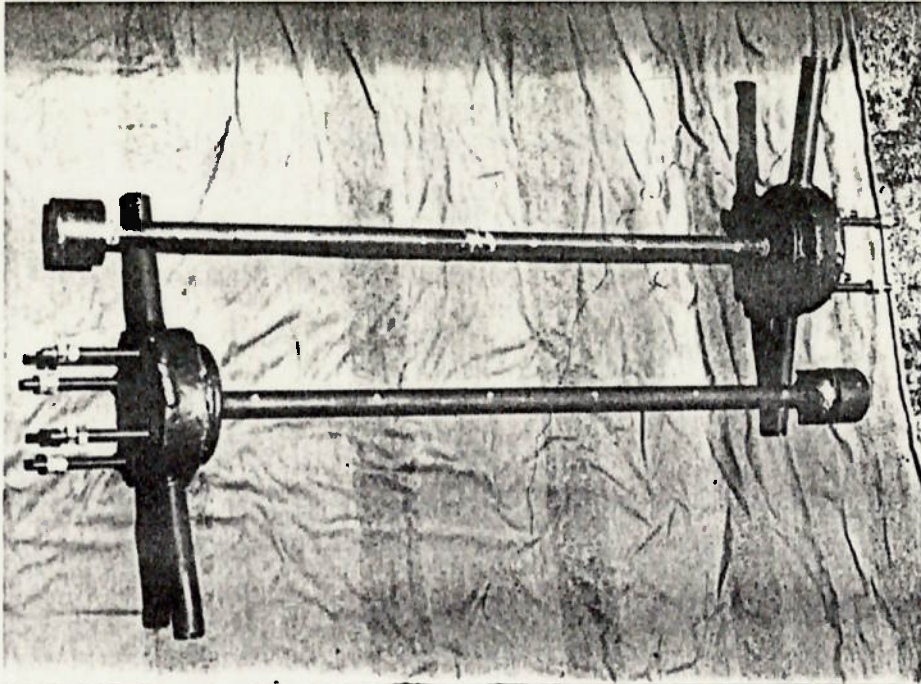


Foto IV

~~Da dois condutores resfriados-barra após serem furados para a~~
~~instalação dos termopares.~~

Foram furados também os tubos com a mesma broca, apenas com menor profundidade. Após feitos todos os furos, foram preparados os termopares: todos os dez termopares foram isolados eletricamente, pois antes de se colar, foi colocado um pouco de "araldite" na junção e, como esta é isolante, isolamos todo o termopar. Feito isto, passamos a colar cada termopar, procurando colocar a junção o mais próximo possível do fundo ou toda a junção dentro do buraco, conforme a foto V.

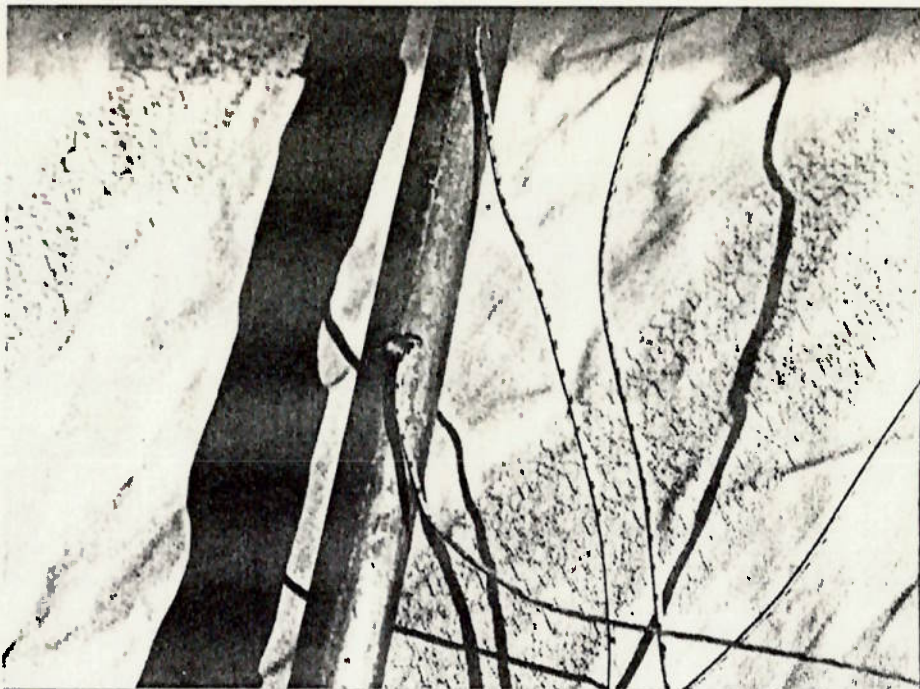


foto V

termopares soldados na barra central

Embora a foto não mostre, foram colocadas fitas elétricas para manter o termopar no lugar até a cola endurecer totalmente. Como a "epaldite" usada é transparente, é possível ver a junção na barra.

Na sequência, o próximo passo foi a colagem no tubo. Na foto VI é possível ver a distribuição dos termopares no tubo que foi comentado no início: o tubo aparece pintado de branco porque não foi comprado, mas conseguido em Campinas.

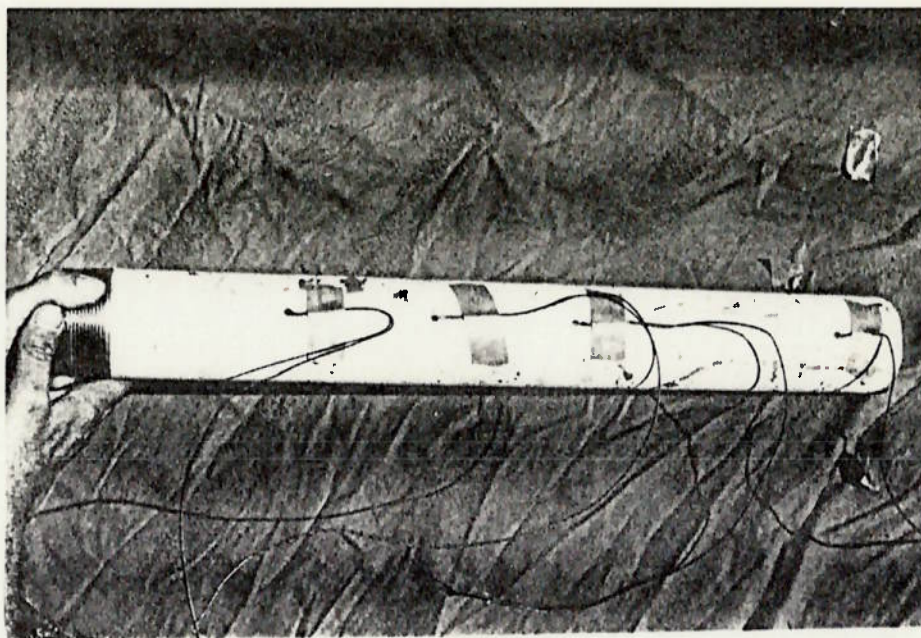


foto VI

Termopares colados no tubo.

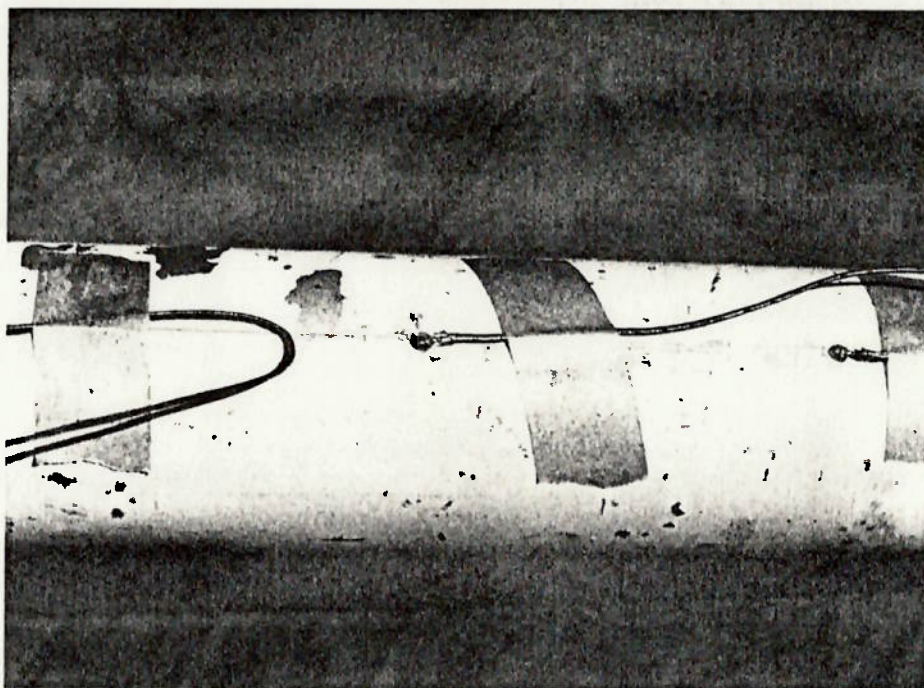


foto VII

Detalhe das junções dos termopares.

Na foto VII é possível ver como foram coladas as junções: o uso de "araldite" transparente tem como vantagem, além de ser isolante elétrico e bom condutor de calor, permitir a verificação da junta termoeétrica através da cola, no caso de uma leitura indevida.

Estando os termopares bem colados, isolamos a barra: antes

disto, os termopares foram numerados para não haver confusão nas medições. Para prender a lâ de vidro utilizamos fios de arame fino.

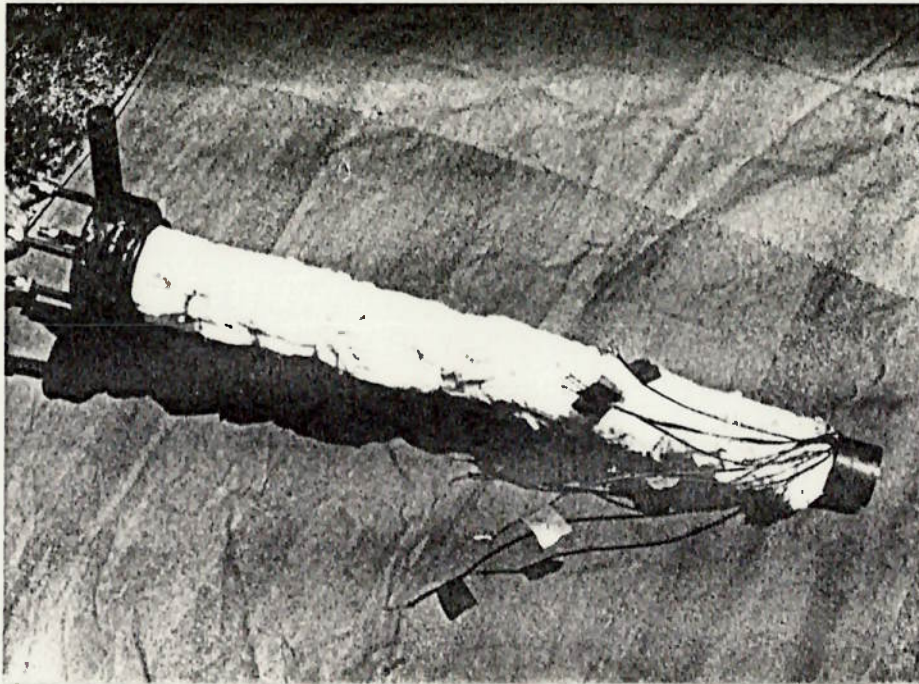


foto VIII

Barra isolada com os termopares numerados.

Concluído o isolamento, passamos a barra isolada pelo tubo até o final. O tubo foi rosqueado até que sua boca (fim da rosca) tocasse a base do resfriador. Na foto IX o tubo ainda não foi rosqueado.

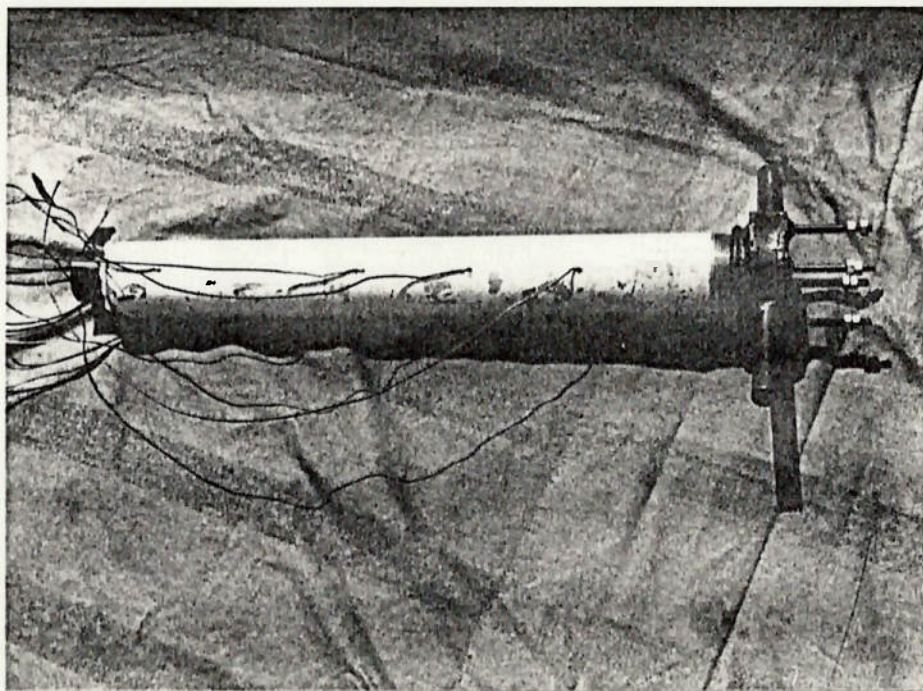


foto IX

Tubo envolvendo a barra já isolada.

O tubo sofre o mesmo processo de isolamento que a base, e seus termopares foram numerados e isolados. Posteriormente foi adicionado mais um termopar na base do resfriador para termos uma temperatura da condição de contorno. Na foto X vemos o tubo isolado e o termopar colado (há uma fita branca que o segura).

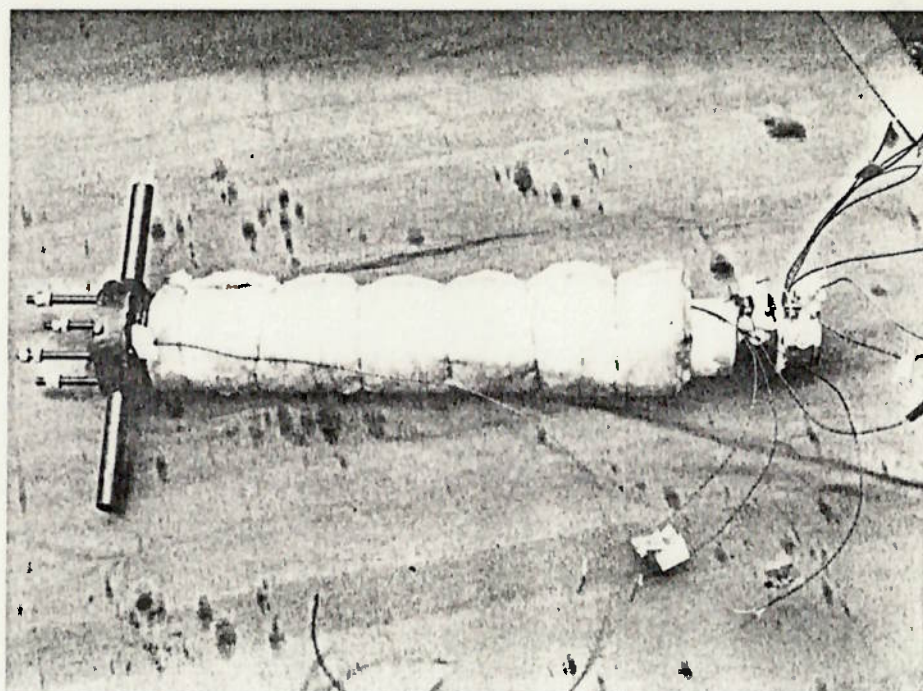


foto X

tubo isolado com as resistências

Os fios, ao saírem da resistência, foram isolados com fita de vidro, para evitar curtos e um superaquecimento causado pela resistência.

Na foto XI vemos este isolamento

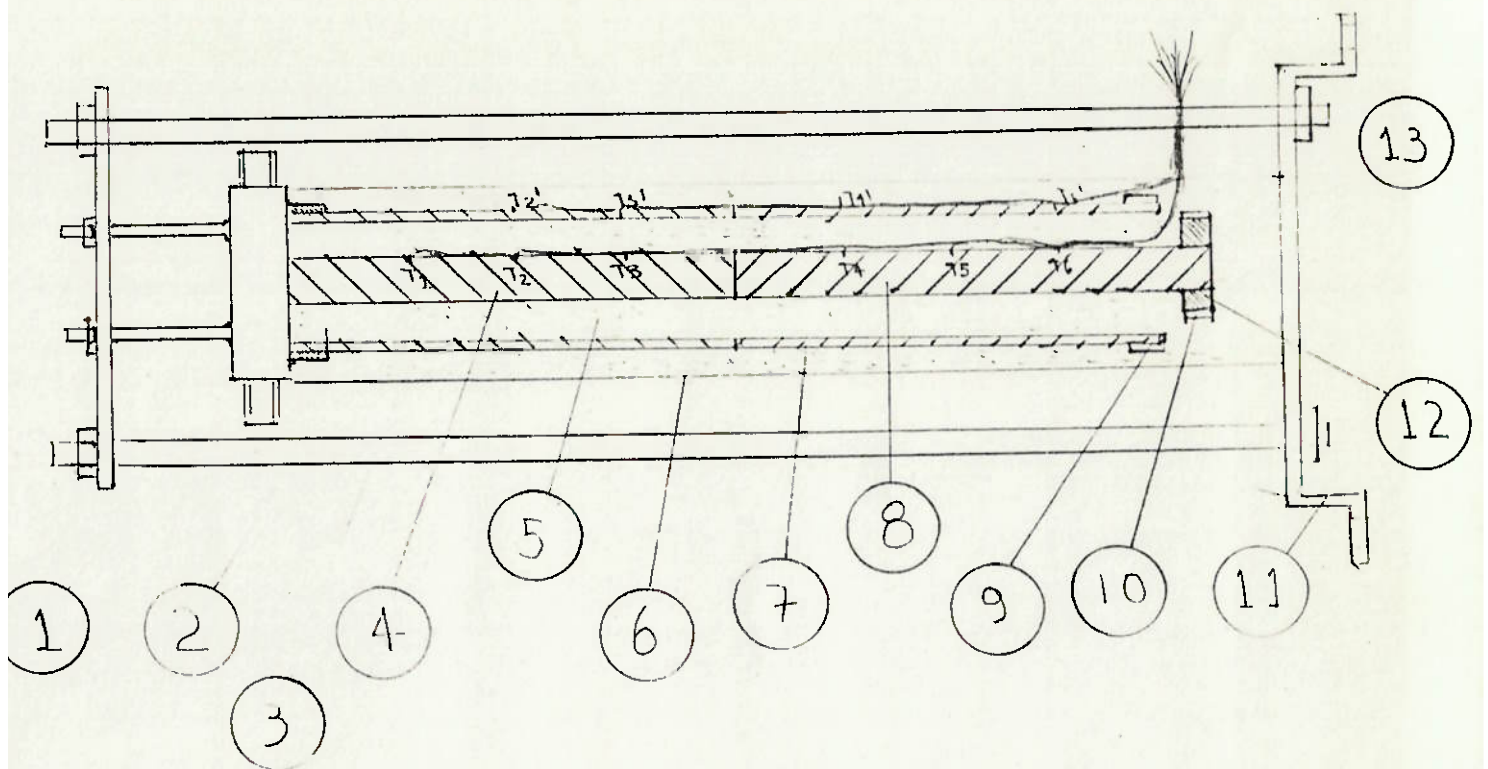


foto XII

Esperimento di fisica con il pendolo.

2.3 Descrição da Montagem Experimental

2.3.1 Descrição e Funcionamento

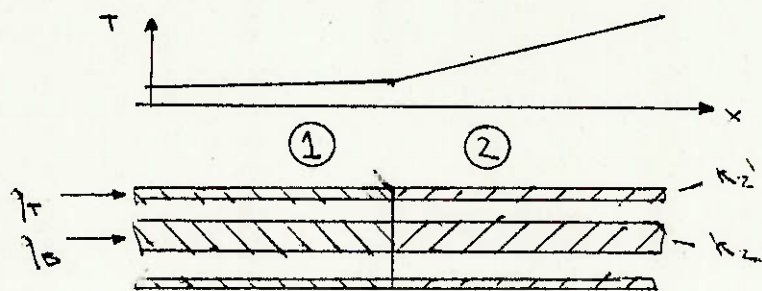


QTD	DESCR.
2	Resfriador
4	Trastes - $\varnothing 6 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$
1	Tubo de Cobre - 1/16 - 300 mm - $\varnothing 3''$
1	Barra de Cobre - $\varnothing 1'' - 300 \text{ mm}$
-	Manta de fibra de Vidro
1	Folha de Alumina Corrosiva
1	Tubo de Aço Galvanizado - 1/16 - 300 mm - $\varnothing 3''$
1	Barra de Aço - $\varnothing 1'' - 340 \text{ mm}$
1	Resistência Elétrica - $\varnothing 3'' - 35 \text{ mm} - 50 \text{ W}$
1	Resistência Elétrica - $\varnothing 2'' - 35 \text{ mm} - 50 \text{ W}$
1	Base Metálica - 250 mm x 300 mm
1	Suporte para Resistência - Anel de Aço - $\varnothing \text{ext} = 2'' - \varnothing \text{int} = 1'' - 35 \text{ mm}$
10	Termopares - Forno - Constantan - Tipo J

Fig. 2.3-a

O dispositivo número 2 é idêntico ao número 1, com a diferença de que metade da barra de aço e metade do tubo são de outro material, cobre. Neste dispositivo, o que vamos medir é a condutibilidade térmica do aço em relação ao cobre, e para tanto, como no experimento número 1, temos que submeter uma barra a um fluxo de calor unidimensional. Utilizamos praticamente o mesmo sistema de blindagem que no caso anterior; uma vez alcançado o perfil de temperatura na barra central, temos que criar um mesmo perfil em volta da mesma. Utilizamos um tubo como invólucro nas seções onde há mudança de material (tanto no tubo quanto na barra as mudanças ocorrem nos mesmos pontos) e submetendo-o a um determinado fluxo de calor por uma extremidade e à mesma temperatura da barra a outra extremidade é possível obter um perfil de temperaturas igual no tubo e na barra. Provemos que é possível, supondo no segundo trecho tubo e barra com materiais diferentes e a partir da igualdade de perfis chegaremos à igualdade de $K'2 = K2$

$$q = \frac{K \cdot \Delta T}{x} \Rightarrow \frac{\Delta T}{x} = \frac{q}{K \cdot A}$$



Igualemos os perfis de temperatura no trecho 1:

$$\frac{\Delta T_1}{K_1 A_1} = \frac{\Delta T_1}{K_1 A_2} \Rightarrow q_1 = \frac{q_1 \Delta T_1}{A_1}$$

Igualeando os perfis no trecho 2

$$\frac{\Delta T_2}{K_1' A_1} = \frac{\Delta T_2}{K_2 A_2} \quad (1)$$

mas com $q_1 = q_2 = \frac{q_1 \Delta T_1}{A_1}$ e $q_2 = q_1$ em (1), temos

$$\frac{q_1 \Delta T_1 A_2}{A_1 K_2' A_1} = \frac{q_1 \Delta T_1}{K_2 A_2} \Rightarrow K_2 = K_2'$$

Para levantar o perfil de temperatura no aço e no cobre,

colocamos 3 termopares distantes 100 mm um do outro, tanto na barra de aço quanto na de cobre. Para monitorar as temperaturas do tubo usamos o mesmo processo e os mesmos pontos da experiência 1. Muito provavelmente haverá uma resistência térmica na solda entre o aço e o cobre, mas este não influirá na experiência.

2.3.2 Resistivo

O projeto deste dispositivo foi o mesmo que o de número 1. Para os cálculos das resistências de aquecimento e do resfriamento, usamos os mesmos valores do projeto 1, principalmente por causa da pouca influência da potência já calculada, que é muito baixa.

A única parte mais trabalhosa, que foi a referente à solda do aço e do cobre, deixamos para o sub-item Construção e Montagem.

2.3.3 Resistência Térmica

Os pesos foram exatamente iguais aos do projeto 1, com a diferença de que foi necessário a solda entre o aço e o cobre antes, tanto na barra quanto no tubo. Passamos a comentar algumas peculiaridades do projeto que não foram abordadas no projeto 1.

A parte mais difícil da construção foi a solda aço-cobre. Foi testado estanho, mas não funcionou; somente conseguimos soldar com latão. Na foto XIII vemos um detalhe da solda no tubo.

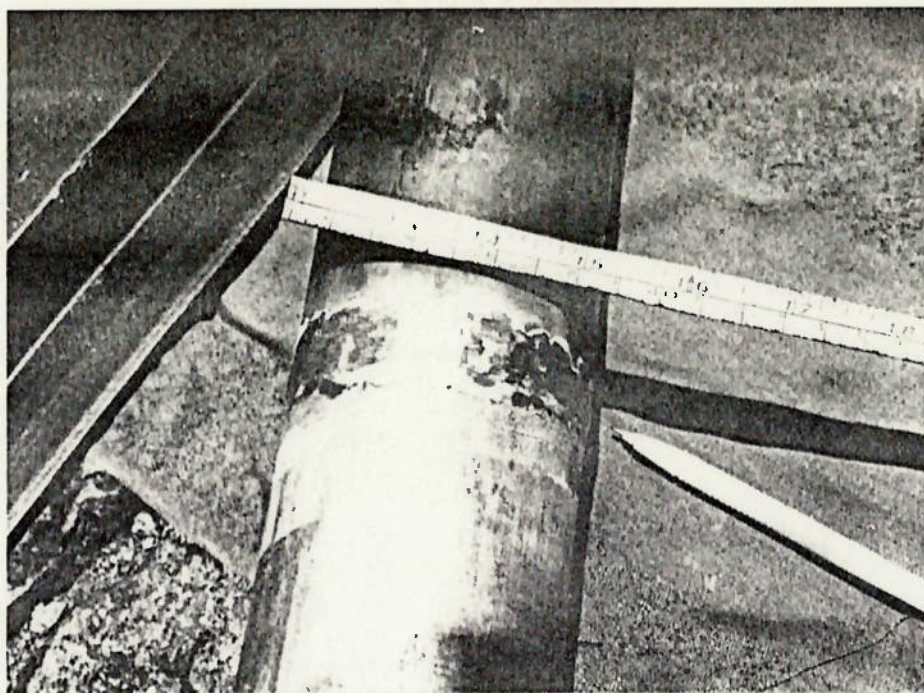


Foto XIII

Solda entre o tubo de aço e o de Cobre

cobre na foto é a parte superior e o tubo de aço é o da parte de baixo. As marcas brilhantes na solda foram causadas pelo esmerilhamento da superfície.

Também aqui tivemos a preocupação de que todos os pontos de temperatura fossem sob a mesma linha, e que os pontos no tubo e na barra central estivessem sob o mesmo raio. Na foto XIV é possível ver o risco feito na barra para obter esta simetria.

Nesta foto aparecem os termopares já colocados, mas as fitas ainda não haviam sido retiradas. É possível observar também nesta foto a solda feita entre a barra de aço e a de cobre. O aço é a parte superior e o cobre é a parte inferior da barra.

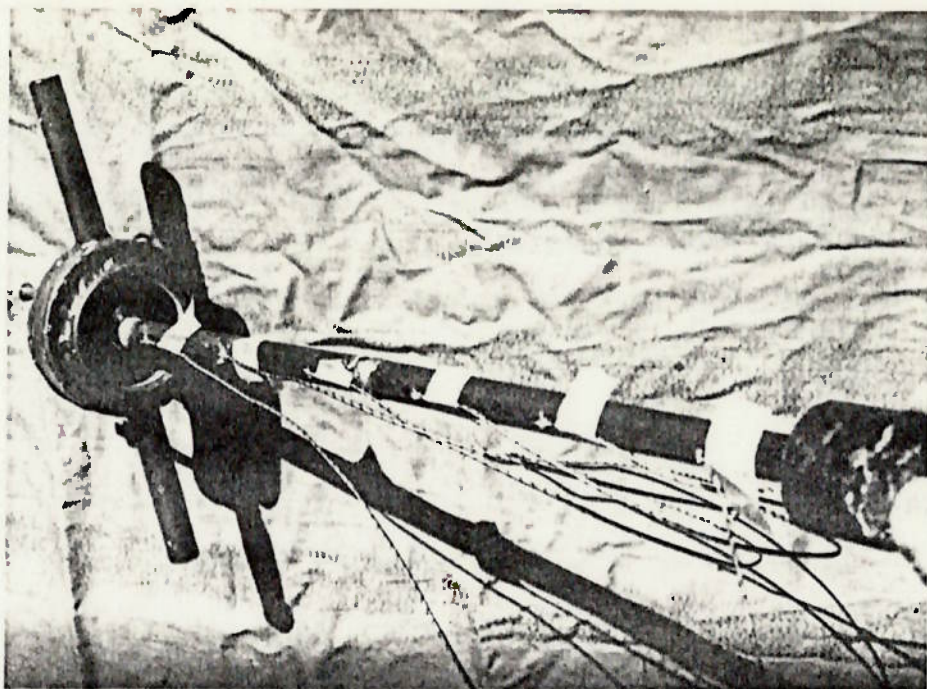


foto XIV

Tubo cobre-aço com os termopares colados.

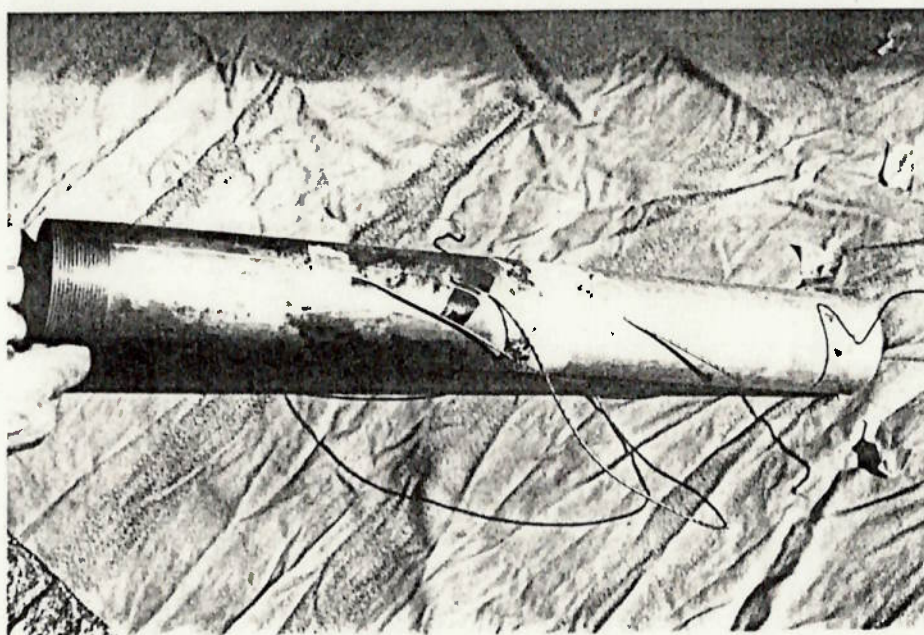


foto XV

Este são os termopares colados no tubo cobre-aço.

Na foto XV temos o tubo cobre-aço (cobre à esquerda e aço à direita) com os termopares nele afixados. Antes de isolar o tubo, retiramos as fitas adesivas, pois estas poderiam queimar com o aquecimento do tubo.

Na foto XVI está muito claro o termopar 3' (correspondente ao 5), onde a ponta do termopar (junção termo-elétrica) aparece sob a

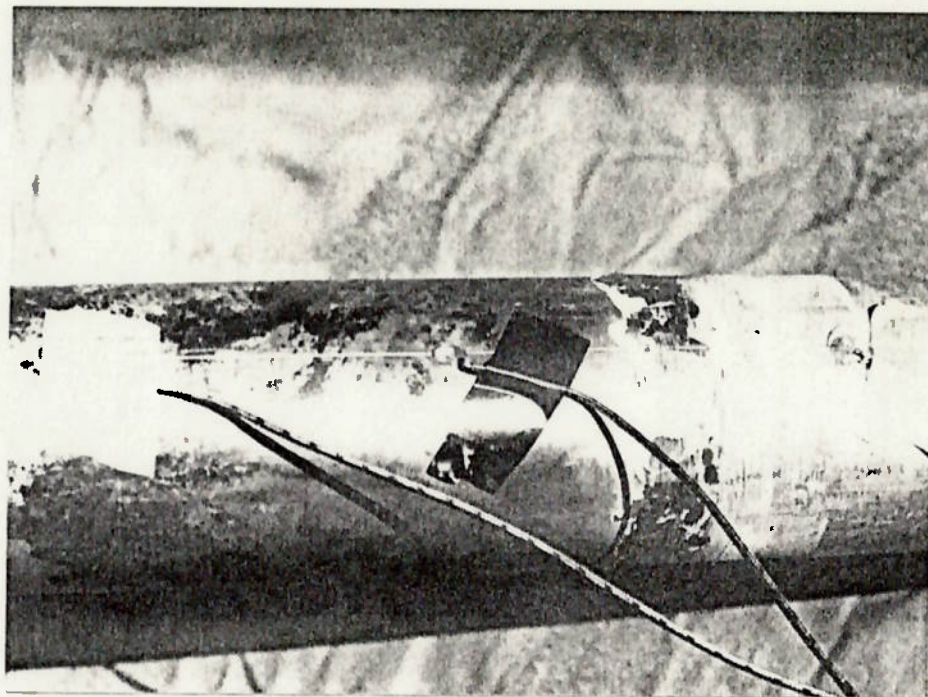


foto XVI

Estabelece das pontas das locomotivas na tuba

A única diferença entre as montagens dos experimentos 1 e 2 foi que o 2 não teve um termopar colocado na sua base para medir a temperatura da água.

Na foto XVII temos o experimento 2 já totalmente montado: o local da foto é entre o laboratório de Hidráulica e o de Máquinas Térmicas. Ao fundo à esquerda pode-se ver o laboratório de Caldeiras.



Foto XVII

Esperimento 2 totalmente montato.

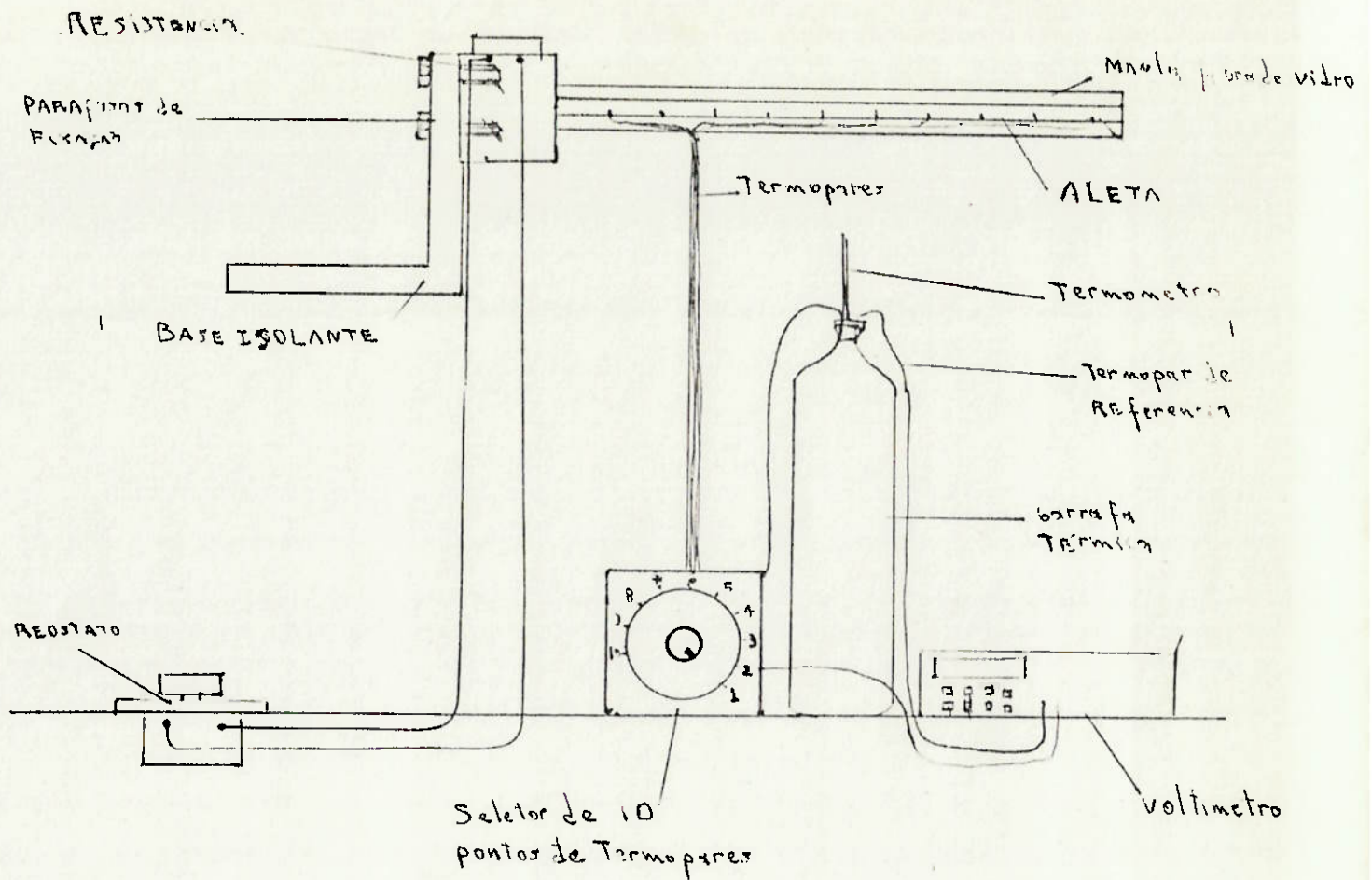


Fig. 2.4-a

2.4.1 Resenha e Encionamento

Neste experimento iremos fazer uma comparação da distribuição de temperaturas de uma aleta de ponta adiabática teórica com uma experimental.

Como foi falado na introdução teórica, a equação da distribuição de temperaturas em uma aleta de pontas adiabáticas é da seguinte forma:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{1 + e^{-\beta x}}{1 + e^{-\beta l}} + \frac{e^{-\beta x}}{1 + e^{-\beta l}}$$

sendo $\beta = \sqrt{\frac{h \cdot A}{k \cdot A}}$

onde

h = coeficiente de transferência de calor por convecção

k = condutibilidade térmica da aleta

P = perímetro da aleta

A = área da aleta

Portanto, se soubermos todos estes dados, a temperatura ao longe do ar, uma primeira temperatura da aleta (T_0) e L , comprimento total da aleta, temos as outras temperaturas em função da distância da primeira temperatura. Feita uma tomada de dados experimentais, podemos gerar uma curva teórica das temperaturas e comparar com a experimental. Devemos notar que todos os dados são bastante conhecidos, menos o coeficiente de transferência de calor, que será estimado pela correlação:

$$\overline{Nu}^{0.42} Pr^{0.74} = 0,30 + 0,307 \frac{Gr Pr^{1/4}}{L^{1/4} (0,558/Pr)^{1/4}}$$

(esta expressão é válida para $10^3 < Gr.Pr < 10^7$)

ou seja

$$h = \frac{\overline{Nu} \cdot k}{D} \quad \text{onde}$$

k = condutibilidade de ar

D = diâmetro da aleta

Note que no cálculo teórico o h é considerado constante ao longo da aleta, o que pode não ser verdade se temos grandes diferenças entre as temperaturas da base e a ponta da aleta. Para isto, além de operar em baixas temperaturas, isolamos a aleta com fibra de vidro para diminuir as diferenças de temperatura de película entre a base e a ponta, que é a responsável pela variação das propriedades do ar e que modifica os dimensionais $Gr.Pr$, Pr , alterando assim os valores de h .

Para simular uma aleta, usamos uma barra de ferro com $D = 3$ mm e comprimento total 555 mm. Foram colocados termopares espaçados de 55 mm perfazendo um total de 10 pontos.

Uma resistência elétrica ligada em um resistor é utilizada para aquecer a base da barra. A resistência é montada em uma base de $D = 2"$ e comprimento 35 mm. Esta é fixada em basculite para não aquecer a mesa e evitar perdas de calor, fazendo com que toda a potência elétrica, convertida em calor, flua para a aleta. Fizemos isto para possíveis experiências e comprovações futuras, como por exemplo o cálculo de perda total de calor pela aleta.

A leitura das temperaturas é feita através de um voltímetro com uma das entradas ligada na saída do seletor dos termopares e a outra em um dos fios do termopar de referência. O nosso termopar de referência, como nos outros experimentos, foi colocado em uma garrafa térmica com um termômetro, ambos mergulhados em água à temperatura ambiente. A massa de água dará uma boa estabilidade na referência, e a garrafa térmica uma grande resistência a possíveis variações de temperatura do ar externo. Como falamos no início, colocamos uma camada de alguns milímetros em volta do ferro para proporcionar um h relativamente constante ao longo da aleta.

2.4.2 Análise Matemática da Aleta

Antes de começar a explicar como foi iniciado o projeto, é bom lembrar um detalhe: ao fazermos o balanço térmico por chegar à equação da aleta com ponta adiabática, fizemos

$$dq_{conv} = h \cdot P \cdot dx \cdot (T - T_{\infty})$$

mas para a nossa aleta com isolante térmico, a equação fica

$$dq_{conv} = U \cdot P \cdot dx \cdot (T - T_{\infty})$$

sendo U o coeficiente global de transferência de calor, dado

por
$$U = \frac{1}{R}$$

sendo $R = \frac{1}{h} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{K_{isol}} + \frac{r_2}{h_c}$ conforme a fig. 2.4-a

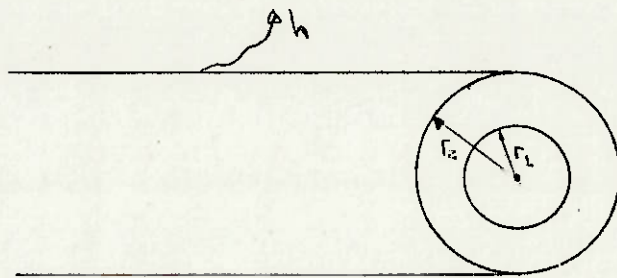


fig. 2.4-b

Portanto quando se for escrever a equação da aleta deve-se levar isto em conta para se calcular o valor de $m = \sqrt{\frac{h}{K \cdot D}}$

onde h será $\frac{1}{h \left(\frac{1}{K \cdot D} + \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right)}$

O primeiro passo para o projeto foi calcular o raio da base (r1), o raio do isolante (r2) e o comprimento (L). O comprimento máximo já estava determinado por problemas de espaço e seu valor seria 0,36 m. Para isto usamos como critério a própria equação da aleta, com uma temperatura na extremidade de 30 graus Celsius, temperatura na base de 100 C e uma temperatura ambiente de 25 C.

Portanto:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \frac{e^{-mL}}{1 + e^{-2mL}} + \frac{e^{-mL}}{1 + e^{-2mL}} \Rightarrow \frac{30 - 25}{100 - 25} = \frac{e^{-m \cdot 0,36}}{1 + e^{-2m \cdot 0,36}} + \frac{e^{-m \cdot 0,36}}{1 + e^{-2m \cdot 0,36}} = f(m)$$

Portanto, bastaria encontrar o valor de h que satisfizesse esta equação, sendo $\sqrt{\frac{h}{K \cdot D}}$ e $h = \frac{1}{\left(\frac{1}{K \cdot D} + \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right)}$

Para D = 20 mm, r2 = 35 mm, K = 54 W/m C, h = 4,0 W/m² C, o valor de m é 1,00, e f(m) = 0,83; a diferença de temperatura do ar da base e da ponta da aleta é de 17%, o que pode ser considerada pouca. Reduzindo D para 6 mm, temos m = 1,84 e f(m) = 0,60, o que é um valor razoável, e adotamos portanto D = 6 mm e r2 - r1 = 25 mm. Posteriormente este valor de r2 foi mudado para 9,5 mm.

A construção foi simples: cortado um pedaço de barra um pouco

maior que 0,5 mm e soldado em um pedaço de barra bruta de 2" de diâmetro por 35 mm de comprimento, estava pronta a primeira parte. Após isto, foi soldado um apoio metálico nas costas da aleta, mas este foi substituído por um de baquelite, pelas razões expostas anteriormente.

Foram então marcados os locais dos termopares, furados e então colocados os termopares. Posteriormente foi coberta a aleta com fibra de vidro e recoberta com alumínio corrugado.

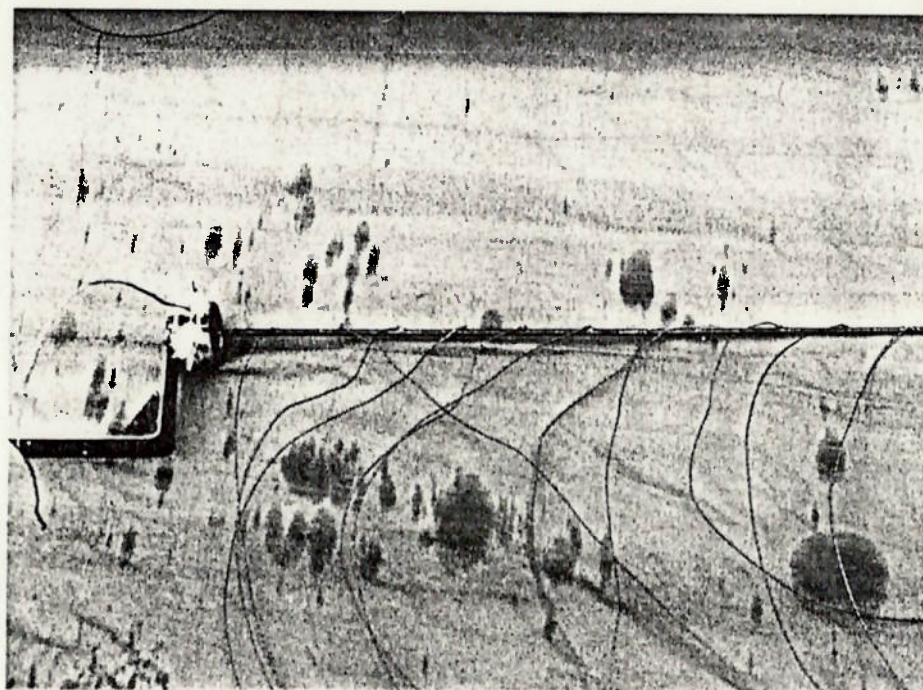


foto XVIII

Aleta com resistência colocada e sua base de metal soldada

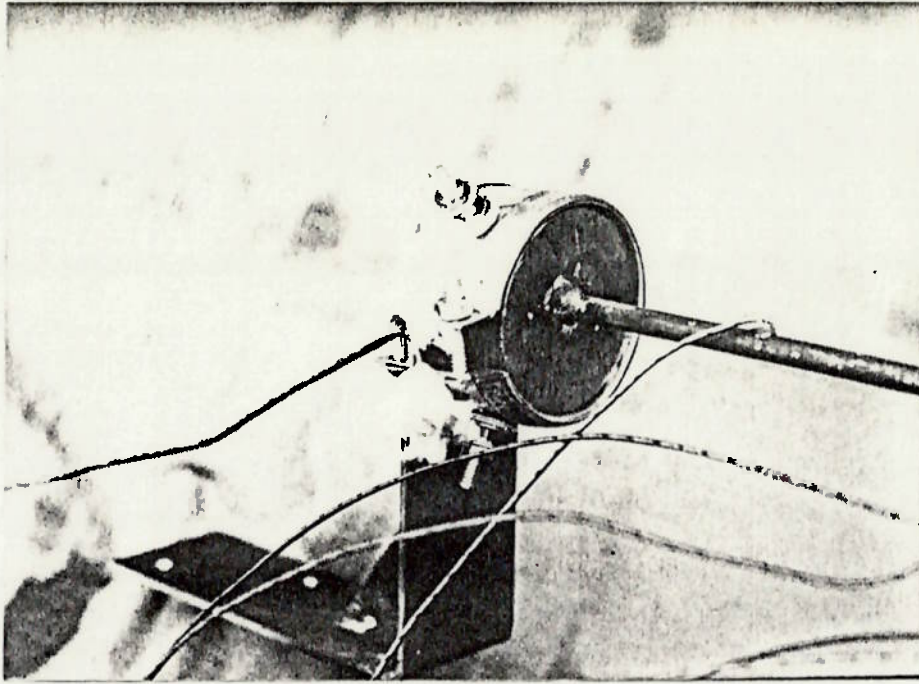


foto XIX

Relação da saída e da resistência

Foi então fixada a resistência e revestidas a base e a resistência com fibra de vidro.

3. EXPERIÊNCIAS

3.1. Dispositivo 1

3.1.1. Objetivo

O objetivo desta experiência é a comprovação da Lei de Fourier e a verificação da possibilidade de se medir K através da potência elétrica utilizada.

3.1.2. Procedimento

O procedimento é quite semelhante ao do experimento 2; o primeiro passo é ligar os reostatos das resistências, ambos na máxima potência para aquecer todo o conjunto, e após alguns minutos liga-se o sistema de refrigeração. Deve-se então ajustar os reostatos até conseguir uma simetria de temperaturas entre o barro e o cano. Uma vez ajustado e estabilizado o sistema, pode-se medir as temperaturas através da diferença de potencial entre um termopar e o termopar padrão.

Para o cálculo das temperaturas, usa-se a seguinte fórmula:

$$T = mV \text{ (valor em milivolts) } K + T_{ref}, \text{ sendo}$$

K = valor da constante do termopar

T_{ref} = valor da temperatura de referência

Usaremos um valor de $K = 17,11 \text{ } ^\circ\text{C/mV}$

Os valores de T_1' , T_3' , T_4' são de interesse somente para comprovar que o perfil é simétrico, ou seja, $T_2' = T_2$, $T_3' = T_3$, $T_4' = T_4$.

Os valores podem então ser passados para um gráfico Temperatura x Distância do Resfriador, através do qual poderemos:

·visualizar a Lei de Fourier

·medir o valor de K através da potência elétrica entregue

3.1.3 Apresentação dos resultados

Devido ao pouco tempo disponível, fizemos poucas medições, mas como a última foi razoável, resolvemos apresentar aqui três resultados. Em cada temperatura, colocamos a sua distância do

resfriador, a leitura dos termopares em milivolts e a temperatura real.

Termop.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T2'	T3'	T4'	T6'	Tamb
D (mm)	50	100	250	350	450	550	150	250	350	550	
mV	0,17	0,62	1,35	2,54	4,78	7,71	0,82	1,64	2,79	7,12	
Temp. (C)	28,9	36,6	49,1	69,5	107,0	157,9	40	54	73,7	147,0	26

Termop.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T2'	T3'	T4'	T6'	Tamb
mV	0,83	2,19	3,47	4,55	5,50	6,07					
Temp. (C)	48,2	63,5	65,4	103,9	120	129,9					26

Termop.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T2'	T3'	T4'	T6'	Tamb
mV	0,73	2,04	3,26	4,30	5,22	5,89	1,76	2,66	3,60	5,61	
Temp. (C)	59,3	60,9	61,0	99,6	115,3	126,6	56,1	71,5	87,6	122	26

DDP para a última experiência: resistência interna = 32,24 Ω

resistência interna = 885

Para efeitos de traçado de gráfico, vamos considerar somente os últimos dados, pois os primeiros foram obtidos logo após o início do resfriamento, quando o aparelho todo estava quente: havia muitas variações entre as diferenças de temperatura dos pontos medidos, estas não foram consideradas. A segunda série de medidas não foi considerada porque faltaram as temperaturas do tubo. Foi considerado assim somente a última tomada de dados.

3.1.4 Análise dos dados.

A Lei de Fourier pode ser verificada pela tendência a um perfil linear no gráfico 1. O cálculo da condutibilidade térmica é apresentado a seguir.

$$P = \frac{Q}{R} = \frac{(333,34)P}{885} = 1,1744 \text{ W} \quad \Delta T = \frac{Q}{A} = \frac{(0,02516)P}{4} = 5,14 \cdot 10^{-3}$$

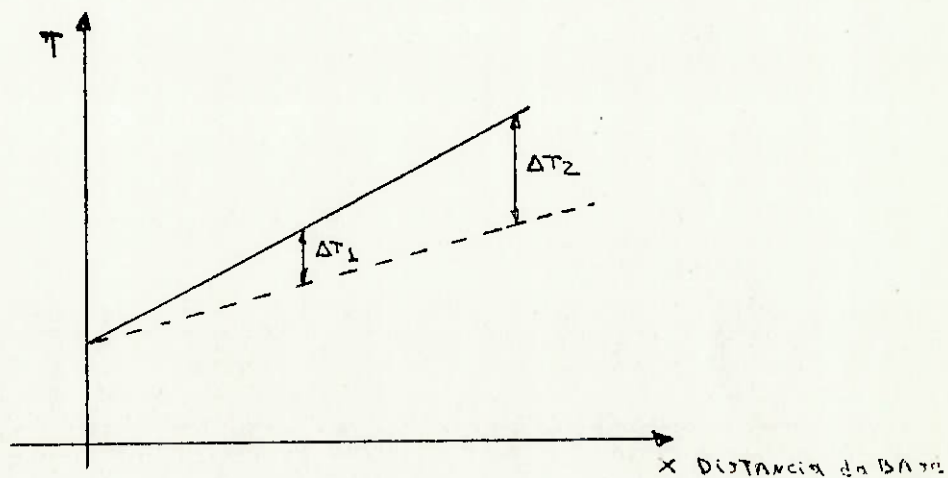
$$K = \frac{P \cdot X}{T \cdot \Delta T} = \frac{1,1744}{17,4 \cdot 5,14 \cdot 10^{-3}} = 19,8 \text{ W/mC}$$

3.2.2 Aquecimento

Uma vez tudo disposto conforme a figura da bancada (fig. 3.1-a), colocam-se os reostatos com potência máxima para se aquecer todo o conjunto. Em geral a velocidade de aquecimento é de 0,5 $^{\circ}$ C/seg.

Após alguns segundos, deve-se ligar o sistema de refrigeração. Se o sistema não estiver pré-ajustado para uma determinada temperatura, deve-se então ir mudando os reostatos até obter um mesmo perfil de temperaturas para o cano e a barra. Isto é possível, pois se chegou bastante próximo, com diferenças de até 0,02 $^{\circ}$ C (máxima precisão).

Nesta fase não é necessário ficar monitorando todos os 10 pontos ou os quatro pontos do tubo e os quatro correspondentes da barra, mas somente as temperaturas mais próximas das resistências, onde o ajuste é mais delicado, pois são as que mais variam com a mudança de fluxo de calor. Isto ocorre pela disposição feita e pelas condições de contorno onde do lado do resfriador, por mais que se varie o fluxo, as temperaturas da base do cano e da barra serão as mesmas que a da água. Num gráfico de temperatura x distância do resfriador isto pode ser facilmente visualizado, pois quando se varia o fluxo de calor o que se faz é variar o ângulo da reta.



Para uma mesma variação de fluxo de calor, $T_2 > T_1$.

É claro que para cada novo ajuste deve-se esperar entrar em regime, e os ajustes são cada vez menores. Um tempo típico para o

ajuste, desde ligue as resistências até um ajuste perfeito, e de 2,5 horas.

Nos últimos ajustes recomenda-se monitorar não os dois termopares, mas somente a diferença entre eles, isto porque as temperaturas já quase ajustadas não variam muito, e se variarem será em torno de uma temperatura, e porque poupa-se o trabalho de ficar mudando de uma temperatura para outra. Isto se faz ligando-se os dois termopares unidos por exemplo os cabos positivos e medindo a diferença do potencial entre os negativos.

Uma vez ajustado, pode-se fazer a leitura de todas as 16 temperaturas, colocando-se os dados em uma tabela.

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T2'	T3'	T4'	T6'	Tamb
----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	------

No medidor inferior colocarse a leitura em milivolts, e na superior em graus Celsius. Note que deixamos uma quadrícula para anotar a temperatura de referência. Para o cálculo do valor das temperaturas, deve-se usar o seguinte procedimento:

$T = \frac{E}{K} + T_{ref}$ sendo

K = valor da constante do termopar

T_{ref} = valor da temperatura de referência

Como usamos o termopar do tipo J, o valor de K é 17,11 μ C/mV

Os valores de T2', T3', T4' são de interesse somente para a comprovação de que o perfil é simétrico, isto é, T2'=T2, T3'=T3, T4'=T4.

Os valores podem então ser passados para um gráfico Temperatura x Distância do Resfriador, onde se pode visualizar:

• a Lei de Fourier

• a diferença de condutividade

Embora somente com 5 pontos na parte do aço e 3 pontos na parte do cobre, pode-se ver a linearidade do perfil no aço e no cobre. Comparando-se as inclinações dos perfis, podemos ter uma idéia da condutibilidade. O metal de maior condutividade terá menor inclinação.

3.2.3 Apresentação dos Resultados

Devido ao pouco tempo disponível, fizemos somente uma medição, e como esta foi considerada satisfatória, será apresentada.

Para cada temperatura, temos sua distância do resfriador, a leitura dos termopares em milivolts e a temperatura real.

Termop.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T2'	T3'	T4'	T6'
Dist(m)	50	100	250	350	450	550	150	250	300	550
mV	0,10	0,15	0,23	0,33	1,07	1,51	0,15	0,21	0,27	0,53
Temp.(C)	26,38	28	29,61	31,22	33,77	51,38	27,92	28,33	29,33	31,10

Tamb = 24,0 C O gráfico segue anexo

3.2.4 Análise de Resultados

A Lei de Fourier pode ser verificada pelo perfeito alinhamento das temperaturas tanto do cobre quanto do aço, no gráfico II, no qual fica bastante claro também a diferença de condutibilidade térmica de ambos pela diferença de inclinações das retas.

Outro fato curioso que se pode observar é que, se prolongadas as retas, a intersecção não se dará no lugar da solda central, o que indica que há uma resistência térmica, embora as barras estejam soldadas.

Passamos agora ao cálculo da condutividade térmica do aço por comparação com o cobre.

Como o fluxo de calor que passa nas duas barras é o mesmo, e a área das duas é idêntica, podemos escrever

$$q_{\text{cobre}} = q_{\text{aço}}$$

$$K_{\text{c}} \frac{\Delta T_{\text{c}}}{\Delta x} = K_{\text{a}} \frac{\Delta T_{\text{a}}}{\Delta x} \quad \frac{\Delta T_{\text{c}}}{\Delta T_{\text{a}}} = \frac{K_{\text{a}}}{K_{\text{c}}}$$

$$K_{\text{a}} = K_{\text{c}} \frac{\Delta T_{\text{c}}}{\Delta T_{\text{a}}} = \frac{386 \cdot 3,22}{16,86} = 74,61 \approx \text{ferro puro} = 73 \text{ W/mC}$$

Uma coisa que esquecemos de comentar é a eficiência deste sistema de isolamento: embora os perfis não estejam perfeitamente simétricos, a Lei de Fourier pôde ser observada com precisão. Experimentalmente foi conseguida total igualdade de perfis, mas infelizmente perdemos os dados desta experiência.

3.2.5 Erros

O único erro que tivemos nesta experiência foi o da leitura das temperaturas, que foi da ordem de 0,09 ou 0,10, o que não interferiu na verificação da Lei de Fourier. Podemos dizer que a falta de uma máxima simetria nos perfis de temperatura foi um fator de erro também pequeno, embora a máxima diferença de temperaturas entre tubo e barra tenha sido de 17,6 C, do lado do aço.

3.2.6 Conclusão

Podemos dizer que os objetivos foram plenamente alcançados, pois verificou-se a Lei de Fourier com grande precisão e foi possível medir a condutibilidade do aço com relação ao cobre, graças ao bom sistema de isolamento e à precisão dos termopares.

3.2.7 Possíveis melhorias

Uma futura experiência pode ser a avaliação da resistência térmica da junção aço-cobre para a barra e para os tubos e a avaliação da resistência térmica da solda da barra ao resfriador e da rosca interna.

3.3 Experiência número 10 - Aleta

3.3.1 Objetivo

O objetivo desta experiência é comparar os perfis de temperatura de uma aleta real e de uma teórica. Ambas terão a mesma temperatura na base e ponta isolada.

3.3.2 Procedimento

Após ligar a resistência, deixamos entrar em regime. Isto demorou uns trinta minutos. Após isto passamos a fazer a leitura dos termopares. Nesta leitura que fizemos o reostato ligado em série com a resistência estava com o valor de 3.5 Ω de resistência.

3.3.3 Dados, Apresentação dos Resultados e Análise

Na tabela a seguir estão as leituras em milivolts, as temperaturas e as distâncias da primeira temperatura

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tamb
mV	0.05	0.07	0.11	0.14	0.19	0.28	0.41	0.65	0.90	1.58	
T(°C)	26.8	27.7	28	28.5	29.2	31	33.3	37.7	42.1	54.3	24
Dist	0.425	0.44	0.325	0.33	0.275	0.22	0.165	0.11	0.055	0	

Levantamento da curva experimental

De acordo com a equação (1.2-8) temos

$$T(x) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty}) \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL} \quad \text{onde } m = \sqrt{\frac{h}{K \cdot A_c}}$$

Para diversos valores de m obtivemos a seguinte tabela:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T(°C)	24,2	27,7	30	32,4	33,7	34	35,3	37,7	42,1	54,3
D(°C)	0,425	0,44	0,395	0,37	0,275	0,22	0,145	0,11	0,055	0
m=5	30,4	30,4	31,4	32,4	33,2	35,42	37,25	40,50	47,40	54,3
m=6	30,3	30	30,5	30,6	31,3	33,0	36,7	40	46,4	54,3
m=8	27	27,2	27,4	28,2	28,2	30,2	33,4	37,4	44,2	54,3
m=9,5	26,6	26,9	27,2	27,3	28,5	30,4	33	37,4	43,7	54,3
m=12	24	24,8	24,7	25,1	25,8	27,1	31,4	35,4	42,3	54,3

O primeiro valor de m foi calculado; os outros foram sendo testados para ver qual se aproximava mais dos valores experimentais como no artigo 1 do apêndice.

O valor de h a partir do número de Nu foi $4,6183 \text{ W/m}^2\text{C}$ e

$$h^* = h + \frac{1}{\frac{\ln(12,7/11,1) \cdot e^2}{Kisol}} = 4,6183 + \frac{1}{\frac{\ln(9,5/3,0) \cdot 9,5 \cdot 10^{-3}}{0,038}}$$

$$= 4,6183 + 3,47 = 8,08 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$e \cdot m = \sqrt{\frac{h \cdot x}{K_{\text{aço}} \cdot E_{\text{barra}}}} = \sqrt{\frac{8,08 \cdot 0,01}{54 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}} = 4,99 \approx 5$$

Como foi mostrado anteriormente, o valor de $m=5$ não se aproxima bem da curva experimental, sendo que com $m=8$ temos uma melhor aproximação.

3.3.4 Conclusões

Acreditamos que o valor calculado de $m=5$ não foi bom pelo desconhecimento dos reais valores do K_{barra} , K_{isolante} e do valor do coeficiente de convecção h .

Com o valor $m=8$ acreditamos que as curvas se separam no início da aleta pelo fato já citado em 2.4.1 de que o coeficiente de que o coeficiente de convecção h não é constante, variando com a temperatura. Como as maiores variações de temperatura ocorrem no início, ali deve ocorrer a maior divergência nas curvas conforme o

gráfico 113.

3.3.5 Conclusão e possíveis melhorias

O objetivo foi plenamente alcançado, principalmente no final da alota, onde há os pontos experimentais estão sobre a curva teórica.

Como no artigo número 1 do apêndice, pode-se fazer um programa para aproximar a curva teórica da experimental através da mudança do valor de m .

BIBLIOGRAFIA

1. Holman, J. P. - Transferência de Calor
2. Tove, G. L. - Engineering Experimentation
3. Kreith, Frank - Princípios de Transferência de Calor
4. Norma da ASME CE16-65. (Steady - State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flux Meter Apparatus).

GRÁFICO I

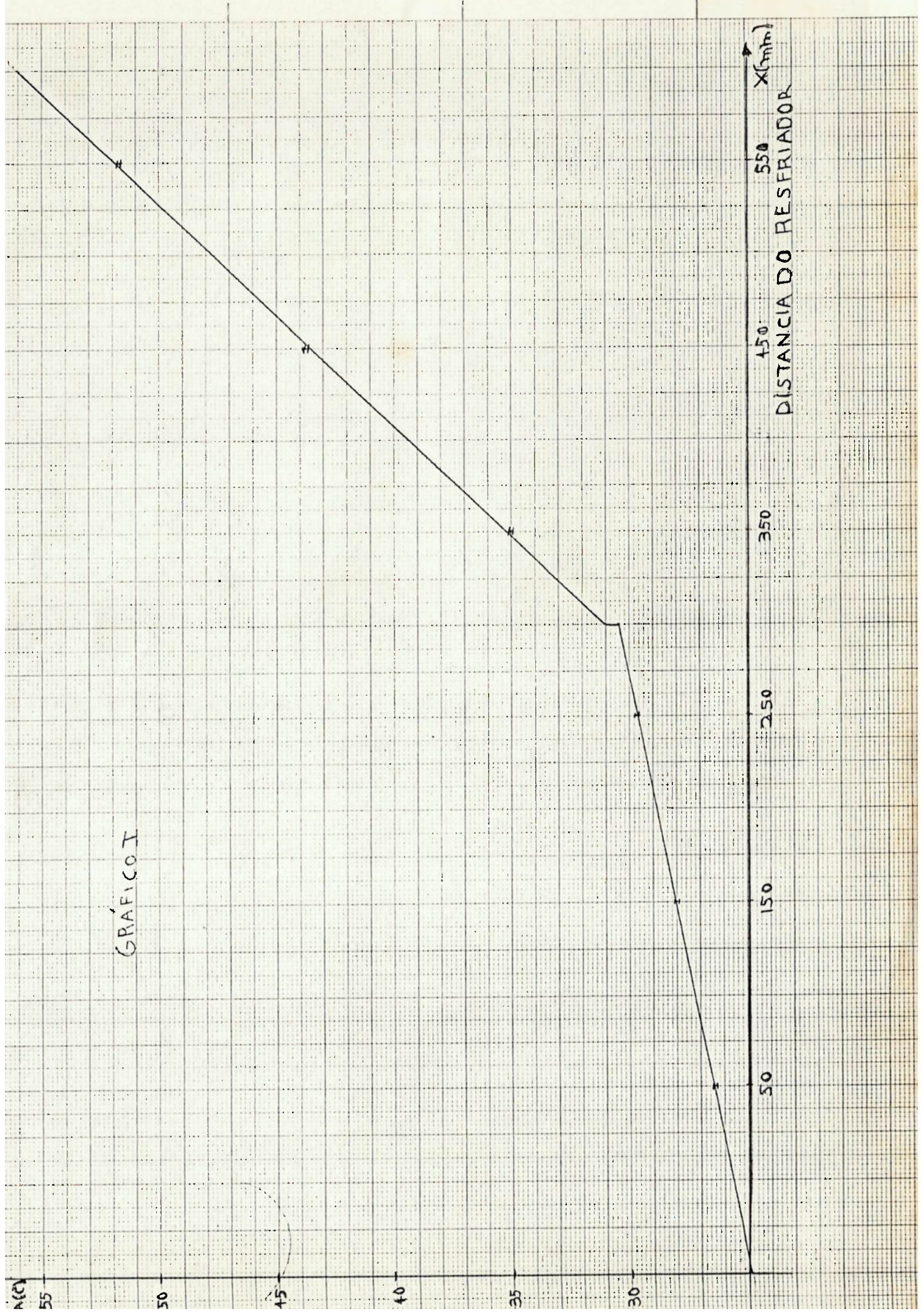


GRÁFICO II

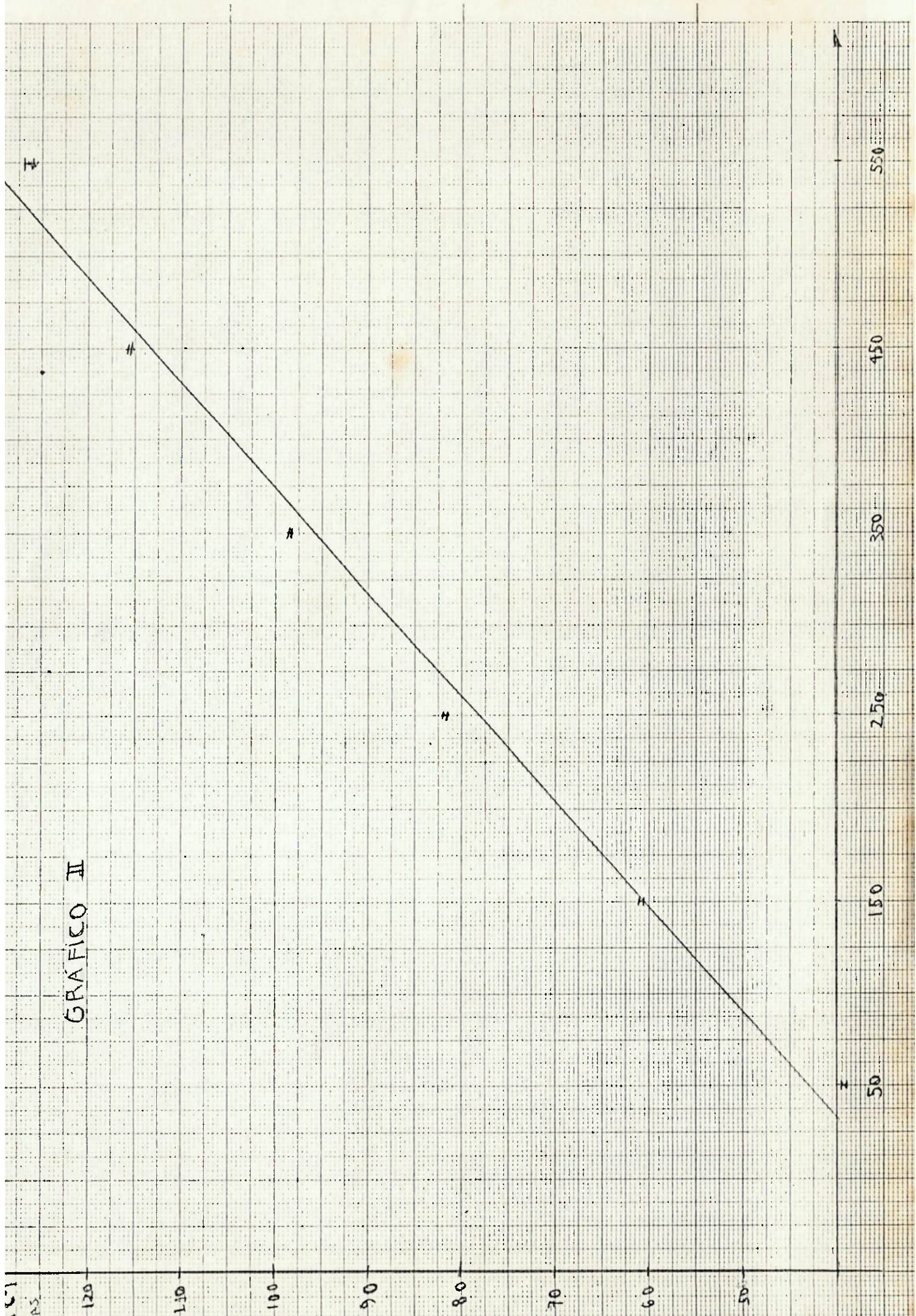
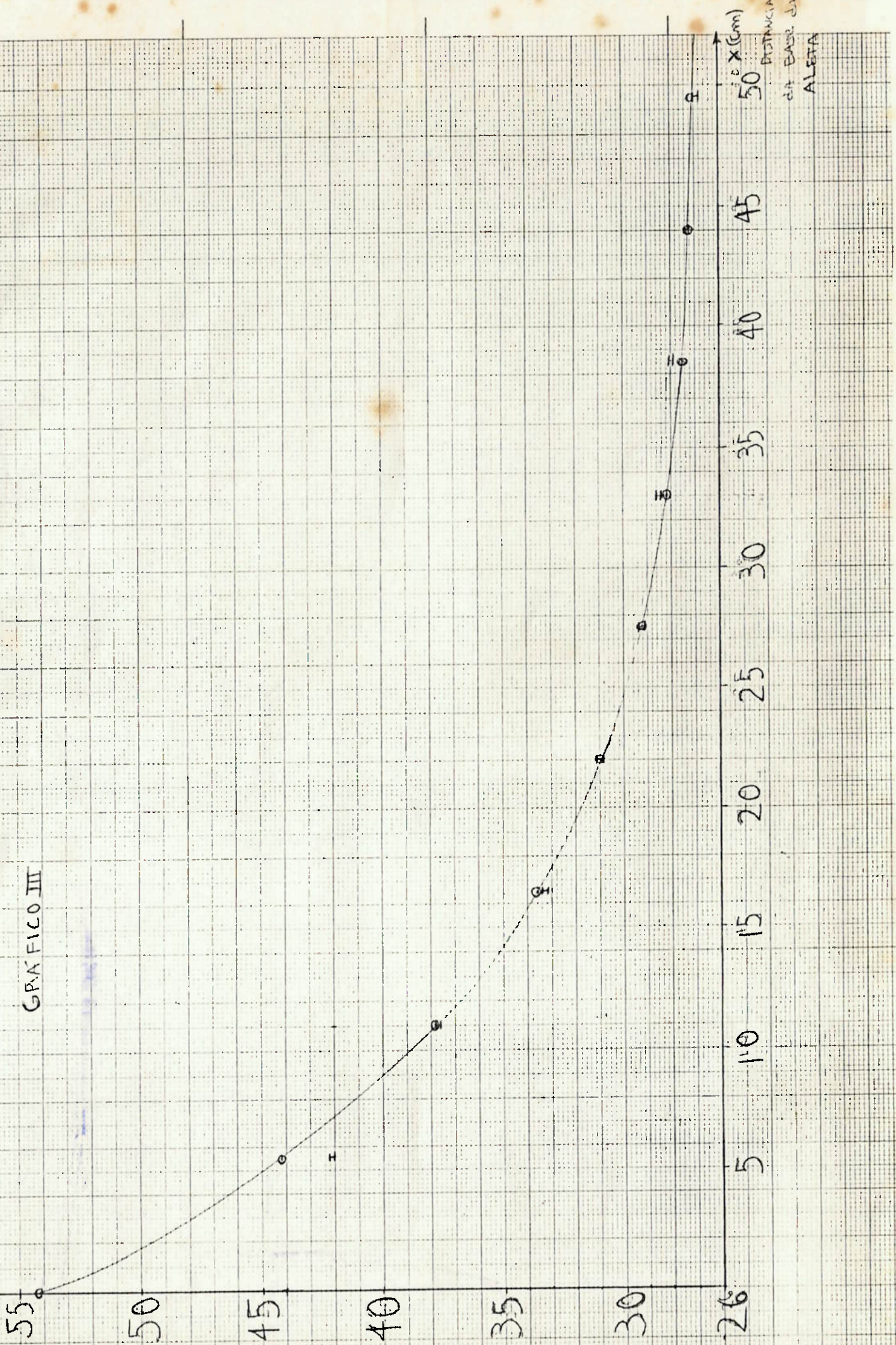


GRAFICO III



50 X (mm)
DISTANCIA
d4 BASE d1
ALETA